

Original Article

Study and investigating the effect of meteorological quantities on the pollution potential of Arak city

Mahmood Omid¹, Saviz Sehat Kashani^{2*}, Mehdi Rahnama², Noshin Khodam², Faezeh Noori²

Gholamreza Moradi¹, Mohammadreza Ahmadi¹

¹ Markazi Province Meteorology Office, Arak, Iran

² Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science, Tehran, Iran

Introduction: Urbanization and air pollution, especially in megacities, are major issues today. It's crucial to understand the factors that contribute to this problem, and reducing the associated risks is a top priority for city and country officials. Arak City in Iran is one of the most polluted cities in the country, with industrial activities being the main cause of pollution. This article aims to investigate the meteorological factors that contribute to the pollution potential of Arak City, including wind speed, temperature, pressure, precipitation, boundary layer height, vertical velocity of the atmosphere at the levels of 825, 700, and 500 mb, and air conditioning coefficient. The study ultimately confirms Arak City's reputation as one of the most polluted cities in Iran.

Material and Methods: In this article, from the 20-year statistics of the Arak observation station (1380-1399) for the quantities of the earth's surface, including wind speed, temperature, pressure, and precipitation, as well as the 20-year data from 2001 to 2020, the reanalyzed data of Era5 from the database ECMWF has been used for upper-level quantities. To check other atmospheric quantities, including boundary layer height, wind speed in the upper atmosphere, and vertical wind at 825, 700, and 500 millibar levels, Era5 reanalyzed data with a resolution of 0.25 degrees will be used daily, which is from the ECMWF database. has been extracted and examined.

Results and Discussion: The results indicate that low temperatures in the cold period of the year, as well as low night and morning temperatures in the cold months of the year, can cause temperature inversion and increase the retention potential of atmospheric pollutants. The average wind speed indicates the low and insignificant effect of the wind, especially in the cold days of the year and in the morning and night hours. Daily per capita rainfall of less than 1 mm does not have a significant effect in reducing pollutants. The investigation of meteorological quantities in the upper levels of the atmosphere shows that the height of the boundary layer fluctuates between 200 and 1400 meters daily, which is less than 400 meters in late November to mid-Bahan. 500 mb showed that in the first months of spring and autumn and winter, we see atmospheric subsidence at the level of 825 and 700 mb, and at 00, 03 and 21 UTC on the hot days of the year, at the level of 825 mb. is showing. At the 500 mb level, there is a tendency to climb with small amounts, which is not as effective as the other two altitude levels. Examining the daily air ventilation

* Corresponding Author Email Address: savizsehat@yahoo.com

coefficient also indicates its high fluctuations throughout the year from 800 square meters per second to 7500 square meters per second. The number of hourly changes also indicates fluctuation in the range of 22000 to around zero. The maximum ventilation coefficient at 12 UTC is between 3000 and 20000 m²/s. At 00:00, 03:00, and 21:00 UTC, the ventilation coefficient is less than 1500 square meters per second on all days of the year. Also, according to the location of Arak and Shazand and the study of the winds of these two cities, there is a possibility of the transfer of atmospheric pollutants from Shazand to Arak, especially in spring, autumn, and winter.

Conclusion: Overall, the study of weather patterns both at ground level and in higher parts of the atmosphere highlights the risk of pollution buildup and low ventilation in Arak City, particularly during the colder months and during nighttime and early morning hours. As a result, it is important for policies to prioritize the establishment of low-pollution industries and the management of sources of pollution, especially during the aforementioned times.

Keywords: Arak, Pollution Potential, Ventilation coefficient, Boundary layer

مطالعه و بررسی تأثیر کمیت‌های هواشناسی بر پتانسیل آلودگی شهر اراک

محمود امیدی^۱، ساویز صحت کاشانی^۲، مهدی رهنما^۲، نوشین خدام^۲، فائزه نوری^۲، غلامرضا مرادی^۱

محمدرضا احمدی^۱

^۱ اداره کل هواشناسی استان مرکزی، اراک، ایران

^۲ پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

سابقه و هدف: توسعه شهرنشینی و آلودگی هوای شهری به‌ویژه در کلان‌شهرها به‌عنوان یکی از معضلات جامعه بشری مطرح می‌شود و تلاش برای شناخت عوامل تأثیرگذار در مطالعات علمی اهمیت دوچندانی یافته و کاهش مخاطرات آن در دستور کار ویژه مسئولان و سیاست‌گذاران شهری و کشوری قرار دارد. شهر اراک یکی از هشت کلان‌شهر آلوده ایران به‌حساب می‌آید که آلودگی آن به‌طور عمده تحت تأثیر فعالیت صنایع است. هدف این مقاله مطالعه و بررسی کمیت‌های هواشناسی اثرگذار بر پتانسیل آلودگی شهر اراک شامل سرعت باد، دما، فشار، بارش، ارتفاع لایه‌مرزی، سرعت قائم جو در ترازهای ۸۲۵، ۷۰۰ و ۵۰۰ میلی‌باری و ضریب تهویه هوا به‌عنوان یکی از آلوده‌ترین شهرهای کشور تعیین شده است.

