

تغییرات فصلی و مکانی ذرات $PM_{2.5}$ ، PM_{10} و TSP در حومه شهر اصفهان و ارتباط آن با پارامترهای هواشناسی

- ❖ سادات فیض نیا*؛ استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
- ❖ ربانه روغنی؛ دانشجوی دکتری بیابانزدایی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
- ❖ سعید سلطانی؛ استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

چکیده

ذرات گردوغبار به دلیل دستیابی به سیستم تنفس انسان تأثیرات مخربی بر سلامت انسان به ویژه در مناطق شهری و صنعتی دارند. بنابراین پیش ذرات گردوغبار و بررسی روند مکانی و فصلی آن اهمیت ویژه‌ای دارد. هدف از انجام این تحقیق بررسی تغییرات فصلی و مکانی غلظت ذرات گردوغبار به تفکیک در اندازه‌های $PM_{2.5}$ ، PM_{10} و TSP در حومه شهر اصفهان و ارتباط آن با پارامترهای هواشناسی می‌باشد. برای این منظور به کمک دستگاه نمونه‌بردار هوا از نوع مکش پایین و روش وزنی غلظت ذرات $PM_{2.5}$ ، PM_{10} و TSP در طی دوره یک ساله (تیر ۱۳۹۴-۱۳۹۵) در سه ایستگاه واقع در شرق، جنوب و غرب شهر اصفهان اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج به دست آمده، در شرق، جنوب و غرب شهر اصفهان به ترتیب میانگین غلظت ذرات $PM_{2.5}$ ۷۳، ۵۰ و ۲۳؛ PM_{10} ۱۰۱، ۸۶ و ۴۵؛ TSP ۱۳۴، ۱۰۳ و ۵۳ میکروگرم بر مترمکعب بود. میزان غلظت ذرات $PM_{2.5}$ در تمام ایستگاه‌ها اغلب بیش از حد استاندارد تعیین شده توسط آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده (US EPA) گزارش شد. همچنین بررسی‌ها نشان داد رطوبت نسبی و دما به ترتیب همبستگی منفی و مثبتی با غلظت ذرات گردوغبار در منطقه داشتند. با این حال میان سرعت باد و غلظت ذرات گردوغبار ارتباط ضعیفی مشاهده شد. به طور کلی ذرات $PM_{2.5}$ نسبت به سایر ذرات درشت‌تر همبستگی قوی‌تری با عوامل اقلیمی داشتند. به کمک روش گلباد آلودگی مشخص شد که بادهای غربی و شمال غربی نقش ویژه‌ای در افزایش غلظت ذرات $PM_{2.5}$ داشتند. نتایج این تحقیق می‌تواند برای مدیران و تصمیم‌گیران در حوزه عملیات مقابله با گردوغبار به ویژه در عملیات درختکاری و پوشش سبز مفید واقع گردد.

کلید واژگان: ذرات گردوغبار، هواشناسی، تغییرات زمانی، تغییرات مکانی

۱. مقدمه

آلودگی هوا امروزه به عنوان تهدیدی جدی بر سلامت انسان به شمار می‌آید. ذرات گردوغبار از مهمترین آلاینده‌هایی است که به دلیل دستیابی به سیستم تنفس انسان تأثیرات مخربی بر سلامت انسان به‌ویژه در مناطق شهری و صنعتی دارند [۱، ۳]. این ذرات به روش‌های مختلف از جمله بر اساس اندازه، شکل، مکانیسم شکل‌گیری و نوع ترکیبات طبقه‌بندی می‌شوند، با این حال رایج‌ترین طبقه‌بندی بر اساس اندازه قطر ذرات است [۴]. کل ذرات معلق (Particle, TSP Total Suspended) به ذراتی با قطر کمتر از ۵۰ میکرون گفته‌شود که در مدت زمان معینی به صورت معلق در هوا باقی می‌مانند. ذرات ریزتر مانند PM_{10} و $PM_{2.5}$ نیز به ترتیب ذراتی با قطر کمتر از ۱۰ و ۲/۵ میکرون می‌باشند [۵]. ذرات ریزتر به علت نفوذ بیشتر به سیستم دستگاه تنفسی انسان از لحاظ خطر سلامت اهمیت بیشتری دارند [۶]. مطالعات نشان دادند افزایش غلظت ذرات PM_{10} و $PM_{2.5}$ باعث افزایش بیماری‌های تنفسی و قلبی و در نتیجه مرگ‌ومیر بیشتر شده است [۷، ۹]. فعالیت‌های انسانی از قبیل کشاورزی، صنایع و معادن، حمل و نقل و غیره سبب تشدید غلظت ذرات گردوغبار می‌شود.

منابع متعدد، شرایط آب‌وهوایی و توپوگرافی می‌توانند تأثیر زیادی بر تغییرات زمانی و مکانی غلظت ذرات گردوغبار داشته باشد [۱۰]. مطالعات گذشته نشان دادند شرایط آب و هوایی می‌تواند به میزان قابل توجهی در انتشار، رقیق‌سازی و تجمع مواد آلاینده نقش داشته باشند [۱۱، ۱۲] و حداقل ۱۶٪ میزان غلظت ذرات گردوغبار $PM_{2.5}$ را کاهش دهد [۱۳]. در مناطق خشک و نیمه‌خشک پارامترهای هواشناسی سرعت باد و رطوبت نسبی اغلب همبستگی معنی‌داری با غلظت ذرات گردوغبار دارند، به طوری که در مدل‌های پیش‌بینی طوفان گردوغبار این دو پارامتر به عنوان مؤلفه‌های اصلی به شمار می‌آیند [۱۴، ۱۵]. نقش پارامترهای اقلیمی در میزان آلودگی هر منطقه می‌تواند متفاوت باشد. برای مثال طبق مطالعات انجام شده

افزایش سرعت باد در مناطقی در ایران و یا ترکیه با افزایش فرسایش بادی و در نتیجه افزایش غلظت ذرات گردوغبار همراه بوده است [۱۶]. با این حال در مناطقی دیگر واقع در پاکستان و یا چین افزایش سرعت باد باعث رقیق‌سازی آلاینده و در نتیجه کاهش غلظت ذرات گردوغبار و آلودگی هوا شده است [۱۷، ۱۸]. همبستگی میان پارامترهای اقلیمی و ذرات گردوغبار $PM_{2.5}$ دارای حد آستانه است، بدین معنی که بسته به میزان پارامتر اقلیمی همبستگی می‌تواند مثبت و یا منفی باشد [۱۹].

شهر اصفهان یکی از شهرهای پرجمعیت ایران است که با دارا بودن صنایع و معادن مهم کشور از جمله کلان شهرهای صنعتی ایران به شمار می‌آید. صنایع شهری، منابع خانگی و ترافیک را به عنوان مهم‌ترین منابع آلاینده هوای شهر اصفهان معرفی شده است [۲۰]. همچنین وضعیت ژئومرفولوژی خاص شهر اصفهان و قرارگیری در گودال سبب تجمع بیشتر مواد آلاینده در هوای سطحی و افزایش میزان غلظت بیشتر ذرات گردوغبار به‌ویژه در سال‌های اخیر شده است. افزایش بیماری‌های تنفسی و عروقی در شهر اصفهان در سال ۱۳۹۲ را به دلیل افزایش غلظت PM_{10} عنوان شده است [۲۱]. هزینه سالانه مرگ و میر ناشی از آلودگی هوا در شهر اصفهان ۳۴۶ میلیارد ریال برآورد شده است [۲۲].

در مطالعات اخیر به بررسی میزان گردوغبار رسوبی و تغییرات زمانی و مکانی آن در شهر اصفهان و حومه پرداخته‌اند. با مطالعه تغییرات مکانی و فصلی نرخ فرورنشست گردوغبار رسوبی در حومه شهر اصفهان مشخص شد که نرخ فرورنشست گردوغبار رسوبی در منطقه طی فصل تابستان به دلیل کاهش بارندگی نسبت به زمان‌های دیگر سال بیشتر بوده است [۲۳]. همبستگی نرخ فرورنشست گردوغبار رسوبی با پارامترهای باد، دما، بارش و رطوبت نسبی را به عنوان عامل تغییرات زمانی نرخ فرورنشست گردوغبار در منطقه بیان نموده‌اند [۲۳]. با این حال تغییرات مکانی و زمانی ذرات گردوغبار در اندازه‌های ریزتر و مشخص‌تر $PM_{2.5}$ ، PM_{10} و TSP در منطقه هنوز به طور کامل شناخته نشده است.

مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

۲.۲. نمونه برداری

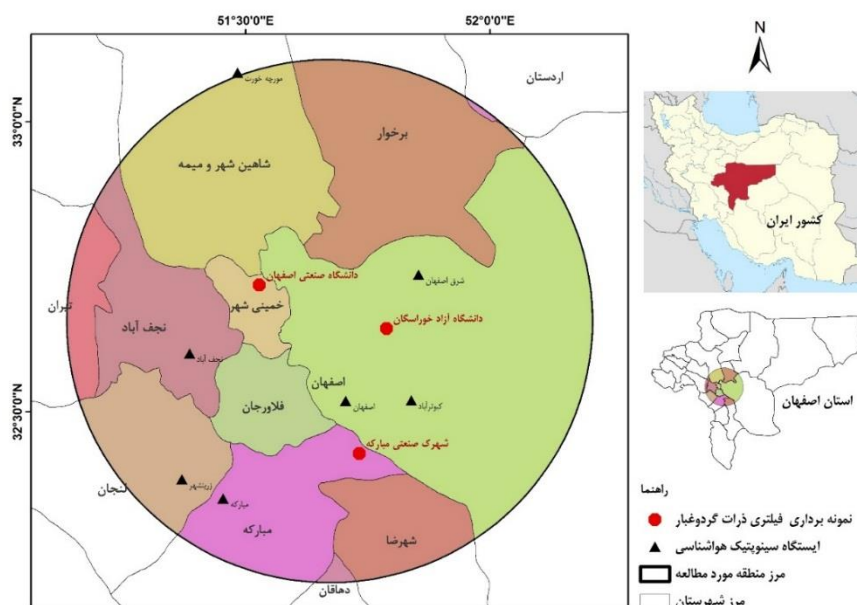
نمونه برداری در حومه شهر اصفهان در سه ایستگاه (الف) دانشگاه صنعتی اصفهان (ب) دانشگاه آزاد اسلامی خوراسگان و (ج) شهرک صنعتی مبارکه به ترتیب واقع در غرب، شرق و جنوب حومه شهر اصفهان انجام شد (شکل ۱). موقعیت این ایستگاه‌ها ضمن در نظر گرفتن امکانات موجود، جهت باد غالب، ژئومرفولوژی و وضعیت منابع آلاینده از جمله صنایع و معادن انتخاب گردید. نمونه برداری گردوغبار در هر ایستگاه توسط یک دستگاه نمونه برداری گردوغبار MicroPNS از نوع مکش پایین LV₁ (۲/۳ مترمکعب بر ساعت) ساخت کشور آلمان انجام شد (شکل ۲). دستگاه‌ها بر روی پشت‌بام ساختمان دو طبقه نصب گردید. این دستگاه‌ها قابلیت نمونه برداری از ذرات TSP، PM₁₀ و PM_{2.5} به ترتیب مجموع ذرات معلق در هوا، ذرات معلق در هوا با قطر کمتر از ۱۰ میکرون و ذرات معلق در هوا با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون را دارند. نمونه برداری ذرات گردوغبار به این روش در طول دوره یک‌ساله تیرماه ۱۳۹۴، تیرماه ۱۳۹۵ به مدت ۲۴ ساعته مداوم و در فواصل زمانی تقریباً شش روزه انجام شد.

هدف از انجام این تحقیق بررسی تغییرات فصلی و مکانی ذرات گردوغبار به تفکیک در اندازه‌های PM_{2.5}، PM₁₀ و TSP در حومه شهر اصفهان می‌باشد. همچنین ارتباط پارامترهای هواشناسی رطوبت نسبی، سرعت و جهت باد غالب، دما و حداقل دید افقی با میزان غلظت این ذرات گردوغبار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق منجر به دید جامع‌تری نسبت به پدیده گردوغبار و تغییرات آن در حومه شهر اصفهان خواهد شد. مدیران و تصمیم‌گیران حوزه مقابله با پدیده گردوغبار با در نظر گرفتن نتایج این مطالعه می‌تواند سیاست‌های مؤثرتری در رابطه با کاهش آلودگی در شهر اصفهان اتخاذ نمایند.

۲. روش شناسی

۲.۱. معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه دایره‌ای به شعاع ۵۰ کیلومتری از مرکز شهر اصفهان می‌باشد. این منطقه به وسعت ۷۸۵۰۰۰ هکتار در محدوده ۱۲ شهرستان استان اصفهان واقع شده و از لحاظ حفظ سلامت جمعیت انسانی ساکن در آن اهمیت ویژه‌ای دارد. شکل (۱) موقعیت منطقه



شکل ۱. موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه برداری

جمع‌آوری گردید که به ترتیب شامل ۸۶، ۷۹ و ۷۷ نمونه ذرات TSP، PM₁₀ و PM_{2.5} می‌باشد. لازم به ذکر است موارد پیش‌بینی نشده‌ای همچون قطعی برق، سرویس و تعمیر دستگاه‌ها سبب از دست دادن تعداد اندکی از فیلترهای نمونه‌گیری در طول مطالعه شد.



(ب)



(الف)

شکل ۲. (الف) دستگاه نمونه‌بردار گردوغبار MicroPNS و (ب) نمونه فیلتر خالی و نمونه‌برداری شده

با توجه به اینکه دستگاه‌های نمونه‌برداری گردوغبار تنها توانایی نمونه‌برداری از یک دامنه از اندازه ذرات (نوع نمونه‌گیر) در هر برداشت را دارند، در هر برداشت از نمونه‌گیر مشابه (TSP یا PM₁₀ یا PM_{2.5}) در تمام سه ایستگاه استفاده شد و به طور متوالی نمونه‌گیرها هر شش روز یک‌بار تعویض گردید. در کل تعداد ۲۴۲ فیلتر

گردوغبار بر حسب میکروگرم بر مترمکعب می‌باشد.

۲.۳. بررسی ارتباط غلظت ذرات گردوغبار با

عوامل اقلیمی

بر اساس نزدیکترین فاصله و ژئومرفولوژی منطقه، ارتباط داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های هواشناسی شرق اصفهان، مبارکه و نجف‌آباد بترتیب با داده‌های همزمان ذرات گردوغبار جمع‌آوری شده در ایستگاه‌های دانشگاه خوراسگان (شرق)، شهرک صنعتی مبارکه (جنوب) و دانشگاه صنعتی اصفهان (غرب) مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱). همبستگی میان غلظت ذرات PM_{2.5}، PM₁₀ و TSP با پارامترهای اقلیمی: رطوبت نسبی، دمای میانگین، حداقل دید افقی، سرعت میانگین باد به روش پیرسون مورد مطالعه قرار گرفت.

گلباد آلودگی (Pollution Rose) جهت بررسی تأثیر جهت باد غالب بر غلظت ذرات PM_{2.5}، PM₁₀ و TSP ترسیم

جهت جمع‌آوری ذرات گردوغبار با دستگاه‌ها از فیلترهای میکرو فایبرگلاس مارک MINIPORE ساخت کشور هند با قطر ۴۷ میلی‌متر و اندازه منافذ ۱/۶ میکرون استفاده شد. در شکل ۲.ب فیلتر خالی و نمونه‌بردار شده نشان داده شده است. میزان غلظت ذرات گردوغبار به روش وزنی انجام گرفت. در این روش فیلترهای قبل و بعد از نمونه‌برداری با استفاده از ترازوی دقیق توزین می‌گردد. لازم به ذکر است جهت به حداقل رساندن اثر عوامل محیطی بر میزان وزن فیلترها، قبل از هر توزین فیلترها به مدت ۴۸ ساعت در دمای و رطوبت ثابت اتاق نگهداری می‌شود. غلظت گردوغبار مطابق با معادله (۱) محاسبه گردید:

$$C_{\mu gr} = \frac{(B-A)\mu gr}{V m^3} \quad \text{معادله (۱)}$$

در این معادله، A وزن فیلتر خالی (میکروگرم)؛ B وزن فیلتر مملو از ذرات گردوغبار (میکروگرم)؛ V حجم هوای وارد شده به فیلتر در مدت هر نمونه‌برداری و C غلظت

TSP در ایستگاه‌های مختلف طی دوره یکساله (تیر ۱۳۹۴ الی تیر ۱۳۹۵) نشان داده شده است. به طور کلی اولویت مناطق از لحاظ میزان بالای غلظت ذرات $PM_{2.5}$ ، $PM_{2.5}$ و TSP به ترتیب در ایستگاه‌های شرق، جنوب و غرب شهر اصفهان بوده است. در این نمودارها خط افقی بیانگر غلظت ذرات استاندارد تعریف شده توسط آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده (US EPA) می‌باشد. با توجه به این موضوع در منطقه مورد مطالعه غلظت ذرات $PM_{2.5}$ در اغلب موارد بیش از حد استاندارد ثبت شده است.

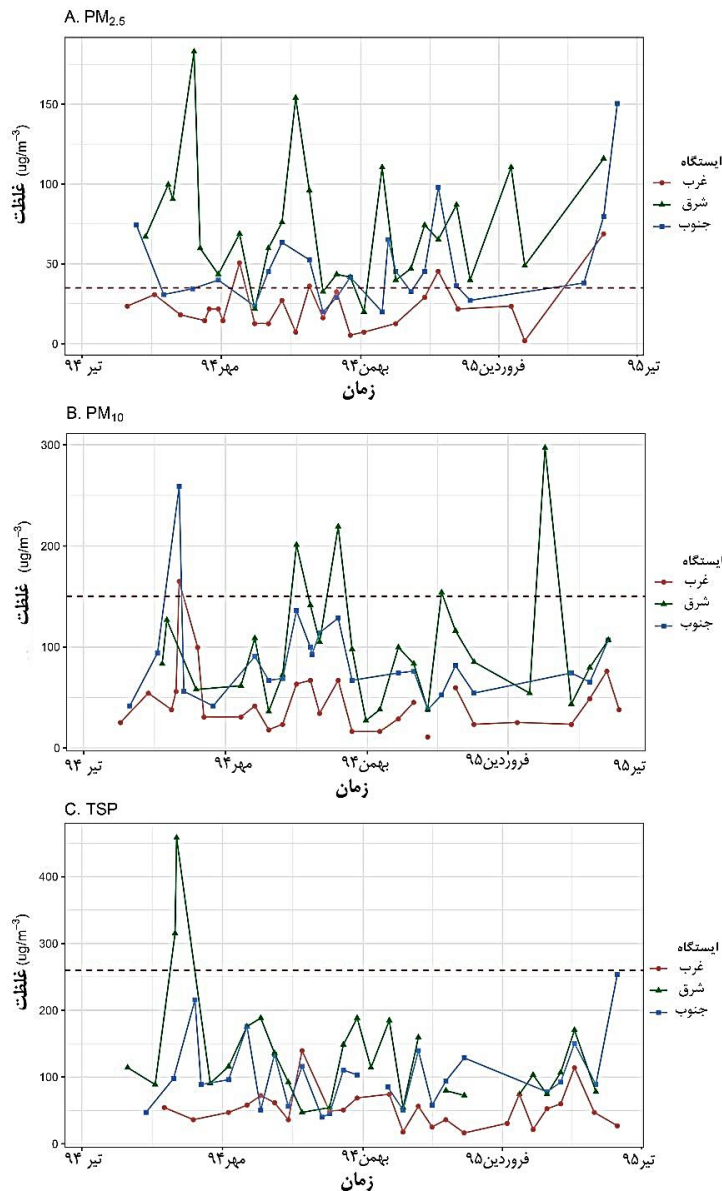
گردید. به منظور ترسیم گلباد آلودگی از داده‌های جهت باد غالب و غلظت ذرات گردوغبار ($PM_{2.5}$ یا PM_{10} یا TSP) و نرم‌افزار R و بسته Openair Package استفاده شد [۲۴].

۳. نتایج

۳.۱. بررسی ارتباط غلظت ذرات گردوغبار با

عوامل اقلیمی

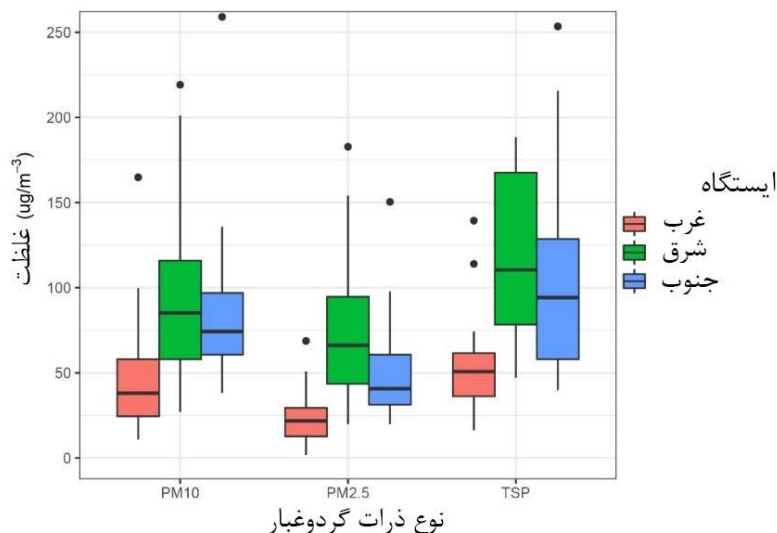
در شکل (۳) تغییرات زمانی غلظت ذرات PM_{10} ، $PM_{2.5}$ و



شکل ۳. سری زمانی غلظت ذرات PM_{10} ، $PM_{2.5}$ و TSP در ایستگاه‌های مختلف (تیر ۱۳۹۴ الی تیر ۱۳۹۵)

(غرب) به ترتیب میانگین غلظت ذرات $PM_{2.5}$ ۷۳/۰، ۴۹/۷ و ۲۳/۲؛ PM_{10} ۱۰۱/۴، ۸۶/۱ و ۴۵/۵؛ TSP ۱۳۴/۱، ۱۰۳/۸ و ۵۳/۱ میکروگرم بر مترمکعب بوده است.

مشخصات آماری غلظت ذرات $PM_{2.5}$ ، PM_{10} و TSP در ایستگاه‌های مختلف در نمودار جعبه‌ای شکل (۴) خلاصه شده است. در ایستگاه دانشگاه خوراسگان (شرق)، شهرک صنعتی مبارکه (جنوب) و دانشگاه صنعتی اصفهان



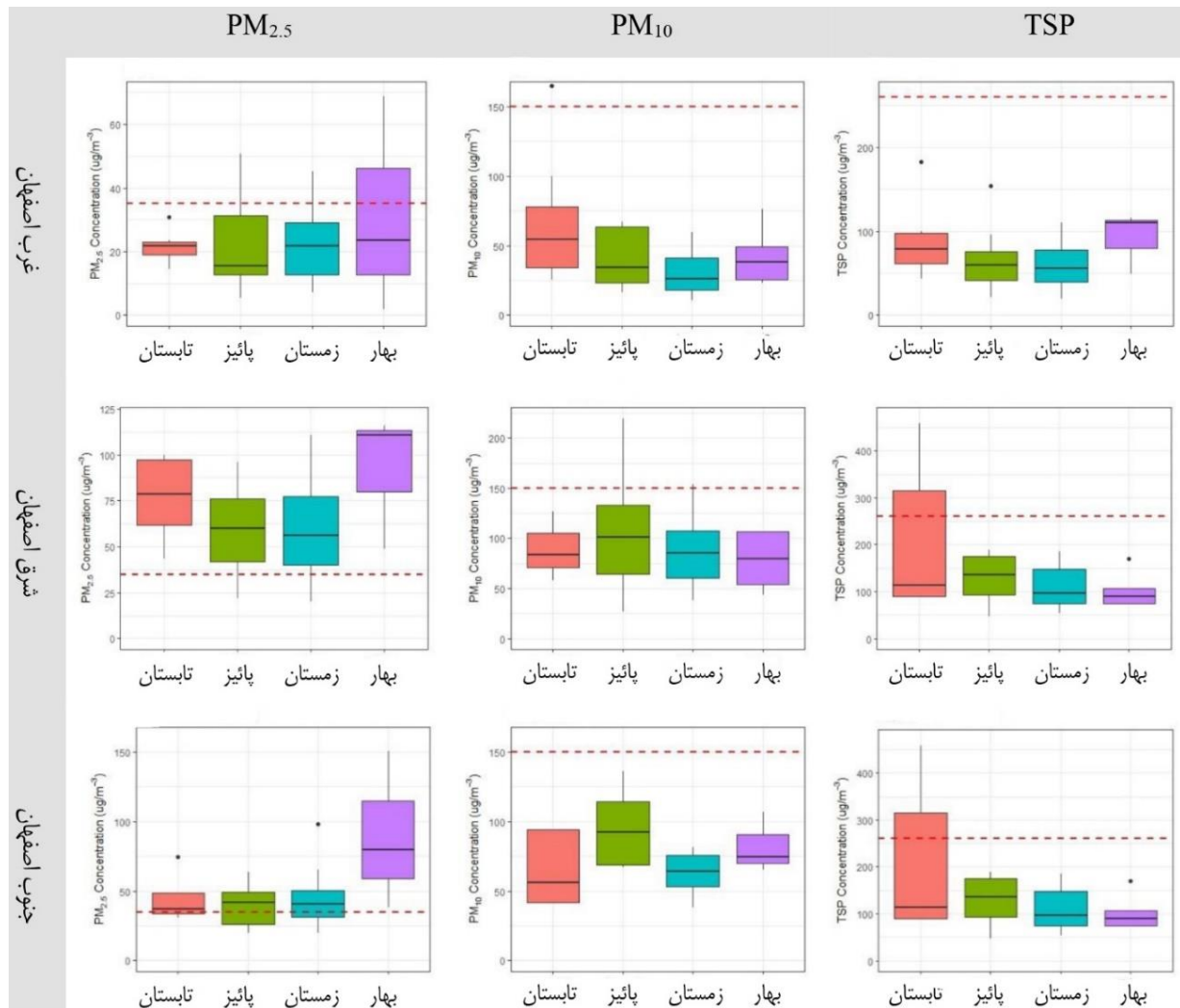
شکل ۴. نمودارهای جعبه‌ای غلظت ذرات $PM_{2.5}$ ، PM_{10} و TSP در ایستگاه‌های مختلف (تیر ۱۳۹۴ الی تیر ۱۳۹۴) نقاط مشکی در نمودار نشان دهنده داده‌های پرت می‌باشند.

اصفهان) روند کاهشی مشاهده شده است. این موضوع احتمالاً به تغییر جهت باد غالب و یا میزان و فعالیت‌های انسانی اعم از کشاورزی و صنعتی در منطقه به‌ویژه در فصل پاییز در شرق منطقه اشاره داشته باشد.

۳.۲. گلباد آلودگی

گلباد آلودگی ایستگاه دانشگاه خوراسگان در شکل ۶ الف ارائه داده شده است. در مورد هر سه نوع ذرات $PM_{2.5}$ ، PM_{10} و TSP غلظت بالای زمانی رخ داده است که وزش باد غالب از سمت غرب و شمال غربی بوده است. در نتیجه به نظر می‌رسد منابع آلودگی این ذرات بیشتر در سمت غربی و شمال غربی این منطقه قرار گرفته باشد. البته نواحی شرقی نیز احتمالاً منبع تولید کننده ذرات $PM_{2.5}$ بوده است، زیرا وزش باد غالب شرقی نیز اغلب با غلظت نسبتاً بالایی $PM_{2.5}$ همراه بوده است.

تغییرات طی فصول مختلف در شکل (۵) نشان داده شده است. غلظت ذرات $PM_{2.5}$ به طور قابل توجهی در فصل بهار در تمام ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه افزایش یافته است. این افزایش احتمالاً با وقوع طوفان‌های گردوغبار در منطقه طی این فصل ارتباط دارد. همچنین با توجه به اینکه در مورد سایر اندازه ذرات افزایش غلظت قابل توجهی در فصل بهار مشاهده نشد، به نظر می‌رسد طوفان‌ها حاوی ذرات ریزتر بودند. وضعیت کیفی هوا در شرق منطقه مورد مطالعه (ایستگاه دانشگاه خوراسگان) در فصل تابستان بسیار ضعیف‌تر از سایر فصول دیگر بوده است، زیرا غلظت تمام اندازه ذرات در این ایستگاه هنگام فصل تابستان نسبت به سایر فصول بیشتر بوده است. در فاصله زمانی فصول تابستان تا پاییز، غلظت PM_{10} در ایستگاه‌های شرقی و جنوبی منطقه (دانشگاه آزاد خوراسگان و شهرک صنعتی مبارکه) افزایش یافته است، در حالی که در غرب منطقه (ایستگاه دانشگاه صنعتی



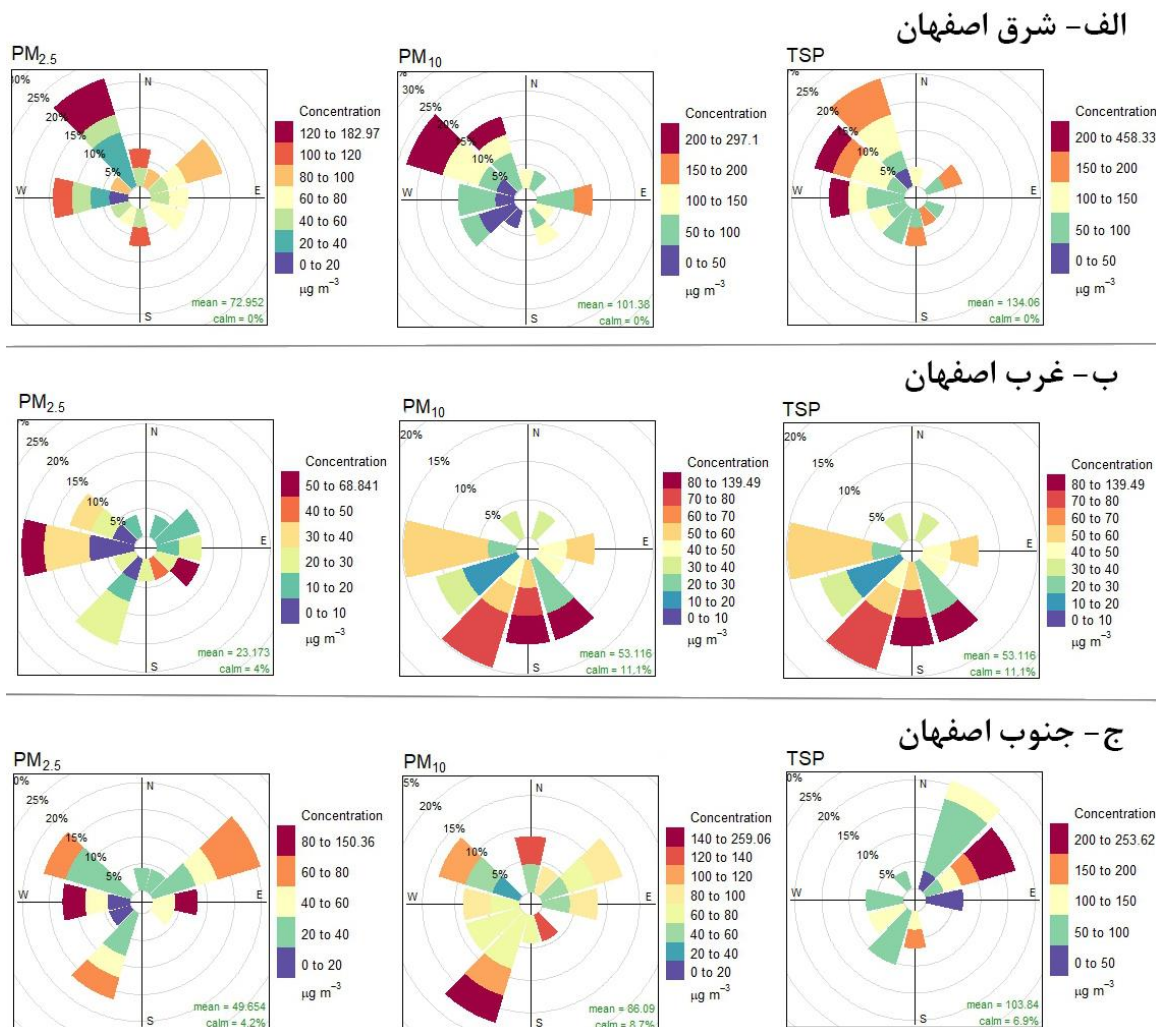
شکل ۵. نمودارهای جعبه‌ای تغییرات مکانی و فصلی ذرات $PM_{2.5}$ ، PM_{10} و TSP در سه ایستگاه مطالعاتی نقاط مشکلی در نمودارها نشان دهنده داده‌های پرت می‌باشند.

غلظت بالای ذرات TSP نیز اغلب در مواردی مشاهده شده است که وزش باد غالب از سمت جنوب بوده است. گلباد آلودگی شهرک صنعتی مبارکه در شکل ۶ ج ارائه داده شده است. در مورد غلظت ذرات $PM_{2.5}$ و باد غالب الگوی قابل توجهی مشاهده نشد. در نتیجه به نظر می‌رسد منابع تولید $PM_{2.5}$ در جهات مختلف در شهرک صنعتی مبارکه وجود دارند. با این حال در مورد ذرات PM_{10} وزش بادهای غالب از نواحی غربی تا جنوبی اغلب با افزایش غلظت این ذرات همراه بوده است. در نتیجه شاید اراضی شور و فرسایش یافته واقع در غرب و جنوب

گلباد آلودگی ایستگاه دانشگاه صنعتی اصفهان در شکل ۶ ب نشان داده شده است. غلظت بالای ذرات $PM_{2.5}$ عمدتاً با وزش باد از سمت غرب و شمال غربی و گاهی جنوب شرقی همراه بوده است. به طوری که غلظت بالای PM_{10} هنگام وزش باد غالب در تمام جهات به جز سمت شمال مشاهده شد. در نتیجه به نظر می‌رسد منابع تولید کننده PM_{10} در نواحی مختلف اطراف این منطقه پراکنده بوده است و وجود پوشش گیاهی جنگل مصنوعی در سمت شمال منطقه باعث کاهش وزش باد غالب و مانع ورود ذرات PM_{10} به این ناحیه از سمت شمال شده است.

بسیار بالای ذرات TSP نیز اغلب با وزش باد غالب از سمت شمال شرقی همزمان بوده است.

غرب منطقه (به عنوان مثال دشت مهیار) یکی از منابع آلاینده‌ی ذرات PM₁₀ در این منطقه به شمار آیند. غلظت



شکل ۶. گلبادهای آلودگی ذرات PM_{2.5}، PM₁₀ و TSP در ایستگاه‌های شرق، غرب و جنوب شهر اصفهان

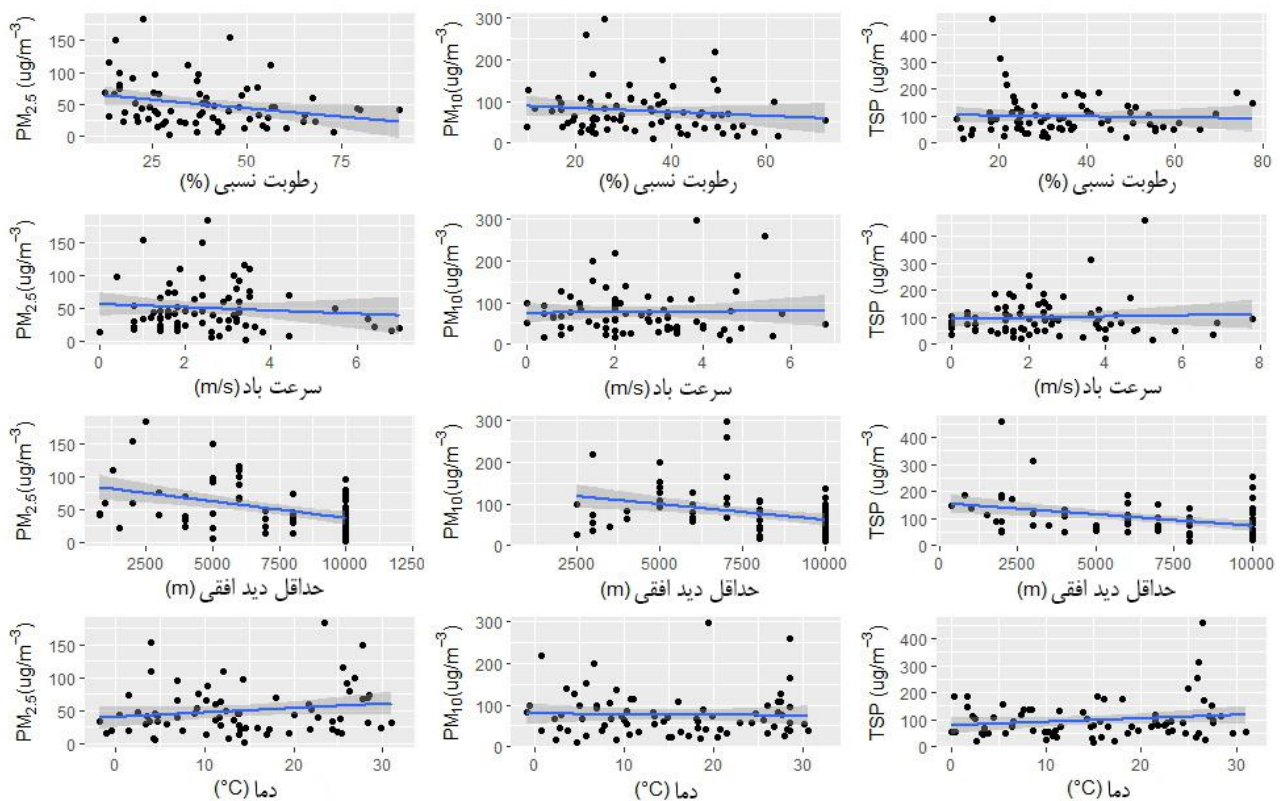
منفی و برای سایر اندازه‌ی ذرات مثبت محاسبه گردید. با توجه به ضریب همبستگی بالاتر PM_{2.5} نسبت به سایر اندازه‌ی ذرات می‌توان به این نتیجه دست یافت که در منطقه مورد مطالعه عوامل اقلیمی بیشتر بر روی غلظت ذرات ریزتر تأثیر گذار بوده است. برای مثال افزایش رطوبت نسبی باعث کاهش معنی‌دار غلظت ذرات PM_{2.5} شده است؛ ولی در مورد ذرات درشت‌تر (یعنی PM₁₀ و TSP) همبستگی معنی‌داری مشاهده نشد.

در شکل (۷) نمودارهای همبستگی میان غلظت ذرات گردوغبار (PM_{2.5}، PM₁₀ و TSP) و پارامترهای اقلیمی (رطوبت نسبی، سرعت متوسط باد، حداقل دید افقی و دما) نشان داده شده است. در میان پارامترهای اقلیمی، تنها حداقل دید افقی با غلظت تمام ذرات گردوغبار همبستگی معنی‌داری داشته است، به طوری که با کاهش حداقل دید افقی غلظت ذرات گردوغبار افزایش یافته است. میان سرعت باد با غلظت ذرات گردوغبار همبستگی ضعیفی مشاهده شد. به طوری که ضرایب همبستگی در مورد ذرات PM_{2.5}

جدول ۱. ضریب همبستگی پیرسون میان غلظت ذرات $PM_{2.5}$ ، PM_{10} و TSP پارامترهای اقلیمی (تیر ۱۳۹۴ الی تیر ۱۳۹۵)

	$PM_{2.5}$ ($\mu\text{gr}/\text{m}^3$)	PM_{10} ($\mu\text{gr}/\text{m}^3$)	TSP ($\mu\text{gr}/\text{m}^3$)
رطوبت نسبی (%)	-۰/۲۶*	-۰/۱۲	-۰/۰۴
سرعت باد غالب (m/s)	-۰/۱۰	۰/۰۲	۰/۰۶
حداقل دید افقی (m)	-۰/۴۲*	-۰/۳۵*	-۰/۳۹*
میانگین دما ($^{\circ}\text{C}$)	۰/۱۷	-۰/۰۳	۰/۱۶

* معنی داری در سطح ۹۵ درصد



شکل ۷. همبستگی غلظت ذرات $PM_{2.5}$ ، PM_{10} و TSP با پارامترهای اقلیمی در منطقه مورد مطالعه (جولای ۲۰۱۵-۲۰۱۶)

۱۳۹۱، شرق شهر اصفهان را به عنوان آلوده‌ترین ناحیه در این منطقه عنوان کردند [۲۳]. مطالعه حاضر نشان داد در منطقه مطالعاتی افزایش غلظت ذرات ریزتر از اهمیت بیشتری برخوردار بوده است، به طوری که میزان غلظت ذرات $PM_{2.5}$ در اکثر مواقع دوره نمونه‌برداری بیش از حد مجاز استاندارد گزارش شد. در حومه شهرهایی در اروپا ذرات $PM_{2.5}$ نسبت به سایر ذرات نقش ویژه‌ای در

۴. بحث و نتیجه‌گیری

بررسی غلظت ذرات گردوغبار $PM_{2.5}$ ، PM_{10} و TSP در منطقه مورد مطالعه نشان داد که غلظت این ذرات در شرق شهر اصفهان بسیار بیشتر از سایر مناطق دیگر در حومه شهر اصفهان بوده است. در تحقیقی نیز از طریق محاسبه نرخ فرونشست گردوغبار رسوبی در سال ۱۳۹۲-

TSP در ارتباط بوده است. در نتیجه به نظر می‌رسد اراضی فرسایش یافته دشت مهیار در جنوب غربی منطقه منبع قابل توجهی از ذرات PM_{10} به‌ویژه در جنوب در منطقه باشد و احتمالاً احیاء و بهبود وضعیت اراضی لخت و بایر شمال غربی منطقه (شهر بهارستان) می‌تواند در جهت کاهش غلظت ذرات TSP در منطقه مفید واقع شود.

بر اساس نتایج مطالعات گذشته، در منطقه مورد مطالعه در فصول گرم نسبت به فصول سرد آلودگی هوا بیشتر بوده است [۲۱، ۲۶، ۲۸]. با این حال در این تحقیق نشان داده شد این موضوع در مورد تمام اندازه ذرات صادق نبوده است. برای مثال حداکثر میزان PM_{10} در مناطق شرق و جنوب اصفهان در فصل پائیز مشاهده شد. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده، طوفان‌های بهاری اغلب با افزایش ذرات گردوغبار در اندازه ریز همراه بوده است. به طوری که میزان حداکثر غلظت ذرات $PM_{2.5}$ در فصل بهار ثبت گردید، ولی سایر ذرات PM_{10} و TSP در فصل بهار با وجود طوفان‌های بهاری افزایش قابل توجهی نداشتند.

غلظت تمام ذرات با پارامترهای اقلیمی رطوبت نسبی و حداقل دید افقی همبستگی منفی و با پارامتر متوسط دما همبستگی مثبت نشان دادند. به طور مشابه در مطالعات گذشته در شهر قم ایران و کشور چین نیز همبستگی منفی رطوبت نسبی و مثبت دما با غلظت ذرات گردوغبار (PM_{10} ، $PM_{2.5}$ و یا TSP) نشان داده شده است [۱۶، ۱۸]. همبستگی معنی‌دار میان حداقل دید افقی و غلظت ذرات گردوغبار مشخص نمود که این پارامترهواشناسی معرف خوبی برای تغییرات غلظت ذرات حتی در اندازه‌های ریز نیز می‌باشد. همبستگی ضعیف بین سرعت متوسط باد غلظت ذرات گردوغبار مشاهده شد. در مطالعات گذشته نیز به ارتباط ضعیف و نامشخص میان غلظت ذرات گردوغبار و سرعت باد در شهرهای در آمریکا و ژاپن شده است [۱۹، ۲۹]. ارتباط معکوس میان $PM_{2.5}$ و سرعت باد بیانگر وجود منبعی محلی برای این ذره است. زیرا در صورت وجود منبع محلی برای گردوغبار،

گردوغبار و آلودگی هوا داشته است [۲۵].

غلظت متوسط ذرات TSP در شرق، جنوب و غرب شهر اصفهان به ترتیب ۱۳۴/۱، ۱۰۳/۸ و ۵۳/۱ میکروگرم بر مترمکعب محاسبه شد. در تحقیق قبلی میزان متوسط غلظت TSP در سال ۲۰۰۳-۲۰۰۴ در شهر اصفهان را بسیار کمتر از مقدار محاسبه شده در تحقیق حاضر و برابر ۴۴/۶ میکروگرم بر مترمکعب گزارش کرده است [۲۶]. در نتیجه میزان غلظت ذرات TSP در سال‌های اخیر در منطقه مورد مطالعه رو به افزایش است. بیشترین و کمترین میزان غلظت ذرات TSP به ترتیب در فصل تابستان و بهار رخ داده است. در سال‌های گذشته در غرب منطقه بیشترین و کمترین میزان غلظت ذرات TSP را به ترتیب در پائیز و بهار بیان شده است [۲۳]. بنابراین به نظر می‌رسد عوامل جدیدی مانند فعالیت‌های انسانی و یا تغییرات اقلیمی باعث افزایش میزان غلظت TSP طی تابستان شده است.

در شرق، جنوب و غرب شهر اصفهان غلظت متوسط ذرات PM_{10} به ترتیب ۱۳۴/۱، ۱۰۳/۸ و ۵۳/۱ و ذرات $PM_{2.5}$ به ترتیب ۷۳/۰، ۴۹/۷ و ۲۳/۲ میکروگرم بر مترمکعب محاسبه شد. مطالعات گذشته در شهر اصفهان به میزان بالاتر غلظت متوسط ذرات $PM_{2.5}$ و PM_{10} اشاره داشته‌اند [۲۱، ۲۷]. در نتیجه به نظر می‌رسد فعالیت‌های انسانی از قبیل ترافیک و سوخت سبب افزایش ذرات $PM_{2.5}$ و PM_{10} در محیط‌های شهری می‌شود.

بررسی گلباد آلودگی به‌ویژه در شرق منطقه نشان داد غلظت بالای ذرات $PM_{2.5}$ اغلب با وزش باد غالب در غربی و شمال غربی همراه بوده است. وزش این بادهای در شرق منطقه علاوه بر افزایش غلظت ذرات $PM_{2.5}$ ، با غلظت بالای ذرات PM_{10} و TSP نیز همراه بوده است. از طرفی دیگر افزایش غلظت PM_{10} و TSP در غرب منطقه تنها با وزش بادهای جنوبی مشاهده شد. احتمالاً در غرب منطقه پوشش جنگل مصنوعی و توپوگرافی سبب کاهش وزش باد و انتقال ذرات گردوغبار از سمت شمال شده است. در جنوب منطقه مورد مطالعه وزش بادهای جنوب غربی و شمال شرقی به ترتیب با افزایش غلظت ذرات PM_{10} و

اهمیت ویژه‌ای دارد. همچنین بررسی‌ها نشان داد رطوبت نسبی و دما به ترتیب همبستگی مثبت و منفی با غلظت ذرات گردوغبار در منطقه داشتند. با این حال ارتباط میان سرعت باد و غلظت ذرات گردوغبار ضعیف و پیچیده بود. گلباد آلودگی روش مناسبی جهت بررسی ارتباط جهت باد و غلظت ذرات گردوغبار شناخته شد و به کمک این روش مشخص شد که بادهای غربی و شمال غربی در کل منطقه به ویژه در شرق، بادهای جنوبی در غرب منطقه و بادهای جنوب غربی و شمال غربی در جنوب منطقه با افزایش آلودگی هوا همراه بوده‌اند. این نتایج می‌تواند برای مدیران و تصمیم‌گیران در حوزه عملیات مقابله با گردوغبار از قبیل درختکاری و پوشش سبز مفید واقع گردد.

باد قوی سبب رقیق‌سازی آلودگی هوا در اتمسفر می‌شود، ولی سرعت پایین باد در منطقه امکان افزایش آلودگی هر چه بیشتر در محل را فراهم می‌نماید [۳۰]. ضرایب همبستگی بالاتر غلظت ذرات ریزتر $PM_{2.5}$ با پارامترهای اقلیمی نشان داد که این ذرات نسبت به سایر ذرات درشت‌تر بیشتر تحت تأثیر عوامل اقلیمی قرار دارند. به طور کلی در این تحقیق با محاسبه غلظت ذرات گردوغبار در حومه شهر اصفهان طی دوره یک ساله (تیر ۱۳۹۴-۱۳۹۵) مشخص شد که شرق و جنوب حومه شهر اصفهان در معرض خطر گردوغبار بیشتری نسبت به غرب منطقه قرار دارند. غلظت ذرات ریزتر در اندازه $PM_{2.5}$ در منطقه رو به افزایش است، و به دلیل خطر این ذرات بر سلامت انسان منشأیابی و راهکارهای کاهش غلظت ذرات

References

- [1] Y. Guo *et al.*, (2016). *The association between lung cancer incidence and ambient air pollution in China: A spatiotemporal analysis*. Environmental Research. 144 (A), 60-65.
- [2] Y.-F. Xing, Y.-H. Xu, M.-H. Shi, and Y.-X. Lian, (2016). *The impact of $PM_{2.5}$ on the human respiratory system*. Journal of thoracic disease. 8 (1), E69-E74.
- [3] K. Pantavou, S. Lykoudis, and B. Psiloglou, (2017). *Air quality perception of pedestrians in an urban outdoor Mediterranean environment: A field survey approach*. Science of The Total Environment. 574 (C), 663-670.
- [4] G. Cao and R. Orrù. (2014). *Current environmental issues and challenges*. 2014. Springer. Dordrecht.
- [5] N. J. Schleicher. (2012). *Chemical, Physical and Mineralogical Properties of Atmospheric Particulate Matter in the Megacity Beijing*. KIT Scientific Publishing.
- [6] J. Tao *et al.*, (2014). *$PM_{2.5}$ pollution in a megacity of southwest China: source apportionment and implication*. Atmos. Chem. Phys. 14 (16), 8679-8699.
- [7] F. Lu *et al.*, (2015). *Systematic review and meta-analysis of the adverse health effects of ambient $PM_{2.5}$ and PM_{10} pollution in the Chinese population*. Environmental Research. 136 (Supplement C), 196-204.
- [8] J. Wu, J. Zhu, W. Li, D. Xu, and J. Liu, (2017). *Estimation of the $PM_{2.5}$ health effects in China during 2000-2011*. Environmental Science and Pollution Research. 24 (11), 10695-10707.
- [9] F. Deng, X. Guo, H. Liu, X. Fang, M. Yang, and W. Chen, (2007). *Effects of dust storm $PM_{2.5}$ on cell proliferation and cell cycle in human lung fibroblasts*. Toxicology in Vitro. 21 (4), 632-638.
- [10] Y. S. Unal, H. Toros, A. Deniz, and S. Incecik, (2011). *Influence of meteorological factors and emission sources on spatial and temporal variations of PM_{10} concentrations in Istanbul metropolitan area*. Atmospheric Environment. 45 (31), 5504-5513.
- [11] M. Pohjola *et al.*, (2002). *The spatial and temporal variation of measured urban PM_{10} and $PM_{2.5}$ in the Helsinki metropolitan area*. Water, Air, & Soil Pollution: Focus. 2 (5), 189-201.

- [12] A. P. Tai, L. J. Mickley, and D. J. Jacob, (2010). *Correlations between fine particulate matter (PM 2.5) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of PM 2.5 to climate change*. Atmospheric Environment. 44 (32), 3976-3984.
- [13] L. Yang, Y. Wu, J. M. Davis, and J. Hao, (2011). *Estimating the effects of meteorology on PM 2.5 reduction during the 2008 Summer Olympic Games in Beijing, China*. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China. 5 (3), 331-341.
- [14] J. Csavina, J. Field, O. Félix, A. Y. Corral-Avitia, A. E. Sáez, and E. A. Betterton, (2014). *Effect of wind speed and relative humidity on atmospheric dust concentrations in semi-arid climates*. Science of The Total Environment. 487 (Supplement C), 82-90.
- [15] J. Radaideh, (2017). *Effect of Meteorological Variables on Air Pollutants Variation in Arid Climates*. J Environ Anal Toxicol. 7 (478), 2161-0525.1000478.
- [16] H. Biglari *et al.*, (2017). *Relationship between air particulate matter and meteorological parameters*. Fresenius Environmental Bulletin. 26 (6), 4047-4056.
- [17] A. Tabinda, S. Munir, A. Yasir, and A. Ilyas, (2016). *Seasonal and Temporal Variations of Criteria Air Pollutants and the Influence of Meteorological Parameters on the Concentration of Pollutants in Ambient Air in Lahore, Pakistan*. Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research. Series A. Physical Sciences (Print). 59 (1), 34-42.
- [18] T. Chen, J. He, X. Lu, J. She, and Z. Guan, (2016). *Spatial and Temporal Variations of PM_{2.5} and Its Relation to Meteorological Factors in the Urban Area of Nanjing, China*. International Journal of Environmental Research and Public Health. 13 (9), 921.
- [19] J. Wang and S. Ogawa, (2015). *Effects of Meteorological Conditions on PM_{2.5} Concentrations in Nagasaki, Japan*. International Journal of Environmental Research and Public Health. 12 (8), 9089.
- [20] A. Zarabi, J. Mohamadi, and A. Abdolahi, (2010). *Investigation and assessment of stable and mobile resources at the air pollution of Esfahan city*. Geographic Journal. 8 (26), 151-164 (in Persian).
- [21] S. Geravandi *et al.*, (2015). *Exposure to Particulate Matter of Less than 10 Microns and its Effect on Respiratory and Cardiovascular Diseases in Isfahan, Iran in 2013*. Journal of Health System Research. 11 (4), 725-730.
- [22] G. H. Kiani, F. Yari, and H. Amiri, (2014). *An estimation on mortality cost through air pollution in Isfahan city*. Journal of Environmental Science. 40 (1), 247-254 (in Persian).
- [23] S. Norouzi and H. Khademi, (2015). *Spatial and Temporal Variation in Dust Deposition Rate in Isfahan and its Relationship with Selected Climatic Parameters*. Journal of Water and Soil Science. 19 (72), 149-162 (in Persian).
- [24] D. C. Carslaw and K. Ropkins, (2012). *openair --- an R package for air quality data analysis*. Environmental Modelling & Software. 27-28 (52-61),
- [25] X. Querol *et al.*, (2004). *Speciation and origin of PM₁₀ and PM_{2.5} in selected European cities*. Atmospheric Environment. 38 (38), 6547-6555.
- [26] R. Modarres and A. K. Dehkordi, (2005). *Daily air pollution time series analysis of Isfahan City*. International Journal of Environmental Science & Technology. 2 (3), 259-267.
- [27] B. Mansouri and A. H. Hamidian, (2013). *Assessment of the Air Quality of Isfahan City, Iran, Using Selected Air Quality Parameters*. Iranian Journal of Toxicology. 7 (21), 842-848.
- [28] S. Norouzi, H. Khademi, S. Ayoubi, A. F. Cano, and J. A. Acosta, (2017). *Seasonal and spatial variations in dust deposition rate and concentrations of dust-borne heavy metals, a case study from Isfahan, central Iran*. Atmospheric Pollution Research.
- [29] J. Kozáková *et al.*, (2017). *The association between intermodal (PM_{1-2.5}) and PM₁, PM_{2.5}, coarse fraction and meteorological parameters in various environments in Central Europe*. Aerosol and Air Quality Research. 17 (5), 1234-1243.
- [30] A. Chaloulakou, P. Kassomenos, N. Spyrellis, P. Demokritou, and P. Koutrakis, (2003). *Measurements of PM₁₀ and PM_{2.5} particle concentrations in Athens, Greece*. Atmospheric Environment. 37 (5), 649-660.