

تحلیل فضایی آلاینده PM_{2.5} و همبستگی آماری آن با پارامترهای هواشناسی در تهران

سعید کریمی*^۱، محمد سخایی^۲

۱ عضو هیات علمی پردیس فنی دانشگاه تهران، دانشکده محیط زیست، ایران
۲ کارشناس ارشد برنامه‌ریزی محیط‌زیست، پردیس فنی دانشگاه تهران، دانشکده محیط‌زیست، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۰۶؛ تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۰۷/۰۹)

چکیده

هدف از این پژوهش، تحلیل فضایی وضعیت آلاینده PM_{2.5} و بررسی اثرات فاکتورهای جوی بر روی آن در کلان شهر تهران است. به این منظور از داده‌های روزانه PM_{2.5} که توسط شرکت کنترل کیفیت هوا و پارامترهای جوی که توسط سازمان هواشناسی شهر تهران اندازه‌گیری شده بود استفاده شد. پارامترهای هواشناسی مورد استفاده در این تحقیق شامل: دما (حداقل، میانگین و حداکثر)، رطوبت نسبی (حداقل، میانگین و حداکثر)، سرعت باد (میانگین و حداکثر)، نقطه شبنم و فشار اتمسفری می‌باشد. برای بررسی فضایی غلظت PM_{2.5}، از روش درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله، استفاده شد. نتایج مدل وزن‌دهی معکوس فاصله نشان می‌دهد که در مناطق ۷، ۱۰، ۲۰ و ۲۱ شاهد بیشترین غلظت هستیم. میانگین روزانه غلظت PM_{2.5} در طول دوره مورد مطالعه نشان داد، بیشترین غلظت در ۱۸ خرداد و کمترین در سوم فروردین بوده است. همچنین میانگین ماهانه نشان می‌دهد بیشترین غلظت در دی‌ماه بوده است، در حالی که کمترین غلظت را ماه فروردین به خود اختصاص داده است. غلظت فصلی حاکی از آن است که در فصل زمستان شاهد بیشترین غلظت PM_{2.5} هستیم. در مرحله بعد همبستگی آماری بین PM_{2.5} و پارامترهای جوی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از همبستگی پیرسن و روش‌های چندگانه رگرسیون خطی استفاده شد. نتایج همبستگی پیرسن نشان می‌دهد، PM_{2.5} با فشار هوا و نقطه شبنم همبستگی مستقیم دارد. در حالی که با بارش و سرعت باد همبستگی معکوس دارد. ارتباط بین PM_{2.5} به عنوان متغیر وابسته و پارامترهای جوی به عنوان متغیرهای مستقل توسط مدل‌های رگرسیون خطی (Enter و Stepwise)، مورد بررسی قرار گرفت. ضریب همبستگی در معادله Enter (۰/۴۲۷) و (۰/۳۴۶ Stepwise) است. که نشان دهنده توانایی خوب هر دو مدل در پیش‌بینی مقدار PM_{2.5} می‌باشد. نتایج تست میانگین مربعات خطا، نشان می‌دهد، مدل Stepwise در پیش‌بینی PM_{2.5}، نسبت به دیگر روش‌ها مناسب‌تر است.

کلید واژه‌ها: آلودگی هوا، PM_{2.5}، پارامترهای جوی، درون‌یابی، همبستگی آماری، رگرسیون خطی

سراغاز

تحقیق‌های انجام شده در نقاط مختلف جهان نشان داده است، که قرار گرفتن در معرض آلاینده‌های هوا اثر منفی بر سلامت انسان دارد. که در ابتدا با شروع تغییرات موقتی در دستگاه تنفسی و اختلال در عملکرد ریه همراه است، در ادامه با محدود کردن فعالیت‌ها، کاهش عملکرد، افزایش مراجعه به اورژانس، بستری شدن در بیمارستان و یا مرگ و میر را به دنبال دارد (Sousa et al., 2008). آسم یک بیماری پیچیده است که علایم آن شامل: تنگی نفس، تنگی قفسه سینه و سرفه‌های مکرر می‌باشد (Alvim-Ferraz et al., 2005). این یکی از بیماری‌های تنفسی است که به طور مستقیم با آلودگی هوا در ارتباط است. افزایش علایم آسم با آلاینده‌های هوا مانند، ازن، دی‌اکسید گوگرد، دی‌اکسید نیتروژن و ذرات معلق در ارتباط مستقیم است. ذرات معلق (PM)، اشاره به یک مخلوط پیچیده‌ای از آلاینده‌های متشکل از دود، گرد و غبار و انواع مواد جامد و مایع دارد که در واسطه گازی قرار گرفته‌اند (Degobbi et al., 2011). شواهد تحقیقاتی نشان می‌دهد که PM₁₀ و PM_{2.5} ممکن است به عمق سیستم تنفسی نفوذ کنند و در نتیجه تاثیرات مختلفی بر سلامت انسان‌ها از جمله مرگ زودرس در بیماران قلبی و ریوی، حملات قلبی، ضربان قلب نامنظم، تشدید آسم و کاهش عملکرد ریه داشته باشند. چنین ذراتی همچنین سبب کاهش میدان دید می‌شوند (McKendry, 2000). (ذرات با قطر آبرودینامیکی کمتر یا مساوی ۲/۵ میکرومتر)، جدی‌ترین خطر را برای عملکرد ریه و مشکلات قلبی - عروقی دارند (Zhang et al., 2013). امروزه، روش‌های مختلفی برای تخمین آلودگی هوا وجود دارد. یکی از این روش‌ها تلفیق اطلاعات ایستگاه‌های سنجش آلودگی و روش‌های تحلیل فضایی است. یکی از روش‌های تحلیل فضایی روش وزن‌دهی معکوس فاصله^(۱) می‌باشد. که در آن، تنها عامل موثر برای وزن‌دهی، فاصله است. معکوس فاصله یک روش وزن‌دهی متوسط بوده که در آن داده‌ها از طریق رابطه انحراف معیار یک نقطه از سایر نقاط با استفاده از گره‌هایی شبکه‌بندی شده و وزن‌دهی می‌شوند (Basu et al., 2004). در تحقیقات صورت گرفته در ارتباط با پخش آلودگی هوا، مطالعه پارامترهای هواشناسی در لایه تروپوسفر امری ضروری است. این لایه در واقع تحت تاثیر سطح زمین است و عمده انتقال بین جو و زمین

از طریق اختلاط تالامی در این لایه صورت می‌پذیرد. عمق این لایه بسته به میزان سرعت باد، شرایط محیطی، میزان سرد و گرم شدن سطح زمین، رطوبت و ... متفاوت است (Javanbakht Amiri, 2012). پارامترهای هواشناسی تاثیرگذار بر مساله آلودگی هوا را می‌توانیم به دو دسته اولیه و ثانویه تقسیم‌بندی کنیم. پارامترهای اولیه عبارتند از: جهت و سرعت باد، دما، ارتفاع آمیختگی و پارامترهای ثانویه عبارتند از: بارش، رطوبت، تابش و دید. این پارامترها به طور قابل ملاحظه‌ای تابع عرض جغرافیایی، فصل و توپوگرافی هستند. همان‌طوری که شرایط آب و هوایی بر شدت آلودگی تاثیر می‌گذارد، آلودگی هوا نیز شرایط آب و هوایی را تغییر می‌دهد. مثلا آلودگی هوا می‌تواند سبب کاهش دید، افزایش فراوانی و مدت مه‌های غلیظ و کاهش تابش ورودی خورشید شود. همچنین بارندگی و رطوبت نسبی در شهرها ممکن است به ترتیب بیشتر و کمتر شود. در رابطه با تخمین غلظت آلاینده‌ها و اثر پارامترهای هواشناسی بر روی آنها مطالعات متعددی صورت گرفته که چندین نمونه از مطالعات انجام شده به شرح زیر است. نتایج بررسی توزیع مکانی زمانی میانگین آلاینده‌ها طی ماه دسامبر ۲۰۱۲ نشان داد که غلظت آلاینده‌های گازی از جنوب به شمال و غلظت آلاینده‌های ذرات معلق از شمال به جنوب و شرق به غرب افزایش می‌یابد (Shareipoor & Akbari, 2014). بررسی فضایی وضعیت آلودگی هوای کلان شهر مشهد نشان داد که بیشترین میانگین ماهیانه آلودگی در مهرماه و کمترین میانگین آلودگی ماهیانه نیز در آبان است (Miri et al., 2016). بررسی همبستگی آماری پراکنش آلاینده‌های CO و PM₁₀ با تغییرات سرعت باد در شهر تهران نشان داد، در همه ایستگاه‌ها در ۴۶/۶٪ همبستگی منفی معنی‌داری بین کاهش غلظت CO با افزایش سرعت باد و ۳۰٪ همبستگی معنی‌داری بین کاهش غلظت PM₁₀ و افزایش سرعت باد وجود دارد (Mansouri et al., 2011). نتایج حاصل از بررسی تغییرات زمانی غلظت PM در کرمانشاه نشان داد ماه تیر حداکثر غلظت و ماه دی حداقل مقدار را به خود اختصاص داده است (Nazari et al., 2013). در تحقیقی که بر روی ۵ آلاینده شاخص کیفیت هوا در کلانشهر تهران در طی سال‌های ۸۰-۸۸ انجام شد، مشخص شد که متغیرهای هواشناسی می‌توانند در میزان آلودگی هوای شهر تهران موثر واقع شوند.

پرداخته شده است. بنابراین از اهداف عمده این مطالعه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. تحلیل و پهنه‌بندی آلودگی هوای شهر تهران با استفاده از روش معکوس وزنی فاصله طی سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۴
۲. بررسی تغییرات روزانه، ماهانه و فصلی غلظت PM_{2.5} طی سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۴
۳. بررسی تاثیر پارامترهای هواشناسی بر میزان غلظت PM_{2.5} طی سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۴

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهر تهران پایتخت ایران است که از نظر جغرافیایی در ۵۱ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۳ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۴۴ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. مساحت آن ۷۲۰ کیلومتر مربع و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۱۲۸۰ متر است (شکل ۱). تهران دارای آب و هوای معتدل است و جمعیت آن در سال ۱۳۹۰ بالغ بر ۸/۵ میلیون نفر بوده است. بیش از یک میلیون اتومبیل و تعداد زیادی کارخانه در شهر تهران و مناطق صنعتی گسترده در اطراف آن وجود دارد. به همین دلیل شهر تهران به یکی از آلوده‌ترین شهرهای ایران تبدیل شده است (شکل ۲). بنابراین بررسی کیفیت هوای محیط در این کلان شهر بسیار ضروری و از مباحث مهم است.



شکل (۱): موقعیت منطقه مورد مطالعه

همچنین از دیگر نتایج مهم این تحقیق می‌توان به روند کاهشی آلاینده‌های (PM₁₀, CO, NO₂ و SO₂) در طی سنوات مورد مطالعه اشاره نمود (Najafpoor et al., 2015). نتایج بررسی کمی و کیفی وضعیت آلودگی هوا و ارتباط آن با عوامل اقلیمی در شهر بیرجند نشان داد، آلاینده‌ها ۱۰ روز از حد استاندارد تجاوز کرده است. PM₁₀ و CO به عنوان آلاینده مسئول آلودگی هوای شهر بیرجند محسوب می‌شوند. همچنین تجزیه و تحلیل آماری بیان‌کننده رابطه مستقیم و معنی دار بین PM₁₀ با سرعت باد می‌باشد (Rezaei et al., 2013). تغییرات فصلی کیفیت هوای شهر کرمانشاه از نظر غلظت آلاینده PM نشان داد که در تیر ماه و فصل تابستان بدترین کیفیت هوا را از نظر غلظت PM داشتند، که آن نیز به دلیل تواتر و شدت ورود ریزگردها در زمان‌های ذکر شده بوده است (Almasi et al., 2014). بررسی آلودگی هوای شهر سنندج با تاکید بر تغییرات زمانی غلظت ذرات معلق نشان داد، بین میانگین دمای ماهیانه و شاخص ذرات معلق همبستگی مستقیمی وجود دارد، به طوری که در دوره مطالعه، بیشترین میزان ذرات معلق، مربوط به ماه‌های می تا جولای بوده است. همچنین یک همبستگی معکوس بین میانگین رطوبت نسبی ماهیانه و شاخص ذرات معلق دیده شد (Rahimi et al., 2015). تاثیر فاکتورهای هواشناسی بر روی غلظت ذرات معلق و NO₂ در مالزی نشان داد NO₂ با سرعت باد رابطه معکوس دارد در حالی که ذرات معلق با سرعت باد و رطوبت نسبی ارتباط منفی دارد (Dominick et al., 2012). در تحقیقی که در شهر کاتماندو نپال صورت گرفت مشخص شد سرعت باد، فشار جوی و رطوبت نسبی در مقایسه با سایر پارامترها اثر معنی‌دارتری بر روی غلظت ذرات معلق دارند. نتایج این تحقیق نشان داد افزایش بارش و رطوبت نسبی سبب کاهش غلظت ذرات معلق می‌شود (Giri et al., 2008). نتایج تحقیقی که در شهر زونگولداک ترکیه انجام شد، نشان داد، PM₁₀ و PM_{2.5} با دما، بارش و فشار رابطه معکوس دارند (Tecer et al., 2008). با توجه به این که ذرات معلق، اثرات منفی بسیاری بر سلامتی انسان‌ها و گیاهان و همچنین نقش بسیار مهمی در تغییرات آب و هوای جهانی دارد، در این تحقیق به بررسی تغییرات غلظت 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 موثر باشند، در این تحقیق به بررسی رابطه بین غلظت PM_{2.5} و پارامترهای هواشناسی نیز

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. یکی دیگر از عوامل موثر در این روش تعداد و موقعیت نقاط مجاور و به عبارتی وضعیت واحدهای همسایگی است. از آن جایی که نقاطی که نزدیک‌تر هستند شباهت بیشتری دارند، مکان‌های دورتر تاثیر کمتر داشته و می‌توان آن‌ها را از محاسبه‌ها خارج نمود. بنابراین، انتخاب و محدود کردن تعداد نقاط مجاور و به عبارتی پنجره جستجو برای نقاط مجاور در تحلیل‌ها مهم هستند (Afruz, 2011). از آن جایی 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.

در این تحقیق، از غلظت $PM_{2.5}$ که به صورت روزانه در طول سال‌های ۹۲ تا ۹۴ توسط شرکت کنترل کیفیت هوا در ۱۸ ایستگاه به نام‌های اقدسیه- منطقه ۱، پارک رز- منطقه ۲، پونک- منطقه ۵، پیروزی- منطقه ۱۳، تربیت مدرس- منطقه ۶، ستاد بحران- منطقه ۷، شادآباد- منطقه ۱۸، شریف- منطقه ۲، شهر ری- منطقه ۲۰، شهرداری منطقه ۲، شهرداری منطقه ۴، شهرداری منطقه ۱۰، شهرداری منطقه ۱۱، شهرداری منطقه ۱۶، شهرداری منطقه ۱۹، شهرداری منطقه ۲۱، گلبرگ- منطقه ۸، و مسعودیه- منطقه ۱۵ در شهر تهران اندازه‌گیری شده بود استفاده شد. ابتدا توسط نرم‌افزار Excel میانگین ماهانه و فصلی غلظت $PM_{2.5}$ محاسبه و سپس نمودارهای مربوطه ترسیم شد. برای تحلیل فضایی و درون‌یابی غلظت $PM_{2.5}$ از نرم‌افزار ARC GIS استفاده شد. در قدم بعدی تحلیل آماری بین غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ و پارامترهای هواشناسی (اندازه‌گیری شده توسط سازمان هواشناسی) توسط نرم‌افزار SPSS بررسی شد. پارامترهای هواشناسی مورد استفاده در این تحقیق شامل: دما (دمای حداکثر، میانگین و حداقل)، رطوبت نسبی (میانگین و حداکثر و حداقل)، بارش، سرعت باد، نقطه شبنم و فشار هوا است. داده‌های روزانه غلظت $PM_{2.5}$ در تحلیل آماری به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد و داده‌های روزانه پارامترهای هواشناسی استفاده شده در طول این دوره به عنوان متغیر مستقل انتخاب شدند. برای تعیین همبستگی از ضریب همبستگی پیرسن^(۳) استفاده شد. این



شکل (۲): دو تصویر از یک مکان، در دو بازه زمانی که نشان‌دهنده آلودگی هوا در طول سال‌های اخیر است.

روش‌های تحلیل داده‌ها

- درون‌یابی

روش تخمین و برآورد میزان متغیر پیوسته را در مناطق نمونه‌گیری نشده در داخل ناحیه‌ای که مشاهده‌های نقطه‌ای پراکنده شده‌اند، درون‌یابی^(۲) می‌گویند. انتخاب یک تکنیک میان‌یابی بهینه برای تخمین ویژگی‌های مورد مطالعه در نقاط نمونه‌گیری نشده نقش مهمی در مدیریت داده‌ها دارد. روش‌های مختلفی برای تخمین وجود دارد که در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان آن‌ها را به روش‌های زمین‌آماری و روش‌های کلاسیک تقسیم کرد. روش‌های کلاسیک روش‌هایی هستند که از آمار کلاسیک برای تخمین استفاده می‌کنند، در صورتی که در روش‌های زمین‌آماری، تخمین بر اساس ساختار فضایی موجود در محیط موردنظر صورت می‌گیرد. تکنیک‌های میان‌یابی زمین‌آماری، کمیت همبستگی مکانی نقاط نمونه‌برداری شده را مدنظر قرار داده و تخمین را بر اساس موقعیت قرارگیری مکان نمونه‌های اندازه‌گیری نشده انجام می‌دهد (Habashi et al., 2006).

- روش معکوس وزنی فاصله

روش معکوس وزنی فاصله یکی از روش‌های میان‌یابی کلاسیک است که در مطالعه‌های جغرافیایی از آن زیاد استفاده می‌شود. فرض اساسی این روش بر آن است که با افزایش فاصله میزان تاثیر پارامترها در برآورد سطح کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر در این روش وزن نقاط نمونه بر روی نقطه مجهول براساس فاصله بین نقاط معلوم و نقطه مجهول محاسبه می‌شود. از این روش برای پیش‌بینی در مکان‌هایی که داده‌های آن‌ها اندازه‌گیری

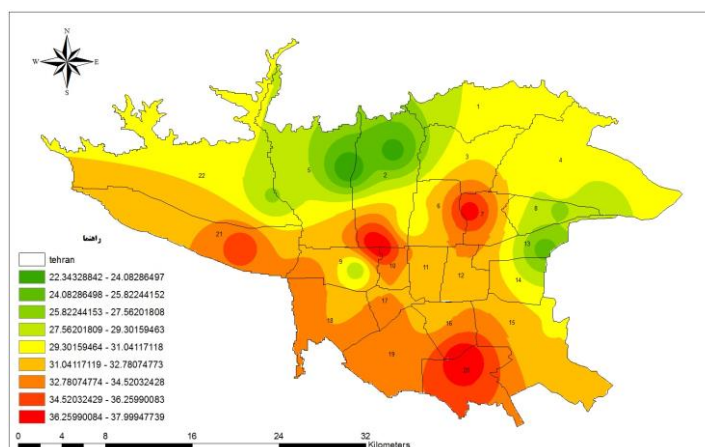
شده برای پیش‌بینی در مدل رگرسیون مشاهده می‌شوند. اما در گام به گام، تمام متغیرها را می‌توان وارد کرد ولی بسته به اهمیتشان ممکن است از مدل حذف شوند. بنابراین، فقط آن دسته از متغیرهایی که تاثیر بیشتری بر متغیر وابسته دارند در مدل رگرسیون مشاهده می‌شوند.

یافته‌ها

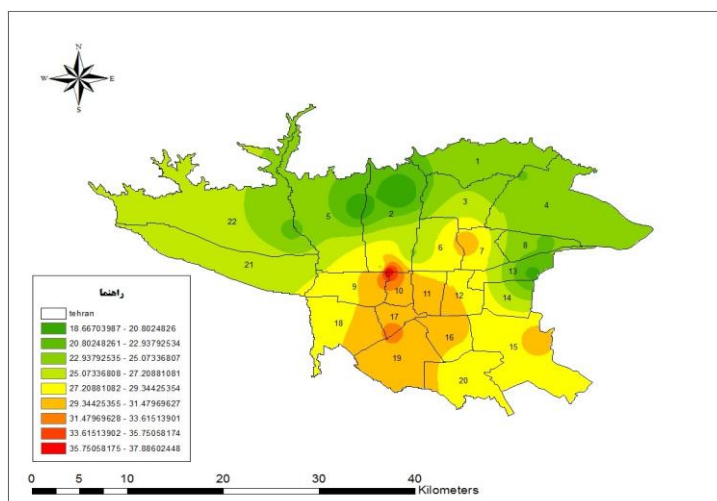
تحلیل فضایی

نتایج مدل معکوس وزنی فاصله نشان داد، که بیشترین غلظت در مناطق ۷، ۱۰، ۲۰ و ۲۱ می‌باشد در حالی که کمترین غلظت در مناطق ۱، ۲، ۴، ۵، ۸ و ۱۳ بوده است (شکل‌های ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷).

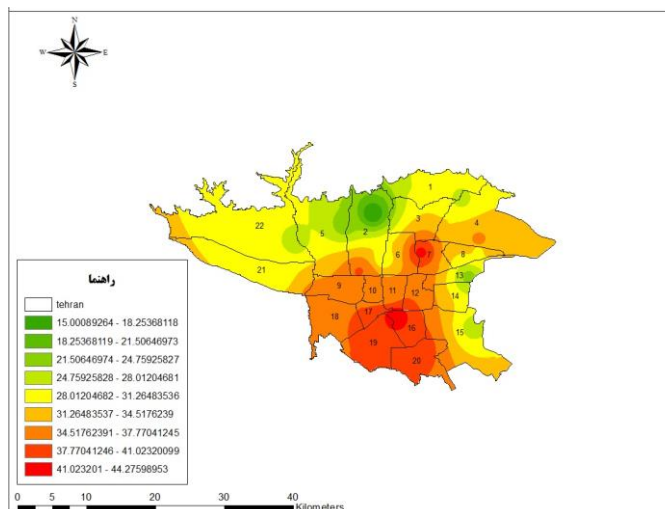
ضریب همبستگی را که به آن ضریب همبستگی ساده نیز می‌گویند، می‌توان متداول‌ترین نوع از مجموعه ضرایب همبستگی نامید. کاربرد آن زمانی است که توزیع توام مشاهده‌ها نرمال بوده و از نوع مشاهده‌های نسبتی و کمی (گسسته یا پیوسته) باشند. این ضریب همبستگی میزان ارتباط خطی بین کمیت‌ها را نشان می‌دهد. آزمون فرضیه این نوع از ضریب همبستگی از نوع پارامتری است، به معنای آن که توزیع آماره آن مشخص است. به دلیل وجود هم خطی بین متغیرهای مستقل (دما، رطوبت نسبی، بارندگی، نقطه شبنم و سرعت باد) از رگرسیون خطی^(۴) برای ارتباط بین PM_{2.5} و پارامترهای جوی استفاده شد. برای پیش‌بینی PM_{2.5} از دو روش مدل‌سازی رگرسیون چندگانه^(۵) شامل روش وارد کردن^(۶) و گام به گام^(۷) استفاده شد. در روش وارد کردن، تمام متغیرهای مستقل انتخاب



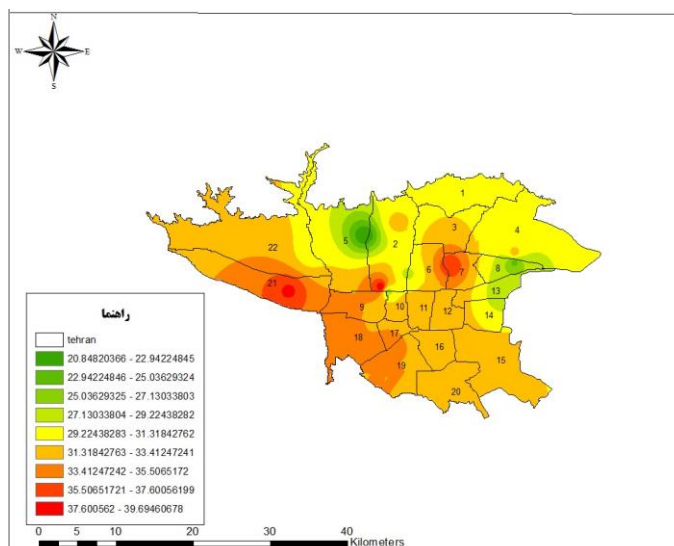
شکل (۳): میانگین غلظت سالانه آلاینده PM_{2.5} در طول سال‌های ۹۲ تا ۹۴



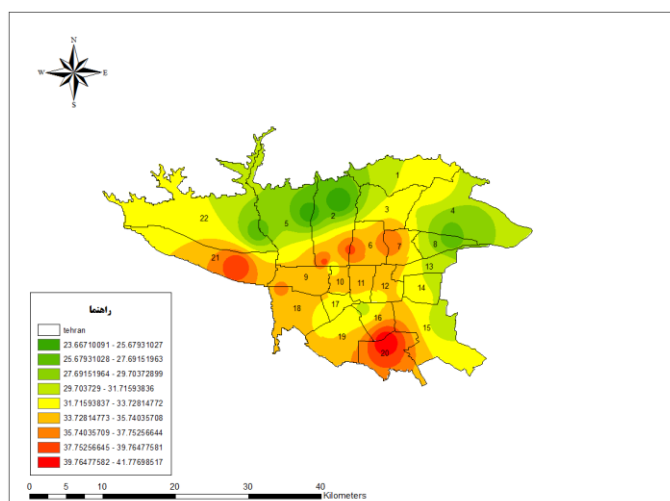
شکل (۴): میانگین غلظت آلاینده PM_{2.5} در فصل بهار طی سال‌های ۹۲ تا ۹۴



شکل (۵): میانگین غلظت آلاینده PM_{2.5} در فصل تابستان طی سال‌های ۹۲ تا ۹۴



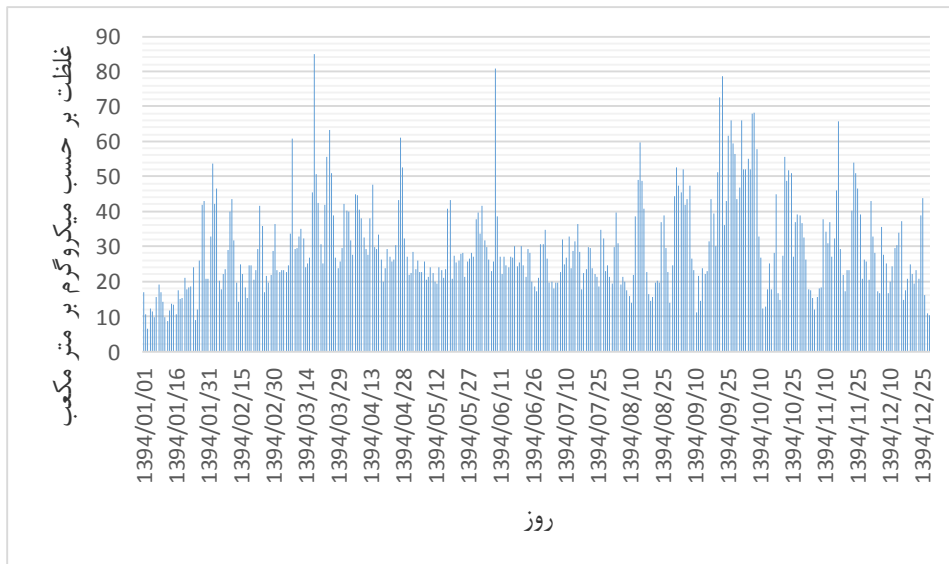
شکل (۶): میانگین غلظت آلاینده PM_{2.5} در فصل پاییز طی سال‌های ۹۲ تا ۹۴



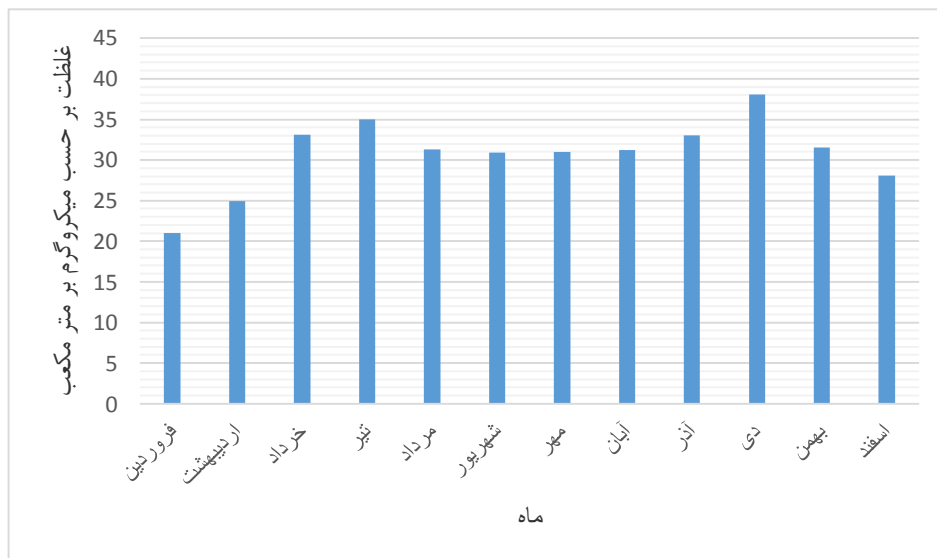
شکل (۷): میانگین غلظت آلاینده PM_{2.5} در فصل زمستان طی سال‌های ۹۲ تا ۹۴

ماه‌های نشان داد که بیشترین غلظت در دی ماه و کمترین غلظت در ماه فروردین است (نمودار ۲). غلظت فصلی نشان داد که بیشترین غلظت PM_{2.5} در فصل زمستان بوده است (نمودار ۳).

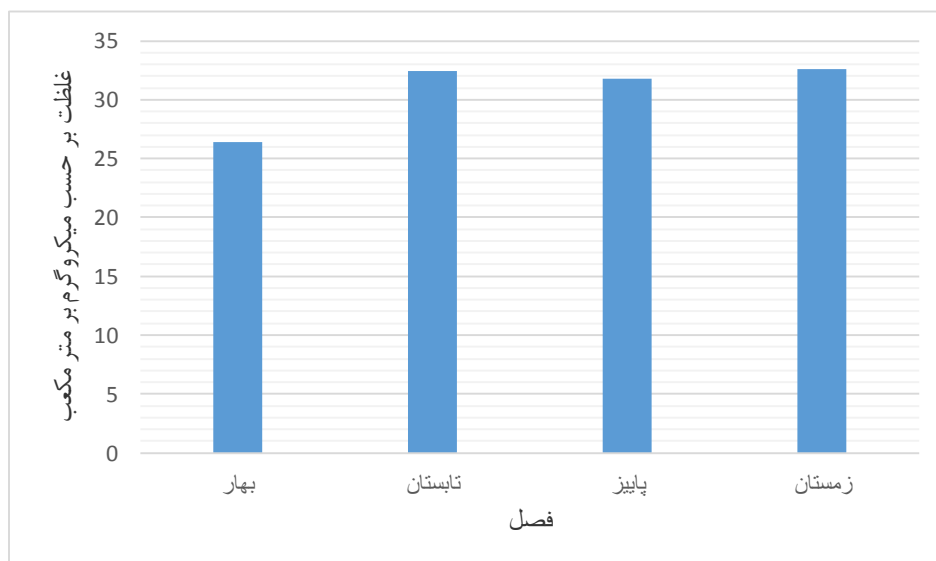
در نمودارهای (۱، ۲ و ۳)، غلظت‌های روزانه، ماهانه و فصلی در طول دوره مورد مطالعه آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین غلظت PM_{2.5} در روز ۱۸ خرداد و همچنین کمترین غلظت آن در سوم فروردین بوده است (نمودار ۱).



نمودار (۱): غلظت روزانه PM_{2.5} بر حسب (μg/m³) در سال ۱۳۹۴



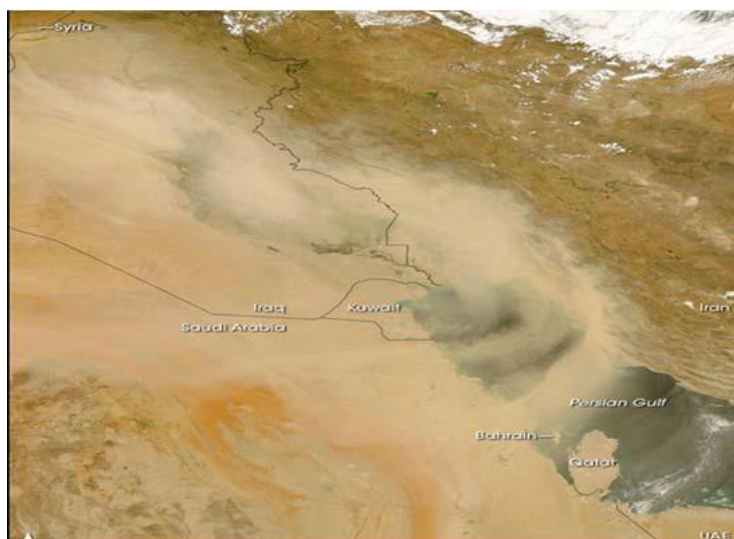
نمودار (۲): غلظت ماهیانه PM_{2.5} بر حسب (μg/m³) در طول سال‌های ۹۲ تا ۹۴



نمودار (۳): غلظت فصلی PM_{2.5} بر حسب ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) در طول سال‌های ۹۲ تا ۹۴

به مسافت‌های طولانی می‌شود. منبع بسیاری از این ذرات معلق در طول این مدت سرزمین‌های خشک غرب کشور به خصوص در بعضی مناطق کشور عراق است (شکل ۸).

با شروع تابستان بارش به حداقل و تبخیر به حداکثر خود می‌رسد. بنابراین، خاک به شدت خشک شده که از پیامدهای آن می‌توان به فرسایش بادی اشاره کرد، که سبب حمل ذرات معلق



شکل (۸): انتقال گرد و غبار از عراق به غرب و جنوب غربی ایران

آمریکا با این کشور، مناطق مستعد جدا شدن ذرات خاک، به دلیل سوء مدیریت و فراموشی از انجام اقدام‌های درمانی و حفاظت در برابر فرسایش بادی، افزایش یافته است. در حال حاضر اهواز، یکی از شهرستان‌های بزرگ در بخش جنوب‌غربی ایران است که به عنوان آلوده‌ترین شهرستان در جهان بر اساس یک نظرسنجی توسط سازمان بهداشت جهانی در سال ۲۰۱۱ به

متأسفانه در نمودارهای ماهیانه و فصلی شاهد بالا بودن غلظت PM_{2.5} از حد استاندارد تعریف شده (۱۵ میکروگرم بر متر مکعب)، توسط استاندارد ملی کیفیت هوای آمریکا^(۸) هستیم. بیشترین غلظت ذرات معلق در سال‌های اخیر در قسمت‌های غربی و جنوبی ایران مشاهده شده است، که منبع اصلی آن زمین‌های خشک کشور عراق می‌باشد. به خصوص بعد از جنگ

دلیل غلظت بالای گرد و غبار معرفی شده است (Cunningham et al., 2002).

(جدول ۱). مقدار احتمال، سطح معنی‌داری بین متغیرها را نشان می‌دهد، به طور مثال سرعت باد، فشار و رطوبت نسبی حداکثر سطح معنی‌داری را با PM_{2.5} دارند در صورتی که نقطه شبنم و دما معنی‌دار نمی‌باشند. تک ستاره نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح ۵ درصد و دو ستاره نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح ۱ درصد (بالاترین سطح معنی‌داری) است.

آزمون همبستگی

نتایج همبستگی پیرسن بین PM_{2.5} و پارامترهای جوی نشان داد، ذرات گرد و غبار با فشار و نقطه شبنم، همبستگی مستقیم دارد در حالی که با بارش و سرعت باد همبستگی معکوس دارد

جدول (۱): همبستگی پیرسن بین PM_{2.5} و پارامترهای جوی

پارامترهای جوی	ضریب همبستگی پیرسن	مقدار احتمال	تعداد مشاهده‌ها
دما (حداکثر)	-۰/۰۴۴	۰/۴۰۱	۳۶۵
دما (میانگین)	-۰/۰۶۰	۰/۲۵۱	۳۶۵
دما (حداقل)	-۰/۰۸۰	۰/۱۲۹	۳۶۵
نقطه شبنم	۰/۰۳۶	۰/۴۹۴	۳۶۵
رطوبت نسبی (حداکثر)	۰/۰۶۰	۰/۲۵۴	۳۶۵
رطوبت نسبی (میانگین)	۰/۱۱۴*	۰/۰۳۰	۳۶۵
رطوبت نسبی (حداقل)	۰/۱۲۲*	۰/۰۲۰	۳۶۵
سرعت باد (حداکثر)	۰/۱۹۷*	۰/۰۰۰	۳۶۵
سرعت باد (میانگین)	-۰/۳۴۶**	۰/۰۰۰	۳۶۵
بارش	-۰/۰۸۴	۰/۱۰۹	۳۶۵
فشار هوا	۰/۱۸۷**	۰/۰۰۰	۳۶۵

درجه‌های آزادی هر کدام مشاهده می‌شود. براساس مقدار آماره آزمون که دارای توزیع F است و مقدار احتمال به‌دست آمده، نتیجه می‌شود که معادله رگرسیونی ایجاد شده، مناسب است.

جدول آنالیز واریانس^(۹) نشان می‌دهد که در هر دو روش رگرسیونی Enter و Stepwise ارتباط معناداری (در سطح ۱ درصد) بین متغیرهای مختلف وجود دارد (جدول ۲، الف و ب). در این جدول مجموع مربعات رگرسیونی، خطا و کل به همراه

جدول (۲- الف): آنالیز واریانس در مدل Enter

مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره f	مقدار احتمال
۱۱۷۴۸/۰۷۸	۱۱	۱۰۶۸/۰۰۷	۷/۱۵۲	۰/۰۰۰
۵۲۷۱۴/۳۳۵	۳۵۳	۱۴۹/۳۳۲		
۶۴۴۶۲/۴۱۳	۳۶۴			

متغیر وابسته: PM_{2.5} متغیرهای مستقل: تمام پارامترهای جوی

جدول (۲- ب): آنالیز واریانس در مدل Stepwise

مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره f	مقدار احتمال
۷۷۳۲/۱۳۲	۱	۷۷۳۲/۱۳۲	۴۹/۴۷۶	۰/۰۰۰
۵۶۷۳۰/۲۸۱	۳۶۳	۱۵۶/۲۸۲		
۶۴۴۶۲/۴۱۳	۳۶۴			

متغیر وابسته: PM_{2.5} متغیرهای مستقل: سرعت باد حداکثر.

در جدول (۳)، ضرایب همبستگی خطی برای هر دو روش در طول دوره مورد مطالعه آورده شده است. ضرایب همبستگی، خطاهای استاندارد، ضریب استاندارد شده بتا، آماره آزمون و سطح معناداری در این جدول نشان داده شده است.

جدول (۳-الف): ضرایب همبستگی خطی در مدل Enter

مقدار احتمال	آماره آزمون	ضرایب استاندارد شده		ضریب ثابت	
		Beta	انحراف معیار خطا		
۰/۹۰۱	-۰/۱۲۴		۱۸۴/۸۳۹	-۲۲/۹۰۵	ضریب ثابت
۰/۰۰۱	۳/۳۷۷	۰/۸۴۸	۰/۳۱۸	۱/۰۷۵	دما (حداکثر)
۰/۰۶۰	۱/۸۸۹	۰/۴۷۰	۰/۳۳۲	۰/۶۲۷	دما (میانگین)
۰/۰۰۱	-۳/۲۳۷	-۱/۱۱۲	۰/۵۰۶	-۱/۶۳۹	دما (حداقل)
۰/۶۹۸	-۰/۳۸۸	-۰/۰۵۴	۰/۳۷۴	-۰/۱۴۵	نقطه شبنم
-۰/۲۰۹	-۱/۲۵۸	-۰/۲۴۴	۰/۱۲۳	-۰/۱۵۵	رطوبت نسبی (حداکثر)
۰/۱۷۰	۱/۳۷۴	۰/۴۱۷	۰/۲۳۰	۰/۳۱۶	رطوبت نسبی (میانگین)
۰/۳۰۳	۱/۰۳۲	۰/۱۵۵	۰/۱۶۴	۰/۱۶۹	رطوبت نسبی (حداقل)
۰/۶۱۱	۰/۵۰۹	۰/۰۲۹	۰/۰۴۳	۰/۰۲۲	سرعت باد (حداکثر)
۰/۰۰۰	-۴/۷۷۵	-۰/۲۹۳	۰/۱۵۷	-۰/۷۵۰	سرعت باد (میانگین)
۰/۰۳۶	-۲/۱۰۵	-۰/۱۳۰	۰/۴۹۹	-۱/۰۵۱	بارش
۰/۸۲۰	۰/۲۲۷	۰/۰۱۶	۰/۱۷۹	۰/۰۴۱	فشار (پاسکال)

کمیت‌های رگرسیونی

جدول (۳-ب): ضرایب همبستگی خطی در مدل Stepwise

مقدار احتمال	آماره آزمون	ضرایب استاندارد شده		ضریب ثابت	
		Beta	انحراف معیار خطا		
۰/۰۰۰	۲۶/۳۸۱		۱/۴۸۴	۳۹/۱۴۸	ضریب ثابت
۰/۰۰۰	-۷/۰۳۴	-۰/۳۴۶	۰/۱۲۶	-۰/۸۸۷	سرعت باد (حداکثر)

کمیت‌های رگرسیونی

تجزیه و تحلیل مدل رگرسیون

نشان‌دهنده توانایی خوب هر دو مدل در پیش‌بینی مقدار $PM_{2.5}$ است. همچنین میزان ضریب تشخیص در هر دو روش حدود ۰/۱۵ بوده است که نشان می‌دهد پارامترهای جوی مورد استفاده در این مطالعه ۱۵ درصد کل تغییرات کمیت پاسخ یعنی $PM_{2.5}$ را شامل می‌شوند. میزان ضریب همبستگی در هر دو مدل تقریباً برابر است. بنابراین تفاوتی بین دو مدل مشاهده نمی‌شود، با توجه به این که مدل Enter نیاز به داده‌های زیادی دارد بهتر است از معادله دوم که بر اساس مدل Stepwise است برای پیش‌بینی $PM_{2.5}$ استفاده شود. Beta در جدول (۳) میزان اثر

رگرسیون خطی نشان داد که آلودگی ذرات معلق به پارامترهای جوی وابسته است. همچنین در این جدول سطح و میزان ارتباط دیده می‌شود. نتایج مدل رگرسیون خطی نشان داد که بارش و سرعت باد (میانگین) تاثیر معکوس بر روی میزان غلظت $PM_{2.5}$ دارند به طوری که افزایش بارش سبب کاهش غلظت $PM_{2.5}$ شده است. در حالی که با افزایش دما و سرعت باد (حداکثر) میزان غلظت ذرات معلق بیشتر می‌شود. میزان ضریب همبستگی در معادله Enter (۰/۴۲۷) و (Stepwise) (۰/۳۴۶) می‌باشد که

هواشناسی است. به طور مثال در جدول (۳- الف)، سرعت باد (میانگین)، در مقایسه با سرعت باد (حداکثر) ارتباط بیشتری با ذرات معلق دارد. معادله‌های مدل خطی پس از استفاده از مدل Enter و Stepwise برای دوره مورد بررسی به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} \text{نقطه شبنم} &+ (-0/145) \text{ دما (حداقل)} + (-1/639) - 22/905 \text{ دما (حداکثر)} + (1/075) \text{ دما (میانگین)} + (0/627) \text{ (Enter)} : \text{ مقدار ذرات معلق} \\ &+ \text{ سرعت باد (حداکثر)} + (0/022) \text{ رطوبت نسبی (حداقل)} + (0/169) \text{ رطوبت نسبی (میانگین)} + (0/316) \text{ رطوبت نسبی (حداکثر)} + (-0/155) \\ &R=0/427 \text{ فشار (0/041) بارش} + (-1/051) \text{ سرعت باد (میانگین)} + (-0/750) \\ &R=0/346 \text{ سرعت باد (حداکثر)} + (-0/887) \text{ (Stepwise): مقدار ذرات معلق} \end{aligned}$$

دلایل تشدید پدیده گرد و غبار در اهواز، افزایش تعداد روزهای گرد و غباری در کشور عراق و خشک شدن زمین‌های باتلاقی موجود بین دجله و فرات است. که از جمله دلایل اصلی آن، بهره‌برداری کشور سوریه و به خصوص ترکیه از سدهای احداث شده بر روی رودخانه‌های دجله و فرات بوده است (Sahsavani et al., 2012). در تحقیق دیگری که در شهر تهران صورت گرفت مشخص شد، عامل افزایش خشکی هوا در تابستان به افزایش غلظت PM در این فصل کمک می‌کند (Shareipoor, 2009). همچنین در مطالعه‌ای که در شهر کرمانشاه انجام شد، مشخص شد، بالاترین غلظت PM مربوط به فصول تابستان (به ویژه ماه‌های تیر و مرداد) و بهار (به ویژه ماه خرداد) است (Nazari et al., 2013). نتایج مدل درون‌یابی نشان داد، در مدل سالانه بیشترین غلظت در مناطق ۷، ۱۰، ۲۰ و ۲۱ و کمترین غلظت در مناطق ۱، ۲، ۴، ۵، ۸ و ۱۳ بوده است. در تحقیقی مشابه که در سال ۹۱ در شهر تهران انجام شد مشخص شد بیشترین تراکم غلظت آلاینده PM_{2.5} در مناطق ۶، ۷، ۱۱ و ۱۲ بوده است (Nourpoor & feyz, 2014). در تحقیق فوق برای بررسی اثر فاکتورهای هواشناسی بر غلظت PM_{2.5} از همبستگی پیرسن و معادلات رگرسیون خطی استفاده شد. همبستگی پیرسن بین PM_{2.5} و پارامترهای هواشناسی نشان داد، ذرات گرد و غبار با فشار و نقطه شبنم همبستگی مستقیم دارد در حالی که با بارش و سرعت باد همبستگی معکوس دارد. همچنین سرعت باد، فشار و رطوبت نسبی حداکثر سطح معنی‌داری را با PM_{2.5} دارند در صورتی که نقطه شبنم و دما معنی‌دار نمی‌باشند. نتایج تحقیق‌های مشابه نیز بر اثبات این موضوع تاکید می‌کنند. برای مثال تحقیقی که در شهر مالزی صورت گرفت نشان داد PM با دما همبستگی مستقیم اما با رطوبت نسبی همبستگی

متغیرهای مستقل بر روی متغیر وابسته را نشان می‌دهد. برای مثال در هر دو جدول (۳) شاهد آن هستیم که پارامترهای دما (حداکثر، حداقل و میانگین) و رطوبت نسبی (میانگین) در مقایسه با سایر پارامترها اثر بیشتری بر روی PM_{2.5} دارند. مقدار احتمال در جدول (۳) نشان‌دهنده میزان ارتباط بین PM_{2.5} و پارامترهای

در پایان برای بررسی بیشتر در جهت این که کدام مدل برای پیش‌بینی ذرات معلق بهتر است، از تست میانگین مربعات خطی^(۱۰) استفاده شد، که یک معیار خطای بسیار پرکاربرد برای اندازه‌گیری دقت است که در زمان پیوسته به صورت زیر تعریف شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_{obs} - O_{pre})^2}{n}}$$

O_{obs}: مقادیر مشاهده شده O_{pre}: مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل

بر اساس معادله فوق، مقدار RMSE به دست آمده از مدل Enter، (۳۴) و Stepwise، (۲۸) می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت مدل Stepwise، برای پیش‌بینی ذرات معلق بهتر بوده است.

بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس استاندارد ملی کیفیت هوای محیط (NAAQS)، استاندارد اولیه و ثانویه سالانه ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکروگرم بر متر مکعب (PM_{2.5})، ۱۲ و ۱۵ میکروگرم بر متر مکعب می‌باشد، بر این اساس، در تحقیق حاضر غلظت ماهانه PM_{2.5} در تمام ماه‌های مورد مطالعه بیشتر از حد مجاز بوده است. همچنین غلظت روزانه نشان می‌دهد در ۱۸ خرداد میزان غلظت PM_{2.5} بیش از ۵ برابر استاندارد تعریف شده بوده است. در تابستان به دلیل کاهش بارش‌ها، خشکی هوا، تبخیر زیاد شاهد افزایش غلظت ذرات معلق هستیم. در تحقیقی که در شهر اهواز بر روی ذرات گرد و غبار انجام شد نشان داد بیشترین تعداد روزهای گرد و غباری در ماه‌های تیر و خرداد اتفاق می‌افتد.

در فصل‌های گرم سال، ایجاد کرده باشند. با توجه به بالاتر بودن غلظت $PM_{2.5}$ در ایستگاه‌های مختلف سنجش آلودگی هوای کلان شهر تهران، باید به این مساله که خطرات بهداشتی و تاثیر 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 کلان شهر تهران کاست.

یادداشت‌ها

1. Inverse distance weighted
2. Interpolation
3. Pearson correlation
4. Linear regression
5. Multiple regression
6. Enter
7. Stepwise
8. NAAQS
9. Analysis of variance
10. RMSE

منفی دارد (Dominick et al., 2012). در تحقیق دیگری که در شهر سنج‌ج صورت گرفت مشخص شد ذرات معلق با دمای حداکثر و سرعت باد همبستگی مثبت دارد در حالی که با بارش و رطوبت نسبی همبستگی منفی دارد (Ahmadi et al., 2015). در قدم بعدی به منظور بررسی ارتباط بین $PM_{2.5}$ و پارامترهای جوی از معادلات رگرسیون خطی استفاده شد. بر اساس نتایج به دست آمده از معادله‌های Enter و Stepwise، مشخص شد که بارش و سرعت باد (میانگین)، تاثیر معکوس بر روی میزان غلظت $PM_{2.5}$ دارند. به طوری که افزایش بارش سبب کاهش غلظت $PM_{2.5}$ می‌شود. در حالی که با افزایش دما و سرعت باد (حداکثر) میزان غلظت ذرات معلق بیشتر می‌شود. همچنین میزان ضریب تشخیص در هر دو روش حدود ۰/۱۵ به دست آمد که نشان می‌دهد پارامترهای جوی مورد استفاده در این تحقیق، ۱۵ درصد کل تغییرات کمیت پاسخ یعنی $PM_{2.5}$ را شامل می‌شوند. با توجه به نتایج فوق می‌توان گفت که شرایط هواشناسی نامطلوب ممکن است به افزایش غلظت $PM_{2.5}$ منجر شود. بنابراین، ممکن است که کمبود بارندگی و رطوبت هوا و الگوهای فصلی باد شرایط آلودگی $PM_{2.5}$ را در تهران، به ویژه

فهرست منابع

- Afraz, R. 2011. Evaluation of Soil Pollution in Land Landscape: A Case Study of Nahavand County. Master's thesis on the environment. Environmental group, Department of natural resources, Isfahan University of Technology. 72 p (in persian).
- Ahmadi, H.; Ahmadi, T.; Shahmoradi, B.; Mohammadi, S. & Kohzadi, S. 2015. The effect of climatic parameters on air pollution in Sanandaj, Iran. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 3(1): 49-61.
- Almasi, A.; Moradi, M.; Sharafi, K. & Abbasi, S. 2014. Seasonal Variation in Air Quality of Kermanshah City in Terms of PM_{10} Concentration over a Four-Year Period (2008-2011). *j.health*, 5 (2): 149-158 (in persian).
- Alvim-Ferraz, M. C. M.; Pereira, M. C.; Ferraz, J. M.; Almeida e Mello, A. M. C. & Martins, F. G. 2005. European directives for air quality: analysis of the new limits in comparison with asthmatic symptoms in children living in the Oporto Metropolitan area, Portugal. *Human and Ecological Risk Assessment*, 11(3): 607-616.
- Basu, R., Woodruff, T. J.; Parker, J. D.; Saulnier, L. & Schoendorf, K. C. 2004. Comparing exposure metrics in the relationship between $PM_{2.5}$ and birth weight in California. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 14(5): 391-396.
- Cunningham, W. P. C. & Ann, M. 2008. Principles of environmental science: inquiry & applications (No. GE105. C865 2008).
- Degobbi, C.; Lopes, F. D.; Carvalho-Oliveira, R.; Muñoz, J. E. & Saldiva, P. H. 2011. Correlation of fungi and endotoxin with $PM_{2.5}$ and meteorological parameters in atmosphere of Sao Paulo, Brazil. *Atmospheric environment*, 45(13): 2277-2283.

- Dominick, D.; Latif, M. T.; Juahir, H.; Aris, A. Z. & Zain, S. M. 2012. An assessment of influence of meteorological factors on PM 10 and NO 2 at selected stations in Malaysia. *Sustainable Environment Research*, 22 (5): 305-315.
- Giri, D.; Murthy, V. K. & Adhikary, P. R. 2007. The influence of meteorological conditions on PM10 concentrations in Kathmandu Valley. *Int. J. Environ. Res*, 2 (1): 49-60
- Habashi, H.; Hoseini, S.; Shetaei, H. & Mohammadi, J. 2006. Evaluation of the accuracy and accuracy of in-line methods for estimating the total nitrogen content using GIS. *Third Space Information System Conference*, pp. 71-76 (in persian).
- Javanbakht Amiri, S. & Khatami, H. 2012. Investigation of the relationship between pollutants of air quality index and meteorological parameters in Tehran with regression analysis method in 2005. *Journal of Human and Environment*, 10 (1):15-28 (in persian).
- Mansouri, N.; Vaezi, M.; Darvish, N.; Ghanadi, A. & Tabatabaei, R. 2011. Statistical analysis of the distribution of CO and PM10 pollutants with wind speed changes in a five-year period in Tehran. *Natural Environment Journal*. 64 (4):443-455 (in persian).
- McKendry, I. G. 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): 443-452.
- Miri, M.; Ghaneian, M. T.; Gholizadeh, A.; Yazdani Avval, M. & Nikoonahad, A. 2016. Assessment of Spatial Analysis Methods in Mapping of Air Pollution in Mashhad. *jehe*. 3 (2):143-154 (in persian).
- 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).
- 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).
- 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).
- Sahsavani, A.; Yarahmadi, M.; Mesdaghinia, A.; Younesyan, M.; Jaafarzadeh, N. A.; Naemabadi, A. & Nadafi, K. 2012. Analysis of dust storms entering Iran with emphasis on Khuzestan Province. *Hakim Research*. 3:192-202.
- Shareipoor, Z. & Akbari Bidokhti, A. 2014. The study of spatial distribution of air pollutants in Tehran during the cold months of 2011-2013. *Environmental science and technology*. 16 (1):149-166 (in persian).
- Shareipoor, Z. 2009. Study seasonal and daily changes of air pollutants and their relation with meteorological parameters. *Journal of Earth and Space Physics*. 35 (2):119-137 (in persian).
- Sousa, S. I. V.; Martins, F. G.; Pereira, M. C.; Alvim-Ferraz, M. C. M.; Ribeiro, H.; Oliveira, M. & Abreu, I. 2008. Influence of atmospheric ozone, PM 10 and meteorological factors on the concentration of airborne pollen and fungal spores. *Atmospheric Environment*, 42(32): 7452-7464.

Tecer, L. H.; Süren, P.; Alagha, O.; Karaca, F. & Tuncel, G. 2008. 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.

Zhang, A.; Qi, Q.; Jiang, L.; Zhou, F. & Wang, J. 2013. Population exposure to PM 2.5 in the urban area of Beijing. *PloS one*, 8(5): e63486.