مواد و روش‌ها: در این مقاله از آمار ۲۰ ساله ایستگاه هم‌دیدگی اراک (۱۳۸۰-۱۳۹۹) برای کمیت‌های سطح زمین شامل سرعت باد، دما، فشار و بارش و همچنین از داده‌های ۲۰ ساله (۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰) باز تحلیل شده ERA5 از پایگاه داده‌های ECMWF برای کمیت‌های سطوح فوقانی استفاده شده است. برای بررسی سایر کمیت‌های جوی شامل ارتفاع لایه‌مرزی، تندی باد در ترازهای بالای جو و باد قائم در ترازهای ۸۲۵، ۷۰۰ و ۵۰۰ میلی‌باری نیز از داده‌های باز تحلیل شده ERA5 با تفکیک ۰/۲۵ درجه به‌صورت روزانه استفاده خواهد شد.

نتایج و بحث: نتایج بررسی تأثیر کمیت‌های هواشناسی بر پتانسیل آلودگی هوای شهر اراک نشان داد که کمیت دما می‌تواند به‌طور مستقیم در کیفیت هوای این شهر اثرگذار باشد. به‌طوری‌که دماهای پایین و کاهش دمای شبانه به‌ویژه در فصول سرد سال می‌تواند سبب شکل‌گیری وارونگی و افزایش پایداری در نزدیکی سطح زمین شود. این وضعیت سبب کاهش ارتفاع لایه‌مرزی و کاهش ضریب تهویه شده و در نتیجه بالارفتن پتانسیل نگهداشت آلاینده‌های جوی را به‌همراه دارد. سرعت قائم جو نیز در فصل‌های سرد سال سبب فرونشینی شده که باعث افزایش میزان آلاینده‌ها می‌شود. با این حال نتایج تحلیل سرعت باد و سرانه بارشی نشان داد که این دو کمیت تأثیر کم و ناچیزی در کاهش آلاینده‌ها در سطح شهر اراک دارند. همچنین با توجه به موقعیت مکانی شهر اراک و سازند و بررسی گل‌باد این دو شهر، احتمال انتقال آلاینده‌های جوی از سازند به اراک به‌ویژه در فصول بهار، پاییز و زمستان وجود دارد.

† Corresponding Author Email Address: savizsehat@yahoo.com

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی بررسی کمیت‌های هواشناسی سطح زمین و سطوح فوقانی جو حاکی از پتانسیل بالای نگهداشت آلودگی و کم بودن ضریب تهویه شهر اراک است که به‌ویژه در ماه‌های سرد سال و در ساعت‌های شبانه و صبحگاهی قابل توجه‌تر است. بنابراین، سیاست‌ها می‌بایست بر استقرار صنایع با آلاینده‌گی کم باشد و مدیریت منابع آلاینده به‌طور خاص در ایام سرد سال و ساعات شبانه و صبحگاهی می‌بایست مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: اراک، پتانسیل آلودگی، ضریب تهویه، لایه‌مرزی

مقدمه

یکی از موضوعات مهم و ضروری در زمینه سلامت شهروندان در کلان‌شهرها موضوع آلودگی هوا است. آلودگی هوا زمانی رخ می‌دهد که گازها، ذرات گردو خاک، دود یا بو وارد جو شود و برای انسان، حیوانات و گیاهان مضر باشد (چوداری، ۲۰۱۳). این تغییرات می‌توانند از طریق فرآیندهای طبیعی مانند خروج ذرات از آتشفشان‌ها یا گردبادهای صحرائی یا از طریق فرایند مصنوعی ناشی از کاربردهای مختلف صنعتی و حمل‌ونقل ایجاد شوند (اله آبادی و احمدی آسور، ۱۳۹۰). علل آلودگی هوا به عوامل مختلفی از جمله انتشار، مقیاس محلی و همدیدی، شرایط جوی، شرایط عوارض زمینی، فرآیندهای شیمیایی جو، مناطق اطراف منبع انتشار و فصل سال بستگی دارد (حسینی بالام و حجازی، ۲۰۱۲). بهترین شرایط برای پخش آلاینده‌ها معمولاً با ناپایداری شدید و استقرار یک لایه آمیزش ضخیم همراه است. این موضوع در شرایط هوای آفتابی در ساعات روز، به‌ویژه در تابستان‌ها رخ می‌دهد. در حالی که نامطلوب‌ترین شرایط زمانی حاصل می‌شود که وارونگی دمایی وجود داشته و لایه مجاور سطح زمین پایدار باشد. در این اوقات تلاطم سرکوب شده و حرکات عمودی به‌گونه‌ای مؤثر تضعیف می‌شود (اسکورو، ۱۳۸۰).

گاسمن و مازئو (۲۰۰۰) در پژوهشی به بررسی پتانسیل آلودگی هوا در آرژانتین پرداختند و از پتانسیل آلودگی هوا به‌عنوان معیاری از شرایط جوی که قادر به انتقال و رقیق کردن آلاینده‌ها در هوا، صرف‌نظر از وجود منابع آلاینده تعریف کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که با استفاده از ارتفاع اختلاط و باد می‌توان پتانسیل آلودگی هوا را تعیین کرد. در این مقاله یک تحلیل آماری از ارتفاع اختلاط و باد، به‌منظور تعیین مناطق با تهویه جو بالا یا ضعیف در آرژانتین، ارائه شده است. بررسی یک مطالعه موردی از آلودگی شدید هوا در ۴ تا ۹ دسامبر ۲۰۱۳ در دلتای رودخانه یانگ تسه توسط خو و همکاران (۲۰۱۶) نشان داد شرایط سکون جو که با سرعت کم باد سطحی، وارونگی دمایی در لایه‌مرزی سیاره‌ای و سامانه پرفشار ضعیف و نیز رخداد مه همراه است به تجمع آلاینده‌ها منجر می‌شود. کایس و همکاران (۲۰۱۹) با ذکر اینکه کمیت‌های هواشناسی نقش بسزایی در تأثیرگذاری بر کیفیت هوای محیط شهری دارند و از آنجایی که داکا، پایتخت

بنگلادش، یکی از نقاط معروف آلودگی هوا در میان کلان‌شهرهای جهان است، تأثیرات بالقوه هواشناسی بر معیارهای آلاینده هوا را برای این کلان‌شهر مورد مطالعه قرار دادند. اوجی و آدامو (۲۰۲۰) نیز در هندوستان با مطالعه همبستگی بین کمیت‌های هواشناسی و غلظت آلودگی نشان دادند که غلظت آلاینده‌ها در جو در شرایط افزایش بارندگی، دمای پایین و افزایش رطوبت در فصل مرطوب نسبت به فصل خشک کمتر است. علاوه بر این، تحلیل همبستگی پیرسون از آلاینده‌ها و متغیرهای هواشناسی به برقراری ارتباط قوی بین دما، رطوبت نسبی، بارش و غلظت آلاینده در هر دو فصل خشک و مرطوب اشاره می‌کند. بررسی ارتباط احتمالی بین آلودگی هوا و متغیرهای هواشناسی در حوضه رودخانه سیوک در ترانسیلوانیا، معروف به قطب سرد رومانی توسط بودور و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد که آلاینده‌ها در طول دوره‌های گرم‌تر، به‌ویژه در تابستان، غلظت‌های کمتری را نشان می‌دهند و غلظت‌های بالاتر قابل توجهی در فصل زمستان ناشی از استفاده از وسایل گرمایشی به دلیل تغییرات فصلی در مصرف انرژی (سوزاندن زیست‌توده) و پایداری جو مشاهده شد. ژن و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی، مشاهدات ساعتی بارش، باد و غلظت PM10 و PM2.5 در شهر کینه‌واندا در کشور چین را طی سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بارش دارای اثر مهار مرطوب معینی روی PM2.5 و PM10 است و اثر مهاری آن روی PM10 بیشتر از PM2.5 است. یانسویی و همکاران (۲۰۲۰)، در پژوهشی با عنوان یافتن رابطه بین آلودگی هوا و شرایط آب‌وهوایی در چین به این نتیجه رسیدند که تأثیر شرایط هواشناسی بر غلظت آلاینده هوا با نوع آلاینده تفاوت دارد و همچنین میزان تأثیر در مناطق مختلف متفاوت است. بااینکه غلظت آلاینده‌های هوا در بیشتر ایستگاه‌ها تحت تأثیر عوامل متعدد هواشناسی قرار گرفت اما میزان تأثیر کمیت‌های هواشناسی به نوع آلاینده‌ها و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها نیز بستگی دارد. ویکولسکو و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای ارتباط کمیت‌های هواشناسی (دما، رطوبت نسبی، تابش مستقیم) و تغییر غلظت NO2 در یک محیط شهری در رومانی را مورد بررسی قرار دادند. به‌طور کلی مقدار NO2 در جو نزدیک به زمین، در تابستان کمینه و در اواخر پاییز زمستان در بیشتر سال‌ها بیشینه است. همچنین ترافیک عامل مهمی در آلودگی جوی NO2 در ساعات روز است.

نتایج پژوهش کرم و همکاران (۱۳۹۳) نشان می‌دهد که شهر اراک از نظر عوارض زمینی شرایط خاصی را دارا است به‌طوری‌که دشت اراک توسط یک سلسله ارتفاعات محدود شده و چاله طبیعی بسته‌ای را پدید آورده است. نوروزی و شمسی‌پور (۱۳۹۴) در پژوهشی با استفاده از مدل متوسط مقیاس آلودگی هوا (TAPM) به بررسی الگوی پخش آلاینده‌ها در شهر اراک پرداختند. آن‌ها دو روز از دوره گرم سال و دو روز از دوره سرد سال با شرایط هوای آرام و با شرایط وجود باد و داده‌های منتشرشده از نیروگاه برق شازند در جنوب غرب اراک را به مدل معرفی کردند. نتیجه حاکی از آن بود که در شرایط وزش باد و حالت ناپایدار جوی، جریان باد به‌صورت افقی و قائم موجب انتقال آلاینده‌ها به مناطق دورتر شده

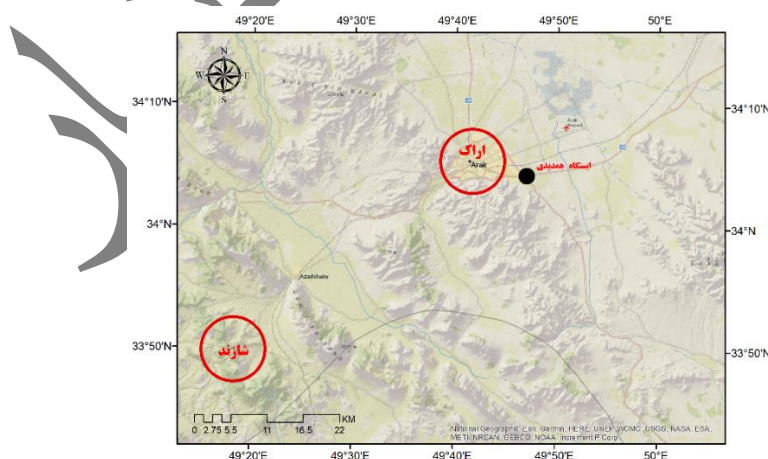
و تعدیل آلودگی را سبب می‌شود؛ اما در شرایط هوای آرام با گرم شدن سطح زمین و جو مجاور آن، جریان‌های همرفتی در سطح زمین ایجاد شده و منجر به تعدیل آلودگی هوا می‌شود. نتایج بررسی شاخص آلودگی در سال ۱۳۹۰ توسط کرمانی و همکاران (۱۳۹۵) نشان داد که بر اساس شاخص بهداشت کیفیت هوا، میزان آلودگی هوا در هفت کلان‌شهر کشور در وضعیت نامناسبی قرار دارد و بر این اساس کیفیت هوا در شهرهای اهواز، اراک، تهران، اصفهان، شیراز، تبریز و مشهد به ترتیب در ۸۵، ۴۳، ۴۷، ۶۰، ۷۰، ۷۳ و ۲۹ درصد از روزها از حد استاندارد تجاوز کرده است. بادام فیروز و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از مدل‌سازی آلودگی هوا توسط مدل ADMS اثر انتشار ذرات معلق و گازهای ناشی از فعالیت‌های صنایع مختلف بر محیط‌زیست شهر اراک را برآورد کردند. نتایج نشان داد که در انتشار گاز CO صنایع سهم کمتری نسبت به حمل‌ونقل دارند در حالی که سهم قابل توجهی در انتشار NO₂ و SO₂ را دارا هستند. برهانی و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از ترکیب محصولات سنجش‌ازدور شامل چگالی ستون ازن از سنجنده سنتینل ۵ همراه با کمیت‌های دما، سرعت باد و نم و ویژه و نیز اطلاعات جغرافیایی و جمعیت استان تهران، آثار آلودگی ازن بر اقلیم شهری و وضعیت پوشش گیاهی در ۱۶ شهرستان این استان را بررسی کردند. نتایج نشان داد یک روند فصلی در تغییرات چگالی ازن در تمام مناطق وجود دارد به طوری که بیشترین مقادیر در فصل گرم و کمترین آن در فصل سرد سال به دست آمد. همچنین از نظر موقعیت جغرافیایی بیشترین مقادیر در شهرستان‌های شهریار و پاکدشت و کمترین آن در شهرستان شمیرانات ثبت شده است. علاوه بر این، یک همبستگی مثبت بین چگالی ستون ازن و شاخص پوشش گیاهی به دست آمد، در حالی که همبستگی بین چگالی ستون ازن با سرعت باد، نم و ویژه و دما منفی است. با توجه به مضرات و آسیب‌های زیست‌محیطی انتشار ذرات معلق، برهانی و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای به بررسی و تعیین غلظت PM_{2.5} و PM₁₀ و تأثیر کمیت‌های هواشناسی بر آن در چهار ایستگاه در کارخانه سیمان کرمان طی فصول مختلف سال پرداختند. نتایج حاکی از آن است که بیشینه مقادیر غلظت ذرات معلق در سال‌های مختلف در مکان‌های متفاوتی مشاهده می‌شود. همچنین افزایش غلظت ذرات معلق با افزایش رطوبت نسبی و بارندگی مشاهده شد.

بررسی مطالعات و طرح‌های تحقیقاتی انجام‌شده در خصوص آلودگی هوای شهر اراک نشان داد که منابع آلاینده، سیاهه انتشار آلاینده‌ها و برخی کمیت‌های هواشناختی همچون سرعت باد مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این در حالی است که علاوه بر منابع آلاینده، عوامل دیگری از جمله پتانسیل آلوده‌پذیری، تأثیرپذیری منطقه، ویژگی‌های اقلیمی و کمیت‌های هواشناسی نیز در افزایش غلظت آلاینده‌ها از اهمیت بسزایی برخوردارند که این موضوع تاکنون برای شهر اراک مطالعه نشده است. در مکان‌یابی مناطق صنعتی و شهری توجه به ضریب تهویه هوا و پتانسیل آلودگی هوای منطقه ضرورت دارد. عدم توجه به عوامل مذکور، وضعیت تهویه‌پذیری شهر و همچنین تغییرات زمانی تهویه‌پذیری می‌تواند با

تحلیل اشتباه منجر به تصمیمات نادرست در مقوله آلودگی هوا، به ویژه هنگام عکس‌العمل‌های فوری و کوتاه‌مدت در مواقع هشدار و نیز در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت شود. همان‌طور که اشاره شد آنچه کمتر مورد توجه قرار گرفته پتانسیل نگهداشت آلاینده‌های جوی با استفاده از کمیت‌های جوی به‌عنوان یک ویژگی اقلیمی و صرف‌نظر از منابع آلاینده در یک منطقه است. بنابراین این مقاله با هدف شناسایی کمیت‌های هواشناسی تأثیرگذار بر پتانسیل آلودگی، شناسایی کمیت‌های جوی و پتانسیل آلودگی از نظر پراکنش زمانی و تحلیل صحیح وضعیت آلودگی و عوامل آن در شهر اراک با هدف یاری به مدیریت منابع آلاینده تهیه شده است.

منطقه مورد مطالعه

شهر اراک که در ۴۹ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی و ۳۴ درجه و ۰۰ دقیقه شمالی، با ارتفاع ۱۷۰۰ متر بالاتر از سطح دریا واقع شده است و به دلیل حضور بسیاری از صنایع یکی از شهرهای صنعتی مهم در ایران است (صالحی و همکاران، ۲۰۲۱ و قهرودی، ۲۰۱۶). موقعیت مکانی و تصویر ماهواره‌ای شهر اراک، شازند و ایستگاه هواشناسی اراک در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌طور که در تصویر ماهواره مشاهده می‌شود ارتفاعات این منطقه به‌گونه‌ای است که فلات اراک را احاطه کرده و محیط طبیعی متنوعی را شکل داده است. این شهر در کانون همگرایی دو رشته‌کوه غربی و جنوبی در مدخل دره‌ای که ارتفاعات را از هم جدا می‌کند، قرار گرفته است. تأثیرات این نوع عوارض زمینی ویژه باعث محبوس شدن شهر اراک توسط ارتفاعات و مانع خروج آلودگی هوا از شهر می‌شود و همچنین صنایع در مسیر بادهای غالب و بادهای محلی شرقی قرار گرفته و باعث ورود آلودگی هوا به داخل شهر می‌شود.



شکل ۱- موقعیت مکانی شهر اراک، شازند و ایستگاه هواشناسی اراک

Figure 1. Location and satellite image of Arak city, Shazand and Arak meteorological station

مواد و روش‌ها

در این مقاله از آمار ۲۰ ساله ایستگاه همدیدی اراک (۱۳۸۰-۱۳۹۹) برای کمیت‌های سطح زمین شامل سرعت باد، دما، فشار و بارش و همچنین داده‌های ۲۰ ساله ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ داده‌های باز تحلیل شده Era5 از پایگاه داده‌های ECMWF (CDS, 2017) برای کمیت‌های سطوح فوقانی استفاده شده است. برای بررسی سایر کمیت‌های جوی شامل ارتفاع لایه‌مرزی، تندی باد در ترازهای بالای جو و باد قائم در ترازهای ۸۲۵، ۷۰۰ و ۵۰۰ میلی باری از داده‌های باز تحلیل شده Era5 با تفکیک ۰.۲۵ درجه به صورت روزانه استفاده خواهد شد که از پایگاه داده ECMWF استخراج و مورد بررسی قرار گرفته است. انتخاب تراز ۸۲۵ میلی باری به دلیل شرایط ارتفاعی منطقه است که تقریباً هم‌ارتفاع با این تراز است. روند تغییرات کمیت‌های مذکور به صورت روزانه، ماهانه و فصلی در ۸ ساعت سینوپ (UTC) ۰۰:۰۰، ۰۳:۰۰، ۰۶:۰۰، ۰۹:۰۰، ۱۲:۰۰، ۱۵:۰۰، ۱۸:۰۰، ۲۱:۰۰ مورد بررسی قرار گرفته و میانگین شبانه‌روزی، ماهانه و فصلی تحلیل شده است. همچنین ضریب تهویه هوا با توجه به ارتفاع لایه‌مرزی و متوسط سرعت باد در طول لایه‌مرزی محاسبه و نمودارهای مربوطه تهیه و مورد تحلیل قرار گرفته است. سرعت باد در لایه‌های جو بر اساس مؤلفه‌های u و v از داده‌های باز تحلیل شده Era5 است که برای به دست آوردن متوسط سرعت باد از رابطه ذیل استفاده می‌شود (هولتون، ۲۰۰۴).

$$V = \sqrt{v^2 + u^2} \quad (1)$$

ضریب تهویه حاصل ضرب ارتفاع عمق لایه‌مرزی و میانگین سرعت باد در همان ارتفاع است. از آنجاکه سرعت باد در ارتفاع متغیر است لذا متناسب با هر ارتفاع یک سرعت باد خواهیم داشت و رابطه حاصل برای محاسبه ضریب تهویه (چان، ۲۰۱۲) به شکل زیر خواهد بود.

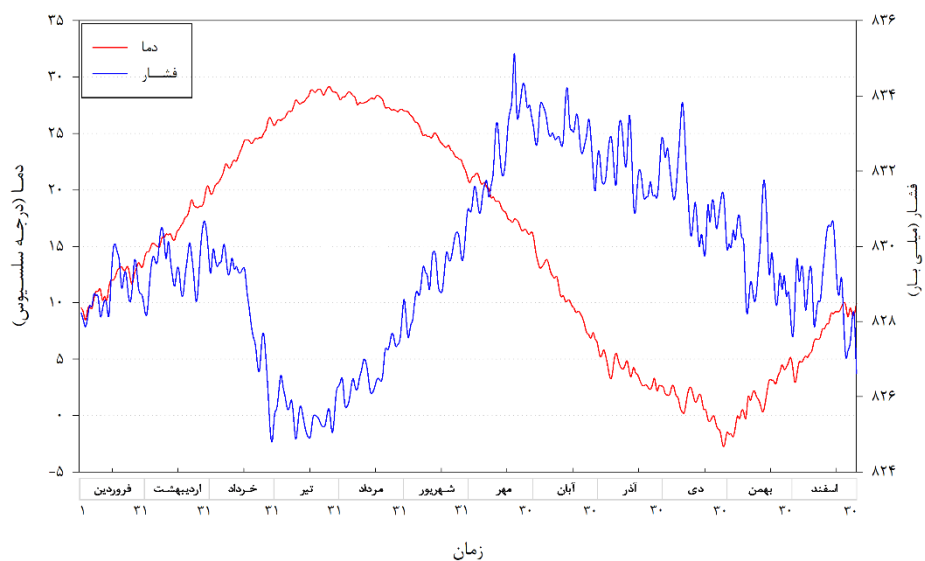
$$VC = Z_i * U \quad (2)$$

که در آن Z_i ارتفاع لایه‌مرزی جوی برحسب متر و U متوسط سرعت باد (متر بر ثانیه) در لایه‌مرزی است. در این مقاله به طور مختصر به امکان جابجایی آلودگی از نقاط دیگر به شهر اراک پرداخته شده است. البته بررسی دقیق این امر نیاز به تحقیق گسترده دارد. یکی از موارد مهم انتقال آلودگی به شهر اراک که بسیار مورد بحث است، امکان جابجایی آلودگی شهر شازند به این شهر است. با توجه به موقعیت شهر شازند و واقع شدن در جنوب غربی شهر اراک بررسی گلباد شهر شازند می‌تواند جهت انتشار آلاینده‌ها را نشان دهد. در این مقاله داده مورد استفاده جهت ترسیم گلباد شازند در تراز ارتفاعی ۸۰۰ میلی بار از داده‌های history+ سایت meteoblue استفاده شده است که در آن تنها داده‌های سال ۲۰۱۹ در قسمت Era5 به صورت آزاد در دسترس است.

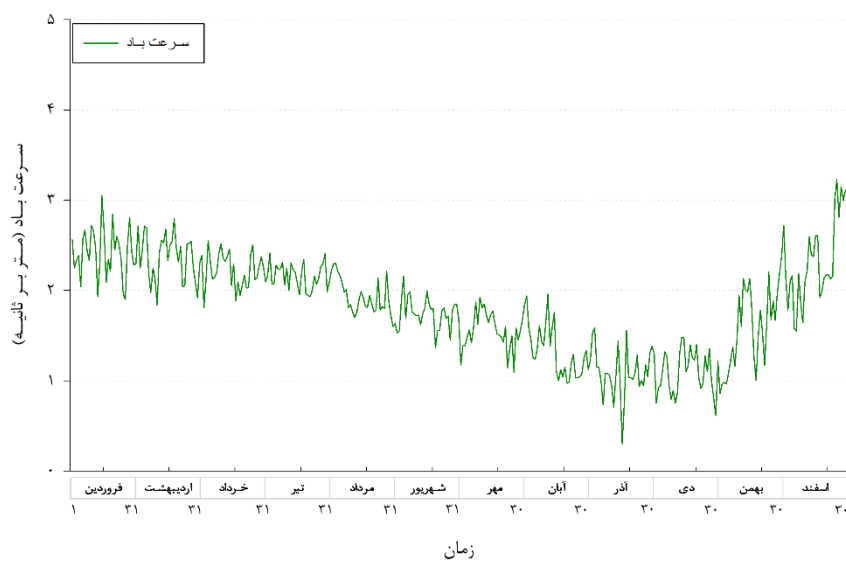
نتایج و بحث

بررسی روند میانگین شبانه‌روزی کمیت‌های مورد مطالعه

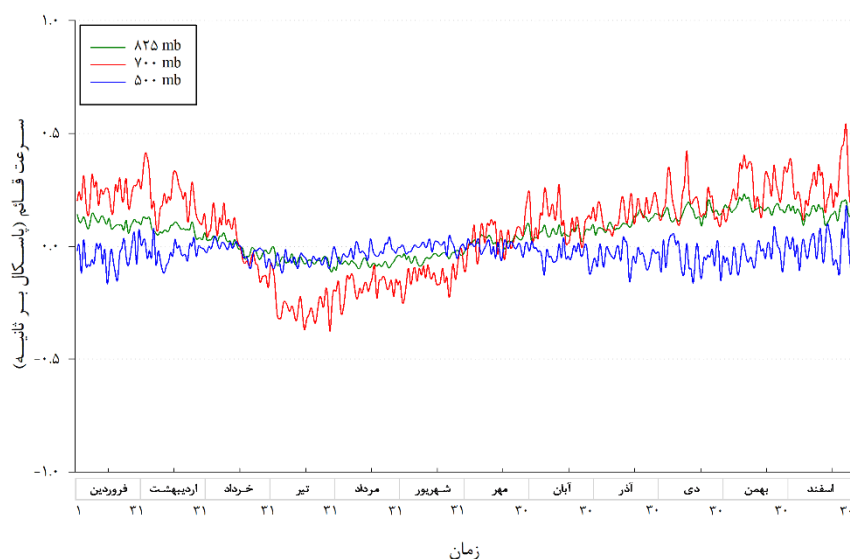
شکل ۲ روند تغییرات میانگین دمای روزانه و فشار را در بازه زمانی ۱۳۸۰-۱۳۹۹ در شهر اراک نشان می‌دهد. بیشینه میانگین دما در روزهای پایانی تیرماه و ابتدای مردادماه حدود ۲۹ درجه سلسیوس است. کمینه میانگین دما نیز در اواخر دی‌ماه حدود ۲/۵- درجه سلسیوس است. از ابتدای سال تا اوایل آبان میانگین دما بیش از ۱۰ درجه سلسیوس است و پس از آن تا پایان سال میانگین دما کمتر از ۱۰ درجه سلسیوس است. متوسط دمای کمتر از ۱۰ درجه سلسیوس در دوره سرد سال و در بازه آذرماه تا اسفندماه کمتر از ۵ درجه سلسیوس در شرایط پایدار جوی عدم شکل‌گیری جریانات همرفتی و جابجایی را سبب می‌شود. دامنه تغییرات میانگین فشار در طول روزهای سال بین ۸۲۵ تا ۸۳۵ میلی بار است. بیشترین میانگین فشار روزانه در اواسط مهرماه است و کمترین مقادیر در اواخر خردادماه است. میانگین فشار در روزهای اواسط مهر تا اواخر دی‌ماه بالا است که حاکی از عدم امکان شکل‌گیری جریانات همرفتی است. به‌طور میانگین سرعت باد حدود ۳ متر بر ثانیه است (شکل ۳). بیشینه میانگین سرعت باد در روزهای ابتدایی و پایانی سال است. کمینه میانگین سرعت باد نیز از اوایل مهر تا اواخر بهمن‌ماه در حدود ۱/۵ متر بر ثانیه و گاه کمتر است. مقادیر کم میانگین سرعت باد در شهر اراک حاکی از امکان جابجایی کم آلودگی‌ها توسط باد سطحی است. سرعت کم باد در ساعت‌های شبانه و صبحگاهی و افزایش کم متوسط سرعت باد در ساعت‌های روزانه در زمان سرد سال موجب افزایش پتانسیل نگهداشت آلاینده و جابجایی کمتر آن‌ها در طول روز می‌شود. در نمودار شکل ۴ تغییرات روزانه متوسط سرعت قائم جو در تراز ۸۲۵، ۷۰۰ و ۵۰۰ میلی‌بار آمده است. همان‌طور که در شکل مشخص است تغییرات فرونشینی جو در تراز ۷۰۰ میلی‌بار بیشتر از دو تراز فشاری ۸۲۵ و ۵۰۰ میلی‌باری است. بررسی فرونشینی جو در تراز ارتفاعی ۷۰۰ میلی‌باری در بازه زمانی فروردین تا اواسط خرداد و همچنین از اواخر شهریور تا پایان سال حاکی از فرونشینی جو است و در بازه اواسط خرداد تا مهرماه میل به صعود در جو وجود دارد. تراز ارتفاعی ۵۰۰ میلی‌باری نسبت به دو تراز ارتفاعی دیگر بیشتر میل به خنثی بودن وجود دارد. تراز ارتفاعی ۸۲۵ میلی‌باری نیز با مقادیر کمتری، روندی شبیه تراز ۷۰۰ میلی‌باری دارد؛ در بازه اواسط خرداد تا مهرماه میل کمی به صعود وجود دارد و در سایر روزهای سال در این تراز ارتفاعی میل به فرونشینی جو وجود دارد.



شکل ۲- متوسط تغییرات روزانه دما (آبی) و تغییرات متوسط روزانه فشار (قرمز) طی سال‌های (۱۳۸۰-۱۳۹۹)
Figure 1. Average daily changes in temperature (blue) and average daily changes in pressure (red) during the years (1380-1399)



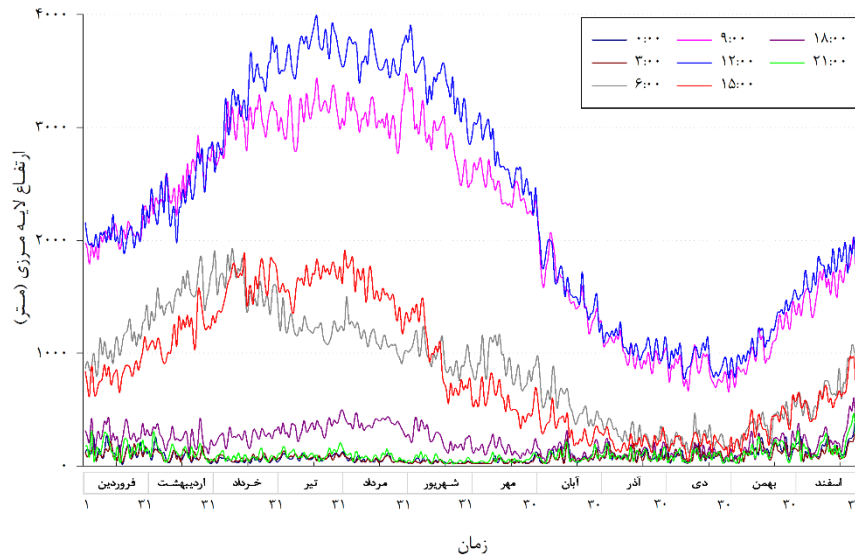
شکل ۳- تغییرات روزانه متوسط سرعت باد طی سال‌های (۱۳۸۰-۱۳۹۹)
Figure 2. Average daily changes of wind speed during the years (1380-1399)



شکل ۴- تغییرات روزانه متوسط سرعت قائم جو در تراز ۸۲۵ (سبز)، ۷۰۰ (قرمز) و ۵۰۰ (آبی) میلی بار طی سال‌های (۱۳۸۰-۱۳۹۹)
Figure 3. Average daily changes of atmospheric vertical velocity at the level of 825 (green), 700 (red) and 500 (blue) mb during the years (1380-1399)

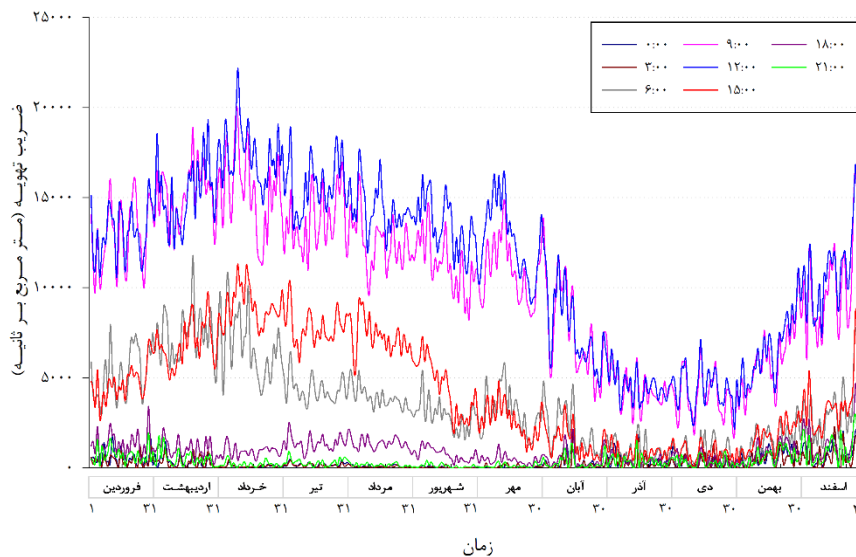
تغییرات قابل توجه ارتفاع لایه‌مرزی شهر اراک طی ساعات ۰۰ تا ۲۱ UTC در شکل ۵ به خوبی نمایان است. به‌طور کلی تغییرات میانگین ارتفاع لایه‌مرزی در طول سال در ساعت شب ناچیز است، در حالی که با توجه به تغییرات دمایی، در طی روز تغییرات قابل توجهی مشاهده می‌شود. در طول سال میزان تغییرات ارتفاع متوسط لایه‌مرزی در روزهای گرم سال از کمتر از ۲۰۰ متر در ساعت‌های ۰۳، ۰۰ و ۲۱ UTC تا بیش از ۳۰۰۰ متر در ساعت‌های ۰۹ و ۱۲ UTC نوسان دارد. دامنه این میزان نوسان در روزهای سرد سال از کمتر از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ متر است. در ساعت‌های ۰۶ و ۱۵ UTC ارتفاع لایه‌مرزی در روزهای گرم سال به بیش از ۱۰۰۰ متر می‌رسد و در بازه زمانی اواخر آبان تا اواخر بهمن کمتر از ۴۰۰ متر است. ارتفاع کم لایه‌مرزی در ساعات شبانه‌روز و صبحگاهی به‌ویژه در روزهای سرد سال سبب بالا رفتن پتانسیل نگهداشت آلاینده‌های جوی می‌شود. از آنجاکه تغییرات ضریب تهویه مشابه ارتفاع لایه‌مرزی است، در این قسمت نیز تغییرات این کمیت به‌صورت ۳ ساعتی مورد بررسی قرار گرفته است. متوسط روزانه ضریب تهویه جو طی ساعات‌های ۰۰ تا ۲۱ UTC در نمودار شکل ۶ نوسانات زیاد آن را در طول سال و همچنین در ساعات‌های شبانه‌روز نشان می‌دهد. میزان نوسانات ضریب تهویه در بازه ۲۲۰۰۰ مترمربع بر ثانیه تا حدود صفر در ساعاتی از روز در نوسان است. در ساعت‌های ۰۹ و ۱۲ UTC ضریب تهویه در طول سال نسبت به سایر ساعات‌های روز بالاتر است. بیشترین آن حدود ۲۰۰۰۰ تا کمترین آن حدود ۳۰۰۰ مترمربع بر ثانیه در روزهای سرد سال است. در ساعت ۰۶ و ۱۵ UTC نیز ضریب تهویه بین ۴۰۰۰ تا ۸۰۰۰ مترمربع بر ثانیه تا پایان تابستان در نوسان که پس از آن از مقدار آن کاسته می‌شود به‌طوری‌که از آذرماه تا اسفندماه به کمتر از ۱۰۰۰ متر می‌رسد. در ساعت ۱۸ UTC نیز ضریب تهویه در طول سال کمتر از ۲۰۰۰ مترمربع بر ثانیه است

و حتی در آذرماه تا اسفندماه به کمتر از ۱۰۰۰ متر می‌رسد. به‌طور کلی متوسط ضریب تهویه روزانه طی ساعت‌های ۰۰، ۰۳ و ۲۱ UTC در طول سال کمتر از سایر ساعت‌ها است؛



شکل ۵- متوسط تغییرات روزانه ارتفاع لایه مرزی در ساعات (۰۰ و ۰۳ و ۰۶ و ۰۹ و ۱۲ و ۱۵ و ۱۸ و ۲۱ UTC) طی سال‌های (۱۳۸۰-۱۳۹۹)

Figure 4. Average daily changes of boundary layer height in hours (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, and 21 UTC) during the years (1380-1399).



شکل ۶- تغییرات روزانه متوسط ضریب تهویه در ساعات (۰۰ و ۰۳ و ۰۶ و ۰۹ و ۱۲ و ۱۵ و ۱۸ و ۲۱ UTC) طی سال‌های (۱۳۸۰-۱۳۹۹)

Figure 5. Average daily changes of the ventilation coefficient in hours (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 and 21 UTC) during the years (2019-2020)

بررسی تغییرات میانگین ