





Investigating the relationship between dust phenomenon and PM_{2.5} and PM₁₀ pollutants variation in Qom City

Rahnama, M.¹  | Kamali, S.²  | Amini, M.² | Sabzeh, T.² | Sehat Kashani, S.³  

1. Associate Professor, Sand and Dust Storm International Research Center (SDS-IRC), Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran.
2. Researcher, Center for Weather and Climate Risk Studies, Qom, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS).
3. Associate Professor, Sand and Dust Storm International Research Center (SDS-IRC), Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: savizsehat@yahoo.com

(Received: 12 Mar 2025, Revise: 26 Jul 2025, Accepted: 04 Aug 2025, Published online: 23 Sep 2025)

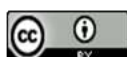
Abstract

The focus of this study is on the concentration trends of PM_{2.5} and PM₁₀ pollutants in Qom City and their connection to sand and dust storms. Shokohiyeh, Markaz Tahghighat, and Nirogah e Hararati stations data, including wind direction and speed, and present codes related to sand and dust storms were used for our analysis. In addition, we used the Mann-Kendall trend test to examine the PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations at four air pollution-monitoring stations in Qom City including Modiriat e Bohran, Emam, Pol-e Hojjatieh, and Pardisan in Qom City during the available statistical period (2017-2024). The daily time series results for PM_{2.5} and PM₁₀ pollutants show that the concentration of both pollutants is above the USEPA standard at all stations for a significant portion of the year. The highest concentration of PM_{2.5} was recorded at Emam and Modiriat-e-Bohran stations, reaching up to 500 µg/m³. The highest concentration of PM₁₀ was recorded at Modiriat-e-Bohran station (up to 770 µg/m³), which is the closest pollution monitoring station to the internal dust sources of Qom Province, as well as the Pol-e-Hojjatieh station. Analyzing the time series of pollutants during holidays and non-holidays reveals a decrease in the concentration of both pollutants in holidays, particularly PM_{2.5}. Both PM_{2.5} and PM₁₀ pollutants showed an increasing trend at the Pardisan station during the spring season, as indicated by the Mann-Kendall test results. This behavior could be attributed to the blowing of westerly winds, leading to dust intrusion from the central sand and dust source in the province into this area, while this area's concentration of urban pollutants could also be caused by its proximity to Nirogah e Hararati. An examination of the number of polluted days with reported sand and dust storms shows that PM₁₀ was recorded 75% of the time, while PM_{2.5} was recorded 31% of the studied period. The highest number of polluted days occurred in summer, followed by spring. By taking the easterly wind direction in summer and the westerly wind direction during the other three seasons in Qom City into consideration, it can be concluded that the pollution in Qom during summer is primarily caused by sand and dust emitted from the southeastern dust source.

Keywords: PM_{2.5}, PM₁₀, Mann-Kendall test, Dust Source, Qom City

Cite this article: Rahnama, M., Kamali, S., Amini, M., Sabzeh, T. and Saviz Sehat Kashani, S. (2025). Investigating the relationship between dust phenomenon and PM_{2.5} and PM₁₀ pollutants variation in Qom City. *Nivar*, 49(130-131), 219-236. Doi: <https://doi.org/10.30467/nivar.2025.512131.1328>

E-mail: (1) meh.rahnama@gmail.com (2) s1372.kamali@gmail.com (2) m.amini888@yahoo.com (2) t.sabze@gmail.com



بررسی ارتباط پدیده گردو خاک با تغییرات آلاینده‌های PM_{10} و $PM_{2.5}$ در شهر قم

مهدی رهنما^۱ | سعیده کمالی^۲ | محمد امینی^۲ | طاهره سبزه^۲ | ساویز صحت کاشانی^۳ ✉

۱. دانشیار، مرکز بین المللی مطالعات گردو خاک، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران.
۲. پژوهشگر مرکز مطالعات مخاطرات هوا و اقلیم قم، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو.
۳. دانشیار، مرکز بین المللی مطالعات گردو خاک، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: savizehat@yahoo.com

(دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۴، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۳، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱)

چکیده

در این مطالعه به منظور بررسی روند تغییرات غلظت دو آلاینده PM_{10} و $PM_{2.5}$ در شهر قم و ارتباط این دو آلاینده با رخداد های گردو خاک از داده های ایستگاه های همدیدی هواشناسی موجود شامل سمت و سرعت باد و کدهای مربوط به پدیده های گردو خاک در ایستگاه شکوهیه، مرکز تحقیقات و نیروگاه حرارتی و داده های مربوط به غلظت دو آلاینده PM_{10} و $PM_{2.5}$ در چهار ایستگاه پایش آلودگی هوای شهر قم شامل ایستگاه مدیریت بحران، خیابان امام، پل حجیه و پردیسان در دوره آماری در دسترس (۲۰۲۴-۲۰۱۷) و آزمون آماری Mann-Kendall استفاده شد.

نتایج بررسی سری زمانی آلاینده PM_{10} و $PM_{2.5}$ بیانگر آن است در همه ایستگاه ها در اغلب اوقات سال غلظت هر دو آلاینده بیشتر از استاندارد USEPA می باشد؛ بطوریکه بیشترین غلظت $PM_{2.5}$ مربوط به ایستگاه های خیابان امام و مدیریت بحران (تا غلظت ۵۰۰ میکروگرم بر مترمکعب) و بیشترین غلظت PM_{10} مربوط به ایستگاه مدیریت بحران (تا غلظت های ۷۷۰ میکروگرم بر مترمکعب) است، که نزدیک ترین ایستگاه پایش آلودگی هوا به چشمه های داخلی گردو خاک استان قم و نیز ایستگاه پل حجیه می باشد. تفکیک سری زمانی آلاینده ها بر حسب روزهای تعطیل و غیر تعطیل نشان دهنده کاهش غلظت هر دو آلاینده بخصوص $PM_{2.5}$ در روزهای تعطیل است. نتایج آزمون Mann-Kendall نشان داد در ایستگاه پردیسان در فصل بهار هر دو آلاینده PM_{10} و $PM_{2.5}$ روندی افزایشی دارد که با توجه به جهت غربی باد و گسیل بیشتر گردو خاک از سمت چشمه مرکزی استان به این منطقه و از طرف دیگر نزدیکی به نیروگاه سیکل ترکیبی می تواند از دلایل افزایش غلظت آلاینده ها در این ایستگاه باشد. بررسی تعداد روزهای آلوده ای که پدیده گردو خاک نیز در همان روزها گزارش شده، نشان دهنده این موضوع است که آلاینده PM_{10} در ۷۵٪ مواقع و $PM_{2.5}$ در ۳۱٪ مواقع همراه با گردو خاک بوده است که بیشترین تعداد روزها مربوط به تابستان و سپس بهار می باشد. با توجه به جهت شرقی باد در فصل تابستان و جهت غربی آن در سه فصل دیگر در شهر قم، می توان نتیجه گیری نمود سهم گردو خاک در آلودگی های شهر قم در فصل تابستان ناشی از گردو خاکی است که از چشمه گردو خاک جنوب شرقی گسیل می شود.

کلیدواژه ها: PM_{10} ، $PM_{2.5}$ ، آزمون Mann-Kendall، چشمه گردو خاک، شهر قم

۱. مقدمه

محیط منجر به کاهش عملکرد ریه، عفونت های تنفسی و آسم می شود. تحقیقات نشان داده در سال ۲۰۱۹ ذرات معلق مسبب ۳٪ مرگ و میر ناشی از بیماری های قلب و عروق، ۵٪ ناشی از سرطان ریه و برونشیت و نای، ۱٪ ناشی از مشکلات حاد تنفسی در کودکان زیر پنج سال می باشد (ژو و

ذرات ریزه $PM_{2.5}$ و PM_{10} معلق در جو، تأثیر نامطلوب قابل توجهی بر سلامت انسان ها، از جمله نفوذ در ریه ها، بیماری های قلبی عروقی و نیز بیماری های تنفسی دارند (انجل و همکاران، ۲۰۱۳ و وبر و همکاران، ۲۰۱۶). آلودگی هوای

استناد: رهنما، مهدی، کمالی، سعیده، امینی، محمد، سبزه، طاهره و صحت، ساویز. (۱۴۰۴). بررسی ارتباط پدیده گردو خاک با تغییرات آلاینده های PM_{10} و $PM_{2.5}$ در شهر قم. نیوار، ۴۹ (۱۳۰-۱۳۱)، ۲۱۹-۲۳۶. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2025.512131.1328>

رایانامه: (۱) meh.rahnama@gmail.com (۲) s1372.kamali@gmail.com (۳) m.amini888@yahoo.com (۴) t.sabze@gmail.com



DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2025.512131.1328>

ناشر: سازمان هواشناسی کشور.

(USEPA, 2022). ایران به‌عنوان کشوری که از دستورالعمل‌های کیفیت هوا سازمان بهداشت جهانی تبعیت می‌کند، دارای شهرهایی از جمله زابل، همدان، اهواز، سنندج، کرمانشاه، یاسوج، ارومیه، قم و خرم‌آباد با بالاترین میانگین سالانه PM₁₀ می‌باشد. علاوه بر این طبق فهرست ۵۰۰ شهر با بالاترین سطح PM₁₀ و PM_{2.5} منتشر شده سازمان بهداشت جهانی در سال ۲۰۱۸، ۴۱ شهر ایران که دارای سطوح بالای این دو آلاینده هستند تا حدودی به دلیل توفان گردوخاک و فعالیت‌های انسانی است (کلانتری، ۲۰۲۴). همچنین با توجه به اینکه خاورمیانه یکی از منابع اصلی انتشار گردوخاک در جهان است، کشورهای این منطقه از جمله ایران هر ساله رخدادهای توفان گردوخاک فراوانی را تجربه می‌کنند؛ بطوریکه مناطق غربی و مرکزی ایران تحت تأثیر این توفان‌های گردوخاک منطقه‌ای هستند (لیتمان و همکاران (۱۹۹۱)، میدلتون (۱۹۸۶) و جینوکس و همکاران (۲۰۱۲)). در مطالعه‌ای خزایی و همکاران (۲۰۱۶)، غلظت ذرات معلق PM₁₀ و PM_{2.5} را برای یک دوره پایش یک‌ساله از ژوئیه ۲۰۱۱ تا ژوئن ۲۰۱۲ در قم را بررسی و در تابستان، پاییز، زمستان و بهار به ترتیب میانگین نسبت PM_{2.5} به PM₁₀ را ۰/۲۹، ۰/۴۱، ۰/۳۱ و ۰/۳۷ به دست آوردند. باد غالب منطقه در بازه مورد مطالعه از سمت جنوب و جنوب شرق بوده و با توجه به هماهنگی بین توزیع مکانی غلظت PM₁₀ و جهت باد غالب نتیجه گرفتند که کویر مرکزی که در مجاورت شهر از شرق تا جنوب شرقی امتداد دارد، عامل اصلی پدیده‌های گردوخاک بوده است. عبدی و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند انتشار ذرات گردوخاک از سمت قم ناشی از وزش باد بر روی دریاچه نمک در بخش غربی دشت کویر، منجر به آلودگی هوا و کاهش دید افقی در شهر تهران نیز می‌شود و به‌طور مثال گزارش دادند انتشار ذرات گردوخاک از سمت قم در تاریخ ۳ تا ۵ اوت ۲۰۰۷ منجر به کاهش دید افقی در تهران تا حد ۷ کیلومتر شده است. عزیزی‌فر و همکاران (۱۳۹۰) در مطالعه‌ای باهدف بررسی شاخص کیفیت هوا

همکاران، ۲۰۱۹). این عوارض ناشی از آلودگی هوا را می‌توان از طریق افزایش آگاهی از شرایط کیفیت هوا در مناطق شهری که به شهروندان اجازه محدود کردن فعالیت‌های روزانه خود در موارد آلودگی بالا را می‌دهد، کاهش داد.

در طول چند دهه گذشته، آلودگی هوا در مناطق مختلف در سراسر جهان، به یک نگرانی جدی جهانی تبدیل شده است. ایران، هند، چین و بسیاری دیگر از کشورهای در حال توسعه با روند صنعتی شدن و افزایش جمعیت شهرنشینی با مشکلات شدید آلودگی هوا مواجه هستند

([https://www.iqair.com/world-most-polluted-](https://www.iqair.com/world-most-polluted-cities)

cities). شهرنشینی، رشد جمعیت، صنعتی شدن، افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی همراه با کیفیت پایین سوخت، عدم کارآمدی سامانه‌های حمل‌ونقل و افزایش ترافیک منجر به تخلیه روزانه مقادیر زیادی از آلاینده‌ها که با سازوکار طبیعی هوا ناسازگار هستند، شده است (آنتاناسیویک و همکاران، ۲۰۱۳).

طبق گزارش سازمان بهداشت جهانی^۱ (WHO) هر ساله به ترتیب ۴/۲ و ۷ میلیون نفر در سرتاسر جهان بر اثر آلودگی هوای محیط و نیز آلودگی ناشی از ذرات معلق PM_{2.5} می‌میرند. تخمین زده می‌شود که ۹۱٪ جمعیت جهانی در مکان‌هایی سکونت دارند که شاخص کیفیت هوای آن‌ها از استانداردهای WHO تبعیت نمی‌کنند. شاخص کیفیت هوا یا شاخص آلودگی هوا بانام اختصاری AQI^۳ شاخصی عددی است که برای سنجش آلودگی هوای یک منطقه به کار می‌رود. با افزایش عدد این شاخص احتمال درخطر قرار گرفتن سلامت عمومی بالا می‌رود (www.airnow.gov).

مطابق استاندارد ارائه شده توسط آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات آمریکا^۴ (USEPA)، میانگین غلظت سالانه PM_{2.5} نباید بیش از ۱۲ میکروگرم بر مترمکعب و در مقیاس روزانه بیش از ۳۵ میکروگرم بر مترمکعب باشد. همچنین غلظت روزانه PM₁₀ نباید بیش از ۱۵۰ میکروگرم بر مترمکعب باشد

3. Air Quality Index

4. United States Environmental Protection Agency

1. World Health Organization

2. Particulate matter

به‌عنوان یکی از چشمه‌های اصلی ذرات معلق جوی شهر قم، منجر به کاهش کیفیت هوای شهر می‌شود. طبق اطلاعات دریافتی از اداره کل محیط‌زیست استان قم، شهر قم در سال‌های اخیر با افزایش غلظت آلاینده‌های جوی مواجه بوده و آلاینده‌های PM_{10} (در فصل بهار و تابستان) و $PM_{2.5}$ (در فصل پاییز و زمستان) آلاینده‌های اصلی هوا در این شهر می‌باشند. با در نظر گرفتن این نکته که شهر قم یکی از شهرهای صنعتی، زیارتی، پرتردد و همچنین پرجمعیت ایران با جمعیت شهری بیش از یک میلیون نفر می‌باشد و نیز با در نظر گرفتن اهمیت سیاسی جغرافیایی این شهر، مطالعه بر روی غلظت آلاینده‌ها در این شهر امری اجتناب‌ناپذیر است. با توجه به اینکه مطالعات اندکی در شهر قم غلظت آلاینده‌های هوا را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مطالعه برای اولین بار به تحلیل همزمان سری زمانی تغییرات آلاینده‌ها و ارتباط آنها با رخداد‌های گردو خاک در ایستگاه‌های پایش آلودگی شهر می‌پردازد. در همین راستا اهداف اصلی از این تحقیق شامل بررسی روند تغییرات آلاینده‌های PM_{10} و $PM_{2.5}$ در ایستگاه‌های پایش آلودگی شهر قم در طی دوره آماری در دسترس، شناخت مناطقی که بیشترین آلودگی را دارند و بررسی سهم پدیده گردو خاک در ایجاد دو آلاینده یادشده می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

شهر قم با وسعتی معادل ۱۴۶۳۱ کیلومتر مربع در مرکز کشور ایران در جنوب غربی آسیا و در حاشیه کویر واقع شده است. مختصات جغرافیایی این استان از ۵۰ درجه و ۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۸ دقیقه شرقی طول جغرافیایی و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۸ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۹ دقیقه شمالی است. نقشه مدل رقومی ارتفاع^۵ (DEM) شهر قم نشان‌دهنده این است که تغییرات ارتفاع در این شهر اندک بوده و بین ۸۷۰ تا ۱۱۷۳ متر از سطح دریا تغییر می‌کند (شکل ۱-الف). شکل ۱-ب نشان‌دهنده چشمه‌های داخلی گردو خاک در استان قم

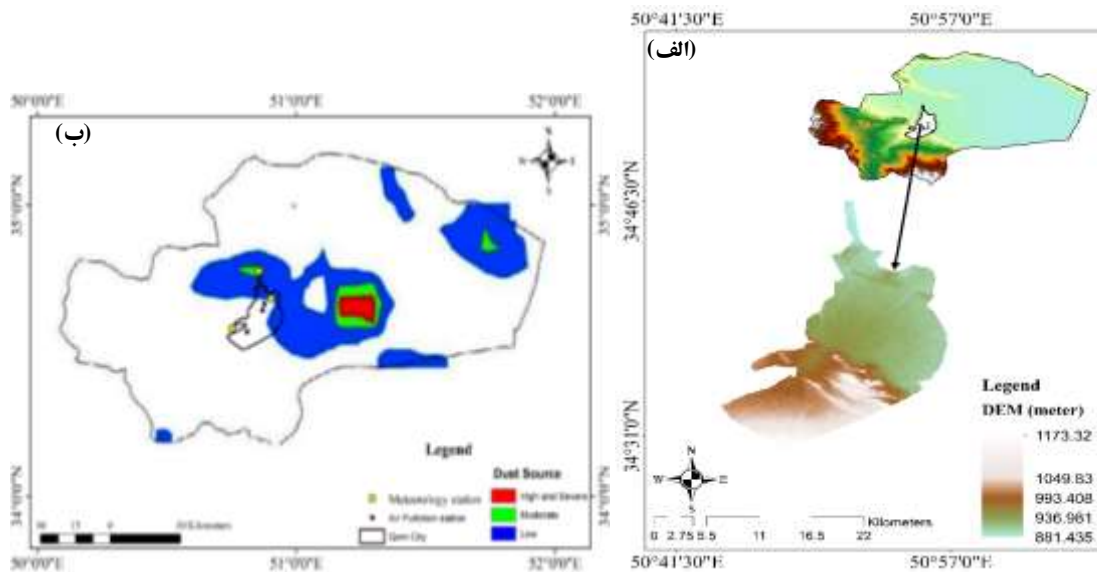
و مقادیر این ذرات در شهر قم، غلظت ذرات معلق PM_{10} ، $PM_{2.5}$ و PM_{10} در نقطه مرکزی شهر برای هر کدام از ذرات، ۶۰ نمونه طی ۵ ماه متوالی در فصول تابستان (۲ ماه) و پاییز اندازه‌گیری کردند. نتایج آن‌ها نشان داد در طول دوره نمونه‌گیری از نظر آلاینده PM_{10} ، آبان ماه با میانگین ۱۱۷ میکروگرم بر مترمکعب آلوده‌ترین و مهرماه با میانگین ۸ میکروگرم بر مترمکعب پاک‌ترین ماه گزارش شد. همچنین از نظر آلاینده $PM_{2.5}$ ، آذرماه با میانگین ۳۳ میکروگرم بر مترمکعب آلوده‌ترین و مرداد، شهریور و مهرماه با میانگین ۸ میکروگرم بر مترمکعب پاک‌ترین ماه‌ها بودند. همچنین غلظت ذرات معلق PM_{10} ، $PM_{2.5}$ و PM_{10} در اکثر مواقع کمتر از حد استاندارد بوده و مقادیر AQI نیز برای آن‌ها در حد متوسط و خوب می‌باشد. عزیزی‌فر و همکاران (۱۳۹۱) در مطالعه‌ای به بررسی ارتباط بین غلظت PM_{10} ، $PM_{2.5}$ و PM_{10} پارامترهای هواشناسی در هوای شهر قم پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد هرچقدر قطر آئرو دینامیکی ذرات کمتر می‌شود، همبستگی قوی‌تری بین پارامترهای هواشناسی و غلظت ذرات معلق وجود دارد. بیگلری و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای به بررسی غلظت ذرات معلق در هوای شهر قم با استفاده از ۹۹ نمونه جمع‌آوری شده مربوط به ۴ ایستگاه در مرکز شهر در ۷ ماه از سال ۲۰۱۳ پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد میانگین غلظت‌های PM_{10} در ماه‌های سپتامبر-اکتبر، $PM_{2.5}$ در ماه‌های مارس-آوریل و PM_{10} در ماه‌های مه-ژوئن بیشترین مقدار را داشته‌اند. همچنین، غلظت‌های $PM_{2.5}$ و PM_{10} از حد استاندارد WHO بالاتر و از استانداردهای ملی پایین‌تر بودند. رابطه مثبتی بین PM_{10} و دما و همبستگی منفی با رطوبت و بارش مشاهده شد.

روند سریع شهری و صنعتی شدن شهر قم، کیفیت هوای این شهر را تحت تأثیر قرار داده است. شرایط اقلیمی و جغرافیایی شهر قم و نزدیکی آن به دو بیابان بزرگ کشور (بیابان کویر و دریاچه نمک قم) منجر به بدتر شدن کیفیت هوا در شهر قم از منظر ذرات معلق جوی و گردو خاک می‌شود (بیگلری و همکاران، ۲۰۱۷). عوامل طبیعی (توفان‌های گردو خاک)

⁵. Digital Elevation Model

فصل بهار، تابستان و زمستان و کانون مرکزی در فصل بهار و تابستان استان قم را تحت تأثیر قرار می‌دهند (سازمان حفاظت محیط‌زیست، ۱۳۹۸). بعلاوه در این شکل موقعیت مکانی شهر قم به همراه ایستگاه‌های مطالعاتی نسبت به چشمه‌های گردوخاک نشان داده شده است. طبق شکل تمامی ایستگاه‌های مطالعاتی به جز ایستگاه پردیسان در فاصله نزدیکی نسبت به این چشمه‌های گردوخاک قرار دارند.

می‌باشد، این نقشه توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست در سال ۱۳۹۸ تهیه شده است. طبق این نقشه، چشمه گردوخاک با شدت‌های زیاد و خیلی زیاد در جنوب شرق استان پراکندگی دارد. چشمه‌های با شدت کم و متوسط نیز در بخش‌هایی از شمال شرق، مرکز، جنوب، جنوب شرق و جنوب غرب استان پراکندگی دارند. چشمه گردوخاک شمال شرقی در فصل بهار و تابستان، کانون جنوب شرقی در



شکل ۱. نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) شهر قم (الف) و چشمه‌های گردوخاک استان قم به همراه موقعیت شهر قم و ایستگاه‌های مطالعاتی (ب) (سازمان حفاظت محیط‌زیست، ۱۳۹۸).

داده‌های هواشناسی (سمت و سرعت باد و کدهای مربوط به پدیده‌های گردوخاک) مربوط به ایستگاه‌های شکوهیه، مرکز تحقیقات و نیروگاه حرارتی در دوره آماری ذکر شده، استفاده شد (جدول ۱). لازم به ذکر است هر دو مجموعه داده در مقیاس زمانی روزانه از اداره کل هواشناسی و اداره کل محیط‌زیست استان قم دریافت شد.

۲-۲. داده‌ها

در این تحقیق از داده‌های مربوط به غلظت دو آلاینده PM_{10} و $PM_{2.5}$ چهار ایستگاه پایش آلودگی اداره کل محیط‌زیست استان قم شامل ایستگاه مدیریت بحران، پل حجتیه، خیابان امام و پردیسان در دوره آماری در دسترس (دوره آماری ۷ ساله از ۲۰۱۷ تا سه‌ماهه ابتدایی سال ۲۰۲۴) و

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مطالعاتی.

ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	کمیت‌های مورد استفاده	نوع ایستگاه
شکوهیه (قم)	۳۴/۷۷	۵۰/۸۵	۸۷۹/۰۰	سمت و سرعت باد، بارش و کدهای مربوط به پدیده‌های گردو خاک (کدهای ۰۶، ۰۷، ۳۵-۳۰ و ۹۸)	همدیدی
مرکز تحقیقات	۳۴/۶۸	۵۰/۹۰	۹۲۱/۰۰	سمت و سرعت باد	اقلیم‌شناسی خودکار
نیروگاه حرارتی	۳۴/۵۸	۵۰/۷۵	۱۰۲۲/۰۰	سمت و سرعت باد	اقلیم‌شناسی خودکار
پل حجتیه	۳۴/۶۴	۵۰/۸۷	۹۳۴/۳۶	PM ₁₀	سنجش آلودگی
امام	۳۴/۶۶	۵۰/۸۸	۹۲۸/۱۲	PM _{2.5} , PM ₁₀	سنجش آلودگی
پردیسان	۳۴/۶۲	۵۰/۸۷	۹۳۸/۶۸	PM _{2.5} , PM ₁₀	سنجش آلودگی
مدیریت بحران	۳۴/۷۱	۵۰/۸۶	۹۰۲/۸۴	PM _{2.5} , PM ₁₀	سنجش آلودگی

۳-۲. روش کار

پس از جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز مطالعه شامل داده‌های تمامی ایستگاه‌های هواشناسی و ایستگاه‌های پیش‌آلودگی شهر قم که دارای دوره آماری مناسب داده بودند، آمار ۴ ایستگاه پیش‌آلودگی و ۳ ایستگاه هواشناسی جمع‌آوری شد. سپس با توجه به هدف تحقیق که یافتن روند تغییرات غلظت دو آلاینده PM_{2.5} و PM₁₀ و ارتباط آن‌ها با رخداد‌های گردو خاک می‌باشد، نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به هر ایستگاه پیش‌آلودگی انتخاب شد. در ادامه در دوره آماری که داده‌های مورد نیاز مطالعه در دسترس قرار داشته (۲۰۱۷ تا سه ماهه نخست ۲۰۲۴) به تحلیل عوامل هواشناسی در منطقه مطالعاتی شامل بررسی روند بارش، تعداد روزهایی که رخداد گردو خاک گزارش شده است پرداختیم. از طرف دیگر با توجه به اینکه استان قم دارای چشمه‌های داخلی گرد و خاک می‌باشد و این چشمه‌ها در فصول مختلف شهر قم را تحت تأثیر قرار می‌دهند به همین دلیل نقشه گلباد در ایستگاه‌های هواشناسی برای پیدا کردن جهت و سرعت باد ترسیم شد. سپس به بررسی روند تغییرات غلظت دو آلاینده مذکور با استفاده از آزمون Mann-Kendall پرداختیم. در نهایت جهت پیدا کردن ارتباط بین دو آلاینده PM_{2.5} و PM₁₀ و رخداد گردو خاک در شهر قم، روزهای آلوده برای هر دو آلاینده که همراه با پدیده گرد و خاک بوده‌اند مشخص شد.

آزمون روند Mann-Kendall (MK)

در این مطالعه، آزمون روند Mann-Kendall (مان (۱۹۴۵)، کندال (۱۹۷۵) و گیلبرت (۱۹۸۷))، که به‌عنوان آزمون MK شناخته می‌شود، برای شناسایی روندهای معنادار در سری‌های زمانی آلاینده‌های هوا مورد استفاده قرار گرفت. آزمون MK یک آزمون ناپارامتریک است که نیازی به خطی بودن داده‌های سری زمانی و توزیع نرمال آن ندارد. علاوه بر این، آزمون می‌تواند وجود روندهای یکنواخت صعودی یا نزولی را در یک سری زمانی تشخیص دهد (هیرش و همکاران، ۱۹۸۲). آماره MK (S) را به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \operatorname{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

$$\operatorname{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

که در آن x_j و x_i به ترتیب عبارت‌های j و i ام در سری زمانی n می‌باشند. رابطه (۲) اختلاف بین مشاهدات را محاسبه می‌کند. بنابراین، یک S مثبت، نشان می‌دهد که داده‌های اخیر بزرگ‌تر از داده‌های قبلی است و روند صعودی دارند؛ درحالی‌که S منفی برعکس را نشان می‌دهد. برای $n \geq 10$ میانگین $E(S)$ و واریانس $\operatorname{Var}(S)$ طبق رابطه (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند.

$$Q = \frac{x_t - x_s}{t - s}, 1, 2, \dots, N \quad (۶)$$

که x_t و x_s به ترتیب داده در زمان‌های $s > t$ و $N = n \left[\frac{(n+1)}{2} \right]$ هستند. مقدار مثبت شیب سن بیانگر روند افزایشی و مقدار منفی آن روند کاهش‌ی است.

۳. نتایج و بحث

بررسی پدیده‌های گردو خاک به تفکیک سالانه و فصلی

بررسی تعداد روزهای رخداد گردو خاک طی دوره آماری مورد بررسی (۲۰۱۷ تا سه‌ماهه نخست ۲۰۲۴) به تفکیک هرسال در ایستگاه همدیدی شکوهیه (قم) مطابق شکل ۲ می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود در این بازه زمانی در دوسال ابتدایی رخدادهای گردو خاک روند افزایشی داشته و مجدد در سال ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ روند کاهش‌ی در تعداد رخدادهای گردو خاک مشاهده می‌شود. از سال ۲۰۲۱ تا انتهای ۲۰۲۳ روند افزایشی در تعداد رخدادها مشاهده می‌شود؛ به طوری که بیشترین رخداد مربوط به سال ۲۰۲۲ با ۹۴ مورد پدیده ثبت شده است. با بررسی نمودار سری زمانی مجموع بارش سالانه می‌توان دریافت با افزایش مقدار بارش در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ تعداد رخدادهای گردو خاک در این دو سال کاهش یافته است. همچنین کمترین رخداد گردو خاک مربوط به سال سه‌ماهه نخست سال ۲۰۲۴ به ۱ مورد پدیده است (شکل ۲). با توجه به جدول ۲ طی دوره آماری مورد بررسی در ایستگاه همدیدی شکوهیه (قم) در مجموع ۴۴۳ روز پدیده مربوط به گردو خاک در این ایستگاه ثبت شده است که این پدیده‌ها شامل پدیده گردو خاک گسترده (تشکیل شده خارج از محل ایستگاه) (کد ۰۶ (DU⁶))، گردو خاک برخاسته (کد ۰۷ (SA⁷)) و توفان گردو خاک (کدهای ۳۵-۳۰ و ۹۸ (DS⁸)) می‌باشد. بررسی‌های فصلی نیز نشان‌دهنده این است که فصل تابستان با

$$E(S) = 0 \quad (۳)$$

که در آن میانگین صفر است، زیرا کندال (۱۹۷۵) قبلاً ثابت کرده است که S بدون علامت و معمولاً برای سری‌های زمانی با $n \geq 10$ توزیع می‌شود.

$$Var(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(t_i-1)(2t_i+5)] \quad (۴)$$

که در آن t برابر است با تعداد گره‌های ایجاد شده در سری زمانی و t_i بیانگر تعداد داده‌های برابر در t مین گروه است. مقدار آماره (Z) مطابق رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (۵)$$

Z برای ارزیابی روند داده‌ها استفاده می‌شود. اگر $|Z| > Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ باشد به این معنی است که روند در سطح معناداری انتخاب شده (α) معنادار است. بر اساس آزمون دو دنباله، مقادیر Z برای سطوح معناداری ۵٪ و ۱۰٪ به ترتیب $\pm 1/96$ و $\pm 1/64$ هستند. به عنوان مثال، اگر مقدار Z بین محدوده $\pm 1/96$ قرار گیرد، بیانگر آن است روندی در داده‌ها وجود ندارد و اگر $|Z|$ بزرگ‌تر از $1/96$ باشد، نشان‌دهنده این است که روند در سطح ۰/۰۵ معنادار است. علامت مثبت Z نشان‌دهنده روند صعودی و علامت منفی نشان‌دهنده روند نزولی است.

آزمون شیب سن

این آزمون را ابتدا تیل (۱۹۵۰) ارائه کرد و سپس سن (۱۹۶۸) بسط و گسترش داد. در این آزمون شیب میانه برای سری زمانی محاسبه و معنی‌داری شیب در سطوح مختلف اطمینان به دست می‌آید. شیب میانه بین داده‌ها با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

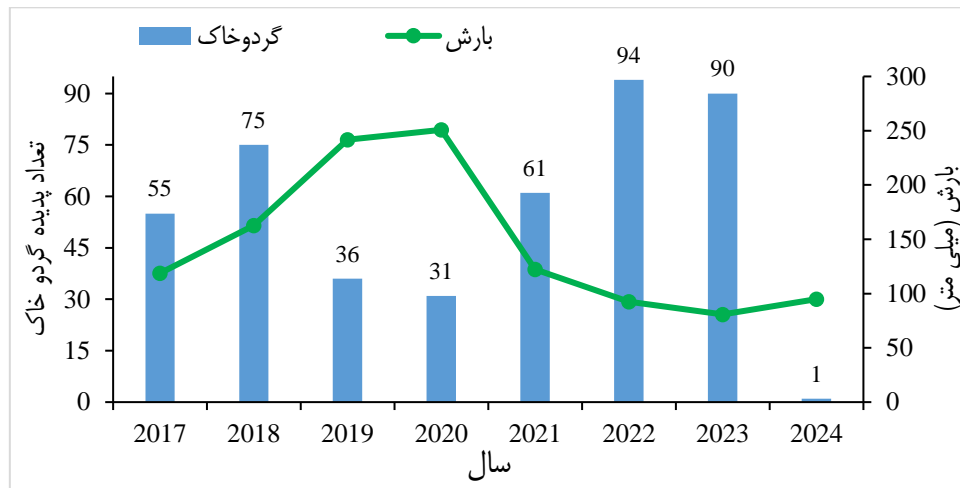
8. Sand storm

6. Suspended dust

7. Rising dust

(جدول ۲). تفکیک پدیده‌ها به صورت ماهانه نیز گویای آن است که در ایستگاه شکوهیه بیشترین رخداد گردوخاک مربوط به ماه‌های مه تا اوت می‌باشد.

۲۳۲ روز و فصل بهار با ۱۳۱ روز بیشترین رخداد گردوخاک را در شهر داشته‌اند. در بین ۳ پدیده مشاهده شده در این دوره، DU با ۱۴۲ روز و سپس SA با ۸۹ روز در فصل تابستان به‌عنوان پدیده‌های غالب این فصل معرفی می‌شوند



شکل ۲. نمودار تغییرات تعداد روزهای بار رخداد گردوخاک و مجموع بارش سالانه در ایستگاه شکوهیه قم در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا سه‌ماهه نخست ۲۰۲۴.

جدول ۲. تعداد روزهای دارای پدیده گردوخاک به تفکیک هر فصل در ایستگاه شکوهیه (قم).

فصل	DU	SA	DS	مجموع
بهار	۶۵	۶۱	۵	۱۳۱
تابستان	۱۴۲	۸۹	۱	۲۳۲
پاییز	۳۹	۲۶	۱	۶۶
زمستان	۵	۸	۱	۱۴
مجموع	۲۵۱	۱۸۴	۸	۴۴۳

بررسی گلبادهای فصلی ایستگاه شکوهیه در روزهایی که پدیده گردوخاک گزارش شده است (شکل ۴) نشان‌دهنده این است که در فصل بهار جهت بادهای غالب غربی و شمال غربی، در تابستان شرقی و جنوب شرقی، در پاییز به صورت غربی و شرقی است و در زمستان به صورت غربی و شمال غربی است. بنابراین به نظر می‌رسد پدیده‌های گردوخاک در این ایستگاه در فصل تابستان ناشی از چشمه گردوخاکی است که در شرق استان قرار دارد و گردوخاک‌های فصل بهار از سمت چشمه داخلی گردوخاک که در مرکز استان واقع شده؛ تشکیل شده یا اینکه می‌توانند چشمه خارجی داشته باشند. در

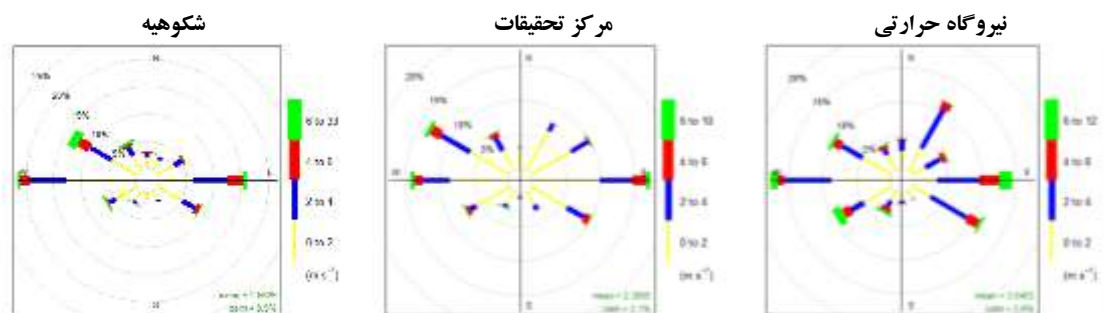
بررسی گلباد ایستگاه‌های هواشناسی شهر قم

گلباد سالانه سه ایستگاه شکوهیه، مرکز تحقیقات و نیروگاه حرارتی طی دوره آماری ۲۰۱۷-۲۰۲۴ مطابق شکل ۳ می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در سه ایستگاه مذکور در مقیاس سالانه، بادهای غالب عمدتاً بادهای غربی و شرقی می‌باشند. سرعت متوسط باد در ایستگاه شکوهیه ۲/۵۶، ایستگاه مرکز تحقیقات ۲/۳۹ و ایستگاه نیروگاه حرارتی ۳/۰۴ متر بر ثانیه می‌باشد (شکل ۳). درصد باد آرام در ایستگاه شکوهیه ۹/۵٪، ایستگاه مرکز تحقیقات ۳/۱٪ و در ایستگاه نیروگاه حرارتی ۳/۶٪ می‌باشد.

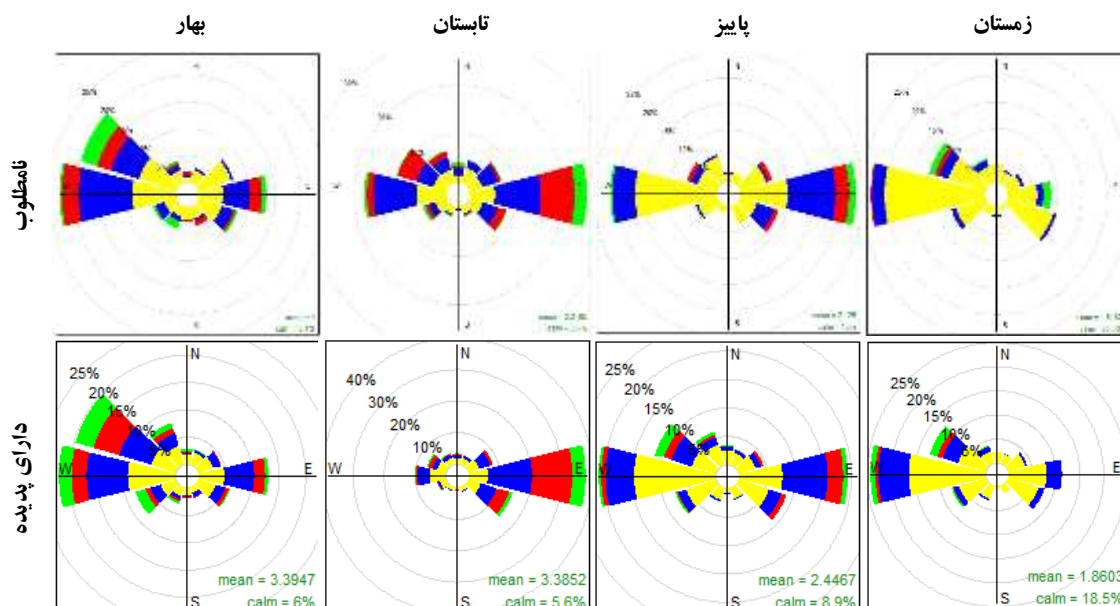
فصل پاییز، هر دو جهت شرقی و غربی برای بادهای ایستگاه ثبت شده است که نشان دهنده این است که در این فصل هر دو چشمه شرقی و چشمه مرکزی می‌توانند تأثیری بر گردوخاک‌های این ایستگاه داشته باشند. در فصل زمستان جهت بادهای غربی و بادهای عمدتاً سرعتی کمتر از سه فصل دیگر دارند.

بررسی گلبادهای در روزهایی که غلظت دو آلاینده $PM_{2.5}$ و PM_{10} در ایستگاه‌های پایش آلودگی در شرایط نامطلوب (بیش از حد استاندارد اعلام شده توسط آژانس حفاظت محیط زیست ایالات آمریکا (USEPA))، قرار داشته (شکل ۴)، مبین این مطلب است که در این حالت نیز در فصل تابستان جهت بادهای شرقی و در سه فصل دیگر بادهای غالب

استان جهتی غربی دارند. از نکات دیگری که می‌توان از این گلبادهای دریافت این است که آلودگی‌های شهر قم در فصل تابستان ناشی از گردوخاکی است که از چشمه شرقی گسیل می‌شود. همچنین نکته قابل توجه دیگری که می‌توان دریافت این است که در دو فصل پاییز و زمستان در شرایطی که آلاینده هوا (عمدتاً $PM_{2.5}$) در وضعیت نامطلوب قرار داشته، در برخی از موارد پدیده گردوخاک هم گزارش شده است و می‌توان گفت گرچه در این فصول طبق بررسی‌های صورت گرفته، آلاینده‌های صنایع، آلاینده غالب شهر می‌باشد اما تعدادی از روزهای آلوده، ناشی از گردوخاکی است که از سمت غرب وارد شهر می‌شود نیز در میزان این آلودگی تأثیر گذار است.



شکل ۳. گلباد سالانه سه ایستگاه شکوهیه، مرکز تحقیقات و نیروگاه حرارتی در بازه زمانی ۲۰۱۷-۲۰۲۴.



شکل ۴. گلباد فصلی ایستگاه شکوهیه در بازه زمانی ۲۰۱۷-۲۰۲۴ در روزهایی که پدیده گردوخاک گزارش شده است و همچنین در روزهایی که آلاینده PM_{10} و $PM_{2.5}$ در شرایط نامطلوب قرار داشته است.

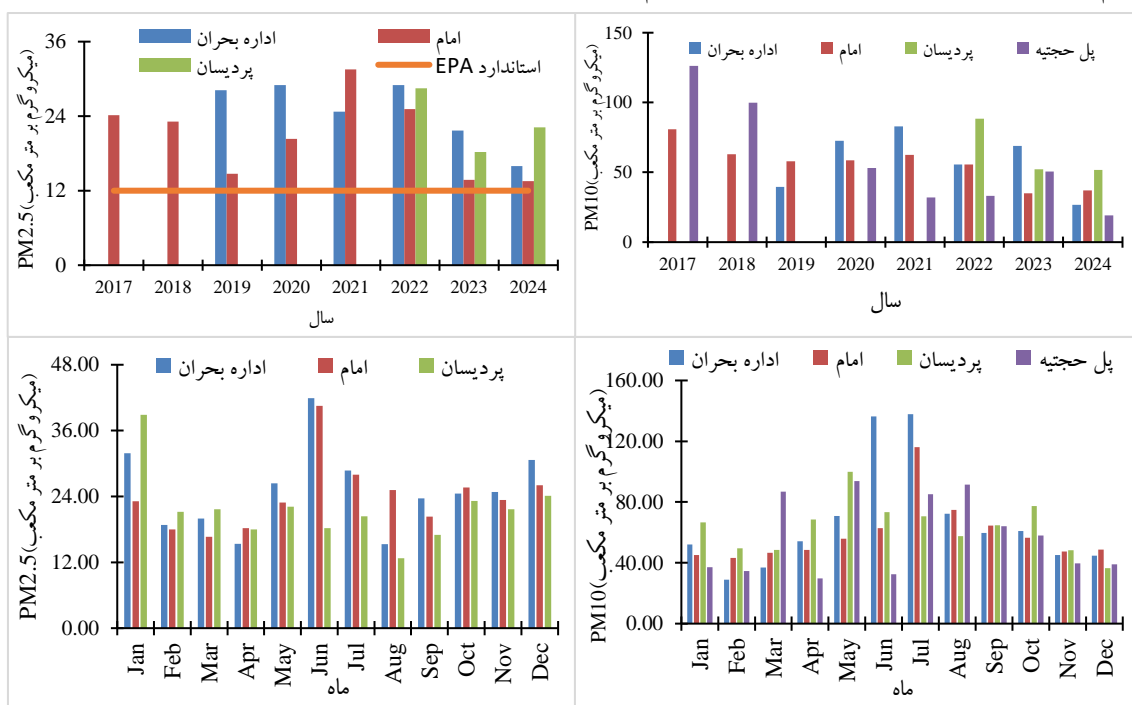
تغییرات غلظت دو آلاینده PM_{10} و $PM_{2.5}$ در

ایستگاه‌های مطالعاتی

به منظور بررسی تغییرات غلظت دو آلاینده PM_{10} و $PM_{2.5}$ در ایستگاه‌های پایش آلودگی شهر قم ابتدا مقدار متوسط هر یک از آلاینده‌ها به تفکیک هر ماه در بازه زمانی مورد مطالعه محاسبه شد (شکل ۵). مقدار متوسط ماهانه غلظت دو آلاینده PM_{10} و $PM_{2.5}$ در ایستگاه‌های پایش آلودگی شهر قم نشان می‌دهد بیشینه غلظت متوسط آلاینده $PM_{2.5}$ در ماه‌های ژانویه و ژوئن و پس از آن ماه دسامبر رخ داده است که در بین سه ایستگاه پایش آلودگی، ایستگاه اداره بحران و پردیسان بیشترین مقادیر غلظت‌ها را به خود اختصاص داده‌اند.

در مورد آلاینده PM_{10} بیشترین مقادیر غلظت متوسط آن مربوط به ماه‌های مه تا اوت (فصل‌های بهار و تابستان) می‌باشد؛ بطوریکه در این ماه‌ها غلظت آلاینده از وضعیت سالم و قابل قبول عبور کرده و در شرایط ناسالم برای

گروه‌های حساس قرار گرفته است که بیشینه مقدار آن مربوط به ایستگاه اداره بحران می‌باشد. با مقایسه نتایج حاصل از این بخش با نقشه چشمه‌های گردو خاک استان قم مشاهده می‌شود بیشینه مقدار دو آلاینده مذکور در ایستگاه‌هایی گزارش شده است که واقع در چشمه گردو خاک مرکزی و یا نزدیک به چشمه جنوب شرقی استان قرار دارند. از طرف دیگر بررسی نقشه گلباد ایستگاه‌ها نشان‌دهنده این است که در ماه‌های ژوئن تا اوت (فصل تابستان) جهت باد منطقه شرقی است. یکی از دلایل افزایش این دو آلاینده در این ماه‌ها می‌تواند ناشی از گردو خاک گسیل شده از چشمه‌های داخلی گردو خاک استان باشد. همچنین بررسی غلظت‌های سالانه دو آلاینده PM_{10} و $PM_{2.5}$ نشان‌دهنده این موضوع است که در ایستگاه‌های پایش آلودگی، در کل دوره آماری مورد بررسی، غلظت آلاینده‌ها بالاتر از استاندارد USEPA (حد مجاز برای آلاینده $PM_{2.5}$ ، ۱۲ میکروگرم بر مترمکعب) می‌باشد.



شکل ۵. تغییرات متوسط ماهانه و سالانه غلظت PM_{10} و $PM_{2.5}$ در ایستگاه‌های پایش آلودگی شهر قم طی دوره آماری ۲۰۱۷-۲۰۲۴.

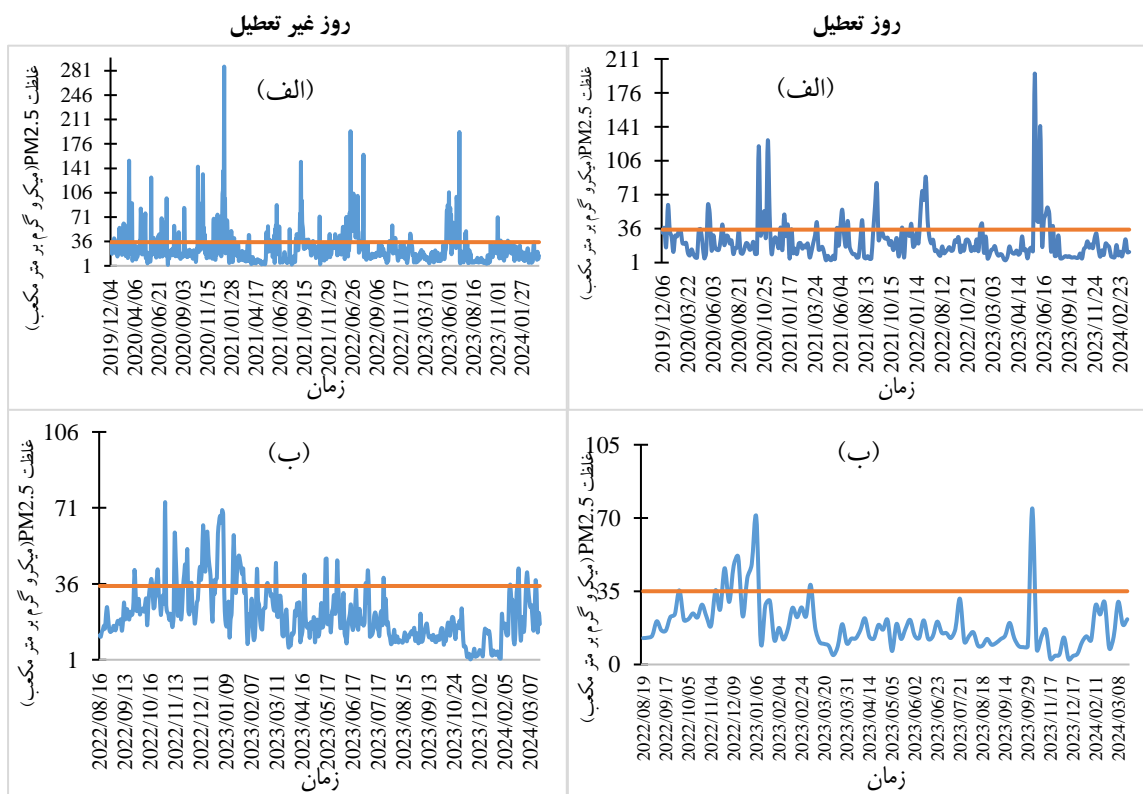
تعطیل و غیر تعطیل نتیجه‌ای مشابه آلاینده $PM_{2.5}$ دارد (شکل ۷). بیشترین مقادیر این آلاینده در روزهای غیر تعطیل ایستگاه اداره بحران (تا غلظت‌های ۷۷۰ میکروگرم بر مترمکعب) که نزدیک‌ترین ایستگاه پایش آلودگی به چشمه‌های داخلی گردوخاک استان قم است و همچنین ایستگاه پل حجتیه گزارش شده است. کمترین مقادیر غلظت آلاینده در ایستگاه پردیسان رخ داده است. به‌طورکلی با بررسی سری زمانی هر دو آلاینده به تفکیک روزهای تعطیل و غیر تعطیل مشخص است غلظت هر دو آلاینده در روزهای تعطیل کاهش چشم‌گیری داشته است که این مقدار کاهش بیشتر در آلاینده $PM_{2.5}$ نمایان است. بنابراین با توجه به کاهش غلظت آلاینده‌ها در روزهای تعطیل بخصوص آلاینده $PM_{2.5}$ به نظر می‌رسد علاوه بر پدیده گردوخاک که تأثیر مستقیمی بر دو آلاینده PM_{10} و $PM_{2.5}$ دارد. عوامل دیگری از جمله آلاینده‌های انسان‌ساز مانند آلاینده‌های صنعتی (صنایع، نیروگاه‌ها و ...) می‌تواند بر غلظت این دو آلاینده مؤثر باشد.

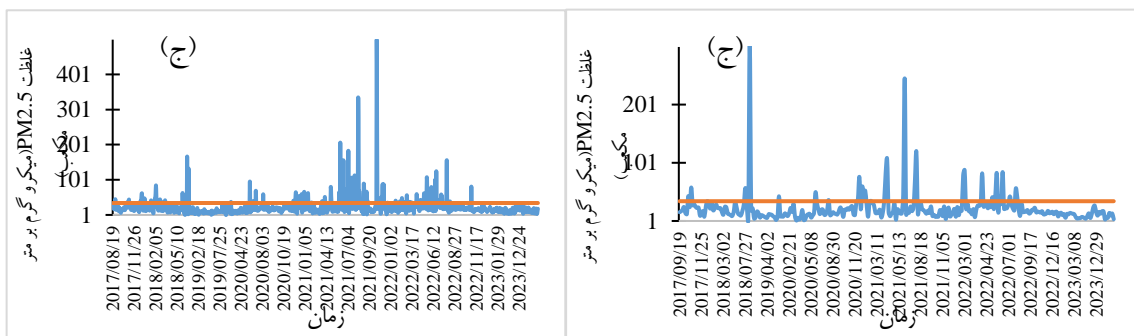
سری زمانی غلظت آلاینده‌ها به تفکیک روز

تعطیل و غیر تعطیل

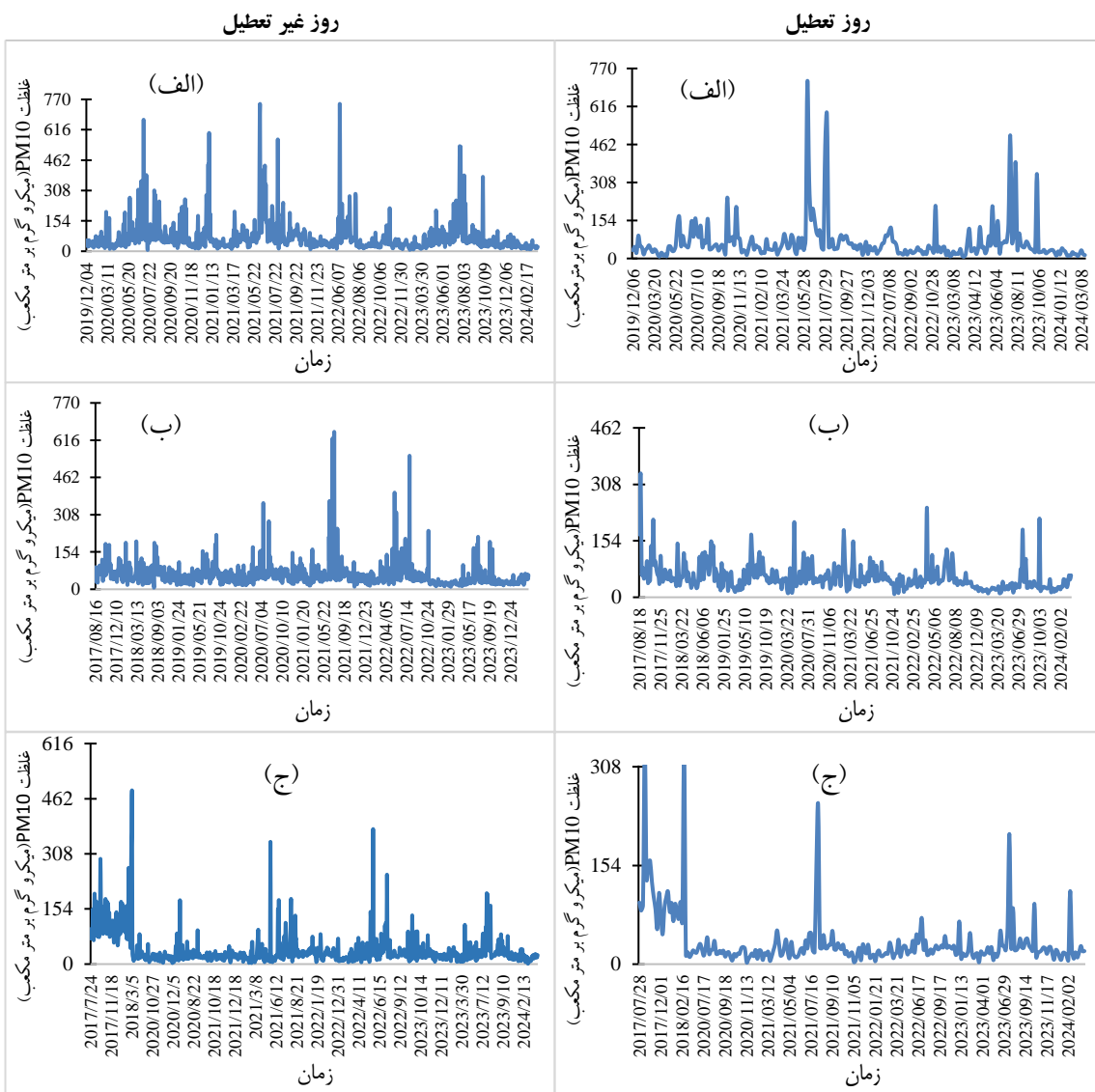
بررسی نمودارهای سری زمانی روزانه آلاینده $PM_{2.5}$ به تفکیک روزهای تعطیل و غیر تعطیل مطابق شکل ۶ است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در سه ایستگاه مدیریت بحران، امام و پردیسان بیشترین مقادیر غلظت $PM_{2.5}$ مربوط به روزهای غیر تعطیل می‌باشد؛ بطوریکه بیشینه مقادیر آن مربوط به ایستگاه امام (تا غلظت ۵۰۰ میکروگرم بر مترمکعب) و کمینه مقدار آن مربوط به ایستگاه پردیسان (تا ۸۰ میکروگرم بر مترمکعب) می‌باشد. تفکیک این آلاینده به‌صورت روزهای تعطیل و غیر تعطیل، با هدف بارز کردن نقش انسانی در شاخص کیفی هوا، نشان می‌دهد در هر سه ایستگاه موردبررسی در روزهای تعطیل غلظت این آلاینده کاهش یافته و بیشتر مواقع غلظت آلاینده در وضعیت سالم قرار دارد.

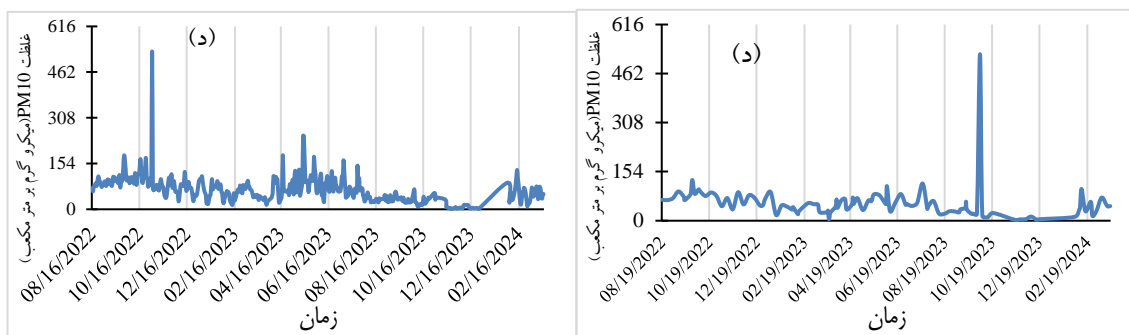
سری زمانی آلاینده PM_{10} در چهار ایستگاه پایش آلودگی پل حجتیه، امام، اداره بحران و پردیسان به تفکیک روزهای





شکل ۶: تغییرات غلظت آلاینده PM_{۲.۵} در روزهای تعطیل و غیر تعطیل در ایستگاه‌های اداره بحران (الف)، پردیسان (ب) و امام (ج)، پایش آلودگی شهر قم.





شکل ۷. تغییرات غلظت آلاینده PM_{10} در روزهای تعطیل و غیر تعطیل در ایستگاه‌های (اداره بحران (الف)، امام (ب)، پل حجّتیبه (ج) و پردیسان (د)) پایش آلودگی شهر قم.

با توجه به نتایج جدول ۳ در ایستگاه اداره بحران در طی دوره مورد بررسی در مجموع ۸۲۵ روز آلاینده $PM_{2.5}$ به عنوان آلاینده اصلی این ایستگاه معرفی شده است که بیشترین تعداد روزهای رخداد آن مربوط به فصل پاییز (سه‌ماهه سپتامبر تا نوامبر) با ۲۶۶ روز و پس از آن فصل زمستان (سه‌ماهه دسامبر تا فوریه) با ۲۰۰ روز است. به‌طور کلی در این ایستگاه در فصل پاییز و پس از آن فصل زمستان بیشترین $PM_{2.5}$ اندازه‌گیری شده است. در ایستگاه امام در طی دوره مورد بررسی، در مجموع ۷۸۴ روز آلاینده اصلی $PM_{2.5}$ بوده است که بیشترین تعداد آن ۲۷۷ روز مربوط به فصل زمستان و سپس فصل بهار (سه‌ماهه مارس تا مه) با ۲۱۷ روز است. در ایستگاه پردیسان طی دوره مورد بررسی در مجموع ۳۳۹ روز $PM_{2.5}$ آلاینده این ایستگاه معرفی شده است که بیشترین تعداد آن مربوط به فصل زمستان و پس از آن مربوط به فصل پاییز با ۹۵ روز می‌باشد.

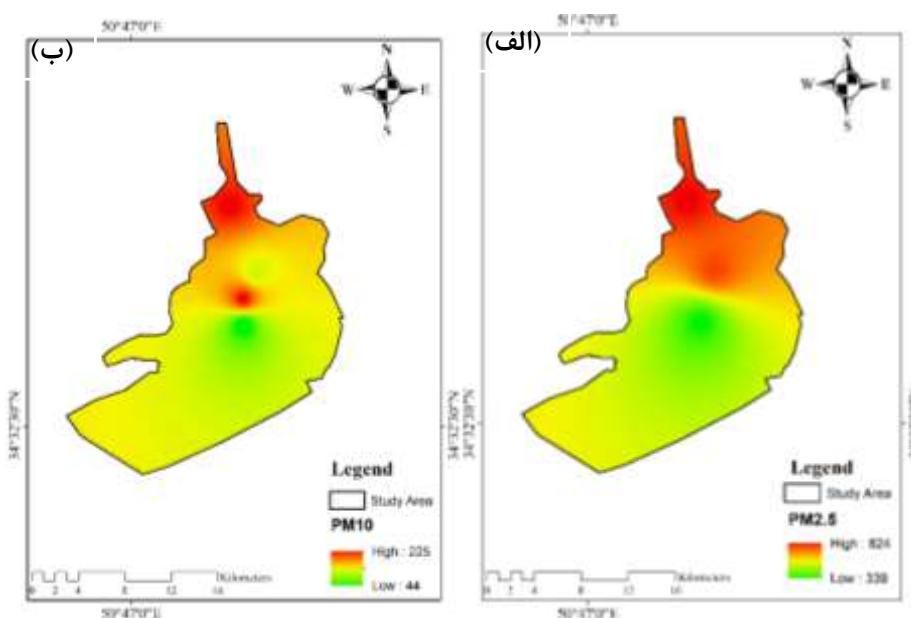
بعلاوه توزیع مکانی تعداد روزهای آلوده مربوط به دو آلاینده PM_{10} و $PM_{2.5}$ در منطقه مطالعاتی ترسیم شد (شکل ۸). مطابق شکل در هر دو آلاینده قسمت‌های شمالی شهر بیشترین تعداد روزهای آلوده را دارند. در واقع از علت‌های اصلی این امر می‌تواند نزدیکی به چشمه شرقی گردو خاک استان و شهرک‌های صنعتی واقع در این بخش از شهر اشاره کرد. کمترین تعداد روزهای آلوده برای هر آلاینده مربوط به بخش‌های مرکزی شهر می‌باشد.

تحلیل تعداد روزهای آلاینده $PM_{2.5}$ و PM_{10} به تفکیک فصلی و سالانه

بررسی تعداد رخداد آلاینده $PM_{2.5}$ و PM_{10} در ایستگاه‌های پایش آلودگی قم (جدول ۳) نشان‌دهنده این است که آلاینده $PM_{2.5}$ در هر سه ایستگاه تعداد رخداد‌های بیشتری (۱۹۴۸ مورد) نسبت به آلاینده PM_{10} (۶۱۸ مورد) دارد که بیشترین رخداد آن در ایستگاه‌های مدیریت بحران و امام گزارش شده است. در مورد آلاینده PM_{10} بیشترین رخداد مربوط به ایستگاه پل حجّتیبه و اداره بحران است. با توجه به جدول ۳ که نشان‌دهنده مجموع تعداد روزهای آلاینده PM_{10} به تفکیک هر فصل در ایستگاه‌های مطالعاتی می‌باشد، در ایستگاه اداره بحران در دوره مورد بررسی در مجموع ۲۲۳ روز آلاینده اصلی این ایستگاه PM_{10} بوده است که بیشترین تعداد آن مربوط به فصل تابستان با ۱۱۲ روز و پس از آن فصل بهار با ۶۷ روز است. در ایستگاه امام در مجموع ۱۲۷ روز آلاینده ایستگاه PM_{10} بوده است که فصل بهار با ۴۹ روز و فصل زمستان با ۳۲ روز دارای بیشترین روز همراه با آلاینده بوده است. در ایستگاه پردیسان در مجموع ۴۴ روز آلاینده ایستگاه، PM_{10} بوده است که بیشترین تعداد آن در فصل تابستان و بهار رخ داده است. در ایستگاه پل حجّتیبه در مجموع ۲۲۶ روز آلاینده ایستگاه، PM_{10} بوده است که بیشترین آن مربوط به فصل بهار با ۹۹ روز و فصل پاییز با ۵۱ روز بوده است.

جدول ۳. تفکیک فصلی تعداد روزهایی که شاخص آلودگی هوا ناشی از آلاینده PM_{10} و $PM_{2.5}$ بوده است.

مجموع	زمستان	پاییز	تابستان	بهار	ایستگاه	آلاینده
۲۲۳	۲	۴۲	۱۱۲	۶۷	اداره بحران	
۱۲۵	۳۲	۲۱	۲۳	۴۹	امام	PM_{10}
۴۴	۲	۱۵	۱۳	۱۴	پردیسان	
۲۲۶	۴۹	۵۱	۹۹	۲۷	پل حجیبه	
۶۱۸	۸۵	۱۲۹	۲۴۷	۱۵۷	مجموع	
مجموع	زمستان	پاییز	تابستان	بهار	ایستگاه	
۸۲۵	۲۰۰	۲۶۶	۱۷۴	۱۸۵	اداره بحران	
۷۸۴	۲۷۷	۱۴۱	۱۴۹	۲۱۷	خیابان امام	$PM_{2.5}$
۳۳۹	۱۱۶	۹۵	۶۰	۶۸	پردیسان	
۱۹۴۸	۵۹۳	۵۰۲	۳۸۳	۴۷۰	مجموع	



شکل ۸. توزیع مکانی تعداد روزهایی که شاخص آلودگی هوا ناشی از آلاینده PM_{10} (الف) و $PM_{2.5}$ (ب).

۰/۰۶ و در ایستگاه امام ۰/۰۲ می‌باشد. همچنین در فصل تابستان مقدار آماره آزمون من-کندال تأیید می‌نماید که آلاینده $PM_{2.5}$ در ایستگاه امام در این فصل نیز روندی افزایشی داشته است. در دو فصل پاییز و زمستان هر سه ایستگاه روند کاهشی آلاینده $PM_{2.5}$ دارند که بیشترین شیب کاهشی مربوط به ایستگاه پردیسان فصل زمستان می‌باشد. در مورد آلاینده PM_{10} در فصل بهار این آلاینده در ایستگاه پردیسان و اداره بحران روندی افزایشی داشته است که شیب افزایشی در ایستگاه پردیسان مقدار ۰/۲۵ است. در فصل

بررسی روند تغییرات PM_{10} و $PM_{2.5}$ در ایستگاه‌های پایش آلودگی شهر قم

به‌منظور بررسی روند و بزرگی شیب این روند در ایستگاه‌های پایش آلودگی شهر قم، آزمون من-کندال و شیب سن اجرا شد. جدول ۴ نشان‌دهنده نتایج آزمون روند من-کندال و شیب سن داده‌های PM_{10} و $PM_{2.5}$ به تفکیک هر فصل در ایستگاه‌های مطالعاتی می‌باشد. در این دوره مطالعاتی آلاینده در فصل بهار در دو ایستگاه امام و پردیسان روند افزایشی داشته است که بزرگی این شیب در ایستگاه پردیسان

آلاینده روند افزایشی داشته‌اند. بنابراین از دلایل این افزایش می‌تواند گردوخاک‌های ناشی از چشمه گردوخاک مرکزی استان و یا گردوخاک‌های با چشمه خارجی ناشی از وزش بادهای غربی در این فصل و یا آلاینده‌های صنعتی و معدنی و همچنین نزدیکی آن به نیروگاه سیکل ترکیبی شهر قم باشد.

تابستان نیز ایستگاه پل حجتیه روندی افزایشی داشته است. در دو فصل پاییز و زمستان همانند آلاینده $PM_{2.5}$ ، این آلاینده روندی کاهشی در ایستگاه‌های مطالعاتی داشته است. نکته قابل توجه در مورد روند افزایشی دو آلاینده یادشده در ایستگاه پردیسان در فصل بهار می‌باشد؛ هرچند این ایستگاه در فاصله دورتری از چشمه‌های گردوخاک نسبت به سایر ایستگاه‌های پایش آلودگی می‌باشد؛ اما در این فصل هر دو

جدول ۴. نتایج آزمون روند من-کندال و شیب سن داده‌های PM_{10} و $PM_{2.5}$ در ایستگاه‌های پایش آلودگی شهر قم.

ایستگاه	زمستان			پاییز			تابستان			بهار		
	MK_statistic	MK_p.value	SS_statistic	MK_statistic	MK_p.value	SS_statistic	MK_statistic	MK_p.value	SS_statistic	MK_statistic	MK_p.value	SS_statistic
PM 10	اداره بحران	-۰/۱۰۰	۰/۰۰۰	-۷/۷۶۰	-۰/۰۸۰	۰/۰۰۰	-۶/۴۹۰	-۰/۰۸۰	۰/۰۰۰	-۳/۳۰۰	-۰/۰۸۱	۰/۲۴۰
	خیابان امام	-۰/۰۲۰	۰/۰۰۰	-۹/۸۶۰	-۰/۰۲۰	۰/۰۰۰	-۱۱/۸۳۰	-۰/۰۸۰	۰/۰۰۰	-۶/۸۷۰	۰/۰۰۰	-۳/۸۳۰
	پردیسان	-۰/۳۵۰	۰/۰۰۰	-۵/۲۷۰	-۰/۶۷۰	۰/۰۰۰	-۱۱/۶۸۰	-۰/۵۲۰	۰/۰۰۰	۶/۹۹	۰/۲۵۰	۲/۸۹۰
	پل حجتیه	-۰/۱۰۰	۰/۰۰۰	-۱۰/۲۴۰	-۰/۰۲۰	۰/۰۰۰	-۲/۸۵۰	-۰/۰۲۰	۰/۰۱۰	۲/۶۸۰	۰/۰۹۰	-۰/۱۳۰
PM 2.5	اداره بحران	-۰/۰۷۰	۰/۰۰۰	-۸/۰۵۰	-۰/۰۳۰	۰/۰۰۰	-۵/۵۸۰	-۰/۰۱۰	۰/۱۰۰	-۱/۶۴۰	۰/۰۲۰	-۲/۳۶۰
	خیابان امام	-۰/۰۲۰	۰/۰۰۰	-۷/۲۷۰	-۰/۰۱۰	۰/۰۲۰	-۲/۴۲۰	-۰/۰۴۰	۰/۰۰۰	۵/۶۰۰	۰/۰۲۰	۴/۸۳۰
	پردیسان	-۰/۲۱۰	۰/۰۰۰	-۶/۷۹۰	-۰/۱۲۰	۰/۰۰۰	-۷/۰۵۰	-۰/۰۵۰	۰/۰۰۰	-۳/۶۸۰	۰/۰۶۰	۲/۲۵۰
	ایستگاه											

روز آلاینده $PM_{2.5}$ رخ داده است که از این تعداد فقط در ۹۶ روز همراه با پدیده گردوخاک بوده است و در مورد آلاینده PM_{10} در مجموع ۲۲۳ روز این آلاینده گزارش شده است که فقط ۷۱ روز آن همراه با پدیده گردوخاک بوده و بیشترین تعداد آن مربوط به فصل تابستان است که جهت باد غالب در این فصل در استان شرقی است و به دلیل نزدیکی ایستگاه به چشمه شرقی گردوخاک در استان مقدار آلاینده در این فصل افزایش می‌یابد. نکته دیگری که از جدول ۲ و ۳ می‌توان استخراج کرد این است در فصل پاییز آلاینده $PM_{2.5}$ با ۲۰۰ روز داده نسبت به آلاینده PM_{10} با ۲ روز داده ثبت شده آلاینده اصلی این ایستگاه می‌باشد. همچنین در این فصل آلاینده PM_{10} در هیچ تاریخی با پدیده گردوخاک روز مشترک نداشته است و آلاینده $PM_{2.5}$ نیز فقط ۳ روز مشترک دارد.

بررسی تعداد روزهای آلاینده PM_{10} و $PM_{2.5}$ همراه با پدیده گردوخاک

جدول ۵ مجموع تعداد روزهایی که شاخص PM_{10} و همراه با پدیده گردوخاک بوده است را به تفکیک هر فصل، در ایستگاه مدیریت بحران نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، در ایستگاه اداره بحران در مجموع ۷۱ روز آلاینده PM_{10} همراه با پدیده گردوخاک بوده است که بیشترین تعداد آن مربوط به فصل تابستان با ۵۲ روز می‌باشد. تعداد روزهای مشترک بین روزهای گردوخاک و $PM_{2.5}$ در ایستگاه اداره بحران در مجموع ۹۶ روز است که بیشترین تعداد روزها مربوط به فصل تابستان و سپس فصل بهار می‌باشد.

با بررسی نتایج حاصل از جدول ۳ و ۵ می‌توان پی برد در ایستگاه اداره بحران در طی دوره آماری مورد بررسی ۸۲۵

وضعیت‌های نامطلوب هر دو آلاینده که همراه با پدیده گردو خاک بوده‌اند، نشان می‌دهد که شاخص $PM_{2.5}$ از ۱۵۵ روز وضعیت نامطلوب ۴۹ روز آن همراه با گردو خاک بوده است و PM_{10} از ۴۱ روز ۲۹ روز همراه با گردو خاک بوده است. به عبارت دیگر آلاینده PM_{10} در بازه زمانی مورد بررسی، ۷۵٪ مواقع همراه با گردو خاک و شاخص $PM_{2.5}$ در ۳۱٪ مواقع همراه با گردو خاک بوده است.

بعلاوه بررسی تعداد روزهایی که شاخص $PM_{2.5}$ و PM_{10} در ایستگاه مدیریت بحران در شرایط نامطلوب قرار داشته، مبین این مطلب است که در کل دوره آماری مورد بررسی در مجموع ۱۵۵ روز شاخص $PM_{2.5}$ در شرایط نامطلوب و شاخص PM_{10} ، ۴۱ روز در شرایط نامطلوب قرار داشته‌اند (جدول ۶). می‌توان گفت در این ایستگاه آلاینده $PM_{2.5}$ آلاینده اصلی می‌باشد. از طرف دیگر بررسی تعداد

جدول ۵. تفکیک فصلی تعداد روزهایی که شاخص PM_{10} و $PM_{2.5}$ ، همراه با پدیده گردو خاک بوده است.

آلاینده	ایستگاه	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	مجموع
PM_{10}	اداره بحران	۹	۵۲	۱۰	-	۷۱
$PM_{2.5}$	اداره بحران	۲۳	۵۶	۱۴	۳	۹۶

جدول ۶. تعداد کل روزهایی که شاخص‌های PM_{10} و $PM_{2.5}$ در شرایط نامطلوب قرار دارند و تعداد روزهای نامطلوبی که همراه با پدیده گردو خاک بوده‌اند.

آلاینده	ایستگاه	تعداد روزهای وضعیت نامطلوب	تعداد روزهای نامطلوب همراه با پدیده گردو خاک
PM_{10}	اداره بحران	۱۵۵	۴۹
$PM_{2.5}$	اداره بحران	۴۱	۲۹

۴. نتیجه گیری

استاندارد USEPA می‌باشد؛ بطوریکه بیشترین غلظت $PM_{2.5}$ مربوط به ایستگاه‌های خیابان امام و مدیریت بحران می‌باشد و بیشترین غلظت PM_{10} مربوط به ایستگاه مدیریت بحران و پل حجتیه می‌باشد. مقایسه نتایج با یافته‌های محققانی از جمله حسونند و همکاران (۲۰۱۵) و حسینی و همکاران (۲۰۱۶) و عزیزی فر و همکاران (۱۳۹۰) همخوانی دارد. کاهش غلظت دو آلاینده بخصوص آلاینده $PM_{2.5}$ در روزهای تعطیل بیانگر این است علاوه بر پدیده گردو خاک که تأثیر مستقیمی بر دو آلاینده PM_{10} و $PM_{2.5}$ دارد. عوامل دیگری از جمله آلاینده‌های انسان‌ساز مانند آلاینده‌های صنعتی (صنایع، نیروگاه‌ها و ...) می‌تواند بر غلظت این دو آلاینده مؤثر باشد؛ به‌طوریکه نتایج حاصل با مطالعه سلیمانی و همکاران (۱۴۰۰) که در تحقیقشان مقایسه بین میزان انتشار ذرات معلق کل منابع ساکن و متحرک در شهر قم را انجام دادند و نتیجه گرفتند از بین منابع ساکن و متحرک بیشترین انتشار ذرات معلق مربوط به منابع ساکن با ۹۶٪ انتشار و از

در این مطالعه به بررسی روند تغییرات غلظت دو آلاینده PM_{10} و $PM_{2.5}$ در ایستگاه‌های پایش آلودگی شهر قم و بررسی ارتباط دو آلاینده یادشده با رخدادها گردو خاک در استان پرداخته شد. برای این کار از آمار داده‌های هواشناسی شامل سمت و سرعت باد و کدهای مربوط به پدیده‌های گردو خاک در ایستگاه شکوهیه، مرکز تحقیقات و نیروگاه حرارتی و همچنین داده‌های مربوط به غلظت دو آلاینده PM_{10} و $PM_{2.5}$ در چهار ایستگاه پایش آلودگی شهر قم شامل ایستگاه مدیریت بحران، خیابان امام، پل حجتیه و پردیسان در بازه زمانی که داده‌های دو آلاینده مذکور در دسترس قرار داشت (بازه زمانی ۲۰۲۴-۲۰۱۷)، استفاده شد. بعلاوه از آزمون ناپارامتریک Mann-Kendall و شیب سن برای تعیین روند و بزرگی آن در داده‌های PM_{10} و $PM_{2.5}$ استفاده شد.

نتایج حاصل از تحقیق گویای آن است غلظت هر دو آلاینده یادشده در همه ایستگاه‌ها در اغلب اوقات سال بیشتر از

است که بیشترین تعداد روزها مربوط به تابستان و سپس بهار می‌باشد.

نتایج آزمون من- کندال و شیب سن نشان داد دو آلاینده $PM_{2.5}$ و PM_{10} در ایستگاه پردیسان در فصل بهار روندی افزایشی دارد که با توجه به جهت غربی باد در این فصل و از طرف دیگر نزدیکی این ایستگاه به نیروگاه سیکل ترکیبی و یا فعالیت و گسیل بیشتر گردوخاک از سمت چشمه غربی استان به این منطقه، می‌تواند از دلایل افزایش غلظت آلاینده‌ها در این ایستگاه باشد.

منابع

1. Department of Environment, Deputy of Human Environment, National Headquarters for Combating Dust Phenomena. (2019). Internal source study of wind erosion, sandstorms and dust in Iran, Vol. 17 (Qom Province). (In Persian)
2. Soleimani, M., Amini, N., Mirghafari, N., & Haghshenas, H. (2021). Inventory of air pollutant emissions from anthropogenic sources in the metropolis of Qom. Tehran University Press. (In Persian)
3. Azizi Far, M., Safdari, M., Nadafi, K., & Tabaraei, Y. (2012). Investigating the relationship between PM_{10} , $PM_{2.5}$, and meteorological parameters in Qom's air. 15th National Environmental Health Congress, Rasht. (In Persian)
4. Azizi Far, M., Nadafi, K., Mohammadian, M., Safdari, M., & Khezayi, M. (2011). Air quality index and concentration of suspended particles in Qom's atmosphere. (In Persian)
5. Abdi Vishkaee, F., Flamant, C., Cuesta, J., Flamant, P., & Khaledifard, H., R., 2011. Multiplatform observations of dust vertical distribution during transport over northwest Iran in the summertime. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 116(D5).
6. Antanasijević, D. Z., Pocajt, V. V., Povrenović, D. S., Ristić, M. Đ., & Perić-Grujić, A. A., 2013. PM_{10} emission forecasting using artificial neural networks and genetic algorithm input variable optimization. Science of the Total Environment, 443, 511-519.

بین این منابع ساکن بیشترین انتشار مربوط به صنایع و نیروگاه حرارتی می‌باشد، تطابق دارد.

بررسی نقشه گلباد سالانه در سه ایستگاه شکوهیه، مرکز تحقیقات و نیروگاه حرارتی نشان می‌دهد باد در هر سه ایستگاه در طی سال جهتی شرقی و غربی دارد و گلباد فصلی برای روزهایی که پدیده گردوخاک در ایستگاه شکوهیه گزارش شده نشان‌دهنده این است که در فصل تابستان، جهت باد شرقی و در سه فصل دیگر غربی است. بررسی گلبادها در روزهایی که شاخص آلودگی هوا در ایستگاه‌های پایش آلودگی در شرایط نامطلوب قرار داشته نشان‌دهنده این است که در این حالت نیز در فصل تابستان جهت بادها شرقی و در سه فصل دیگر بادهای غالب استان جهتی غربی دارند. از نکات دیگری که می‌توان از این گلبادها دریافت این است که سهم گردوخاک در آلودگی‌های شهر قم در فصل تابستان ناشی از گردوخاکی است که از چشمه شرقی گسیل می‌شود. همچنین نکته قابل توجه دیگر این است که در دو فصل پاییز و زمستان در شرایطی که آلاینده هوا (عمدتاً $PM_{2.5}$) در وضعیت نامطلوب قرار داشته، در برخی از موارد پدیده گردوخاک هم گزارش شده است و می‌توان گفت گرچه در این فصول طبق بررسی‌های صورت گرفته، آلاینده‌های صنایع، آلاینده غالب شهر است؛ اما تعدادی از روزهای آلوده، می‌تواند ناشی از گردوخاکی باشد که از سمت غرب وارد شهر می‌شود. نتایج حاصل با نتایج بیگلری و همکاران (۲۰۱۷) که بیان کردند همبستگی معناداری بین ذرات معلق جوی با پارامترهای هواشناسی از جمله سرعت و جهت باد وجود دارد و همچنین بدتر شدن کیفیت هوای قم ناشی از ذرات معلق جوی و گردوخاک می‌باشد، همخوانی دارد.

به‌طور کلی بررسی تعداد روزهایی که مقادیر $PM_{2.5}$ و PM_{10} در شهر بالا بوده، نشان می‌دهد مقدار بالای PM_{10} در ۷۵٪ مواقع با پدیده گردوخاک همراه بوده؛ به‌طوری‌که بیشترین تعداد این روزها مربوط به فصل تابستان می‌باشد. همین‌طور مقدار بالای $PM_{2.5}$ در ۳۱٪ مواقع همراه با گردوخاک بوده

- D., ... & Nafarzadegan, A. R., 2024. Evaluating traditional versus ensemble machine learning methods for predicting missing data of daily PM10 concentration. *Atmospheric Pollution Research*, 15(5), 102063.
15. Khazaei, M., Darejeh, M., Beigi, A. M., Fahiminia, M., Azizifar, M., Karami, G., ... & Yousefi, N., 2016. Patterns of annual fluctuation of dust concentrations along with meteorological parameters: A case study in Qom province, central Iran. *Journal of Air Pollution and Health*, 1(2), 99-110.
 16. Littmann, T., 1991. Dust storm frequency in Asia: climatic control and variability. *International Journal of Climatology*, 11(4), 393-412.
 17. Middleton, N. J., 1986. A geography of dust storms in South-west Asia. *Journal of Climatology*, 6(2), 183-196.
 18. Sen, P. K., 1968. Asymptotically efficient tests by the method of n rankings. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 30(2), 312-317.
 19. Theil, H., 1950. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. *Indagationes mathematicae*, 12(85), 173.
 20. US-EPA., 2022. Primary and Secondary Standards for Fine Particle Pollution (PM2.5) and Coarse Particle Pollution (PM10). United States Environmental Protection Agency.
 21. Weber, S. A., Insaf, T. Z., Hall, E. S., Talbot, T. O., & Huff, A. K., 2016. Assessing the impact of fine particulate matter (PM2.5) on respiratory-cardiovascular chronic diseases in the New York City Metropolitan area using Hierarchical Bayesian Model estimates. *Environmental research*, 151, 399-409.
 22. Xu, X., & Ren, W., 2019. Prediction of air pollution concentration based on mRMR and echo state network. *Applied Sciences*, 9(9), 1811.
 7. Apte, J. S., Brauer, M., Cohen, A. J., Ezzati, M., & Pope III, C. A., 2018. Ambient PM2.5 reduces global and regional life expectancy. *Environmental Science & Technology Letters*, 5(9), 546-551.
 8. Biglari, H., Geravandi, S., Mohammadi, M. J., Porazmey, E. J., Chaturkova, R. Z., Khaniabadi, Y. O., ... & Yari, A. R., 2017. Relationship between air particulate matter and meteorological parameters. *Fresenius Environ Bull*, 26(6), 4047-56.
 9. Engel-Cox, J., Oanh, N. T. K., van Donkelaar, A., Martin, R. V., & Zell, E., 2013. Toward the next generation of air quality monitoring: Particulate Matter. *Atmospheric Environment*, 80, 584-590.
 10. Ginoux, P., Prospero, J. M., Gill, T. E., Hsu, N. C., & Zhao, M., 2012. Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products. *Reviews of Geophysics*, 50(3).
 11. Givehchi, R., Arhami, M., & Tajrishy, M., 2013. Contribution of the Middle Eastern dust source areas to PM10 levels in urban receptors: Case study of Tehran, Iran. *Atmospheric environment*, 75, 287-295.
 12. Hassanvand, M.S., Naddafi, K., Faridi, S., Nabizadeh, R., Sowlat, M.H., Momeniha, F., Gholampour, A., Arhami, M., Kashani, H. and Zare, A., 2015. Characterization of PAHs and metals in indoor/outdoor PM10/PM2.5/PM1 in a retirement home and a school dormitory. *Science of the total environment*, 527: 100-110.
 13. Hoseini, M., Yunesian, M., Nabizadeh, R., Yaghmaeian, K., Ahmadkhaniha, R., Rastkari, N., Parmy, S., Faridi, S., Rafiee, A. and Naddafi, K., 2016. Characterization and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban atmospheric Particulate of Tehran, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(2): 1820-1832.
 14. Kalantari, E., Gholami, H., Malakooti, H., Eftekhari, M., Saneei, P., Esfandiarpour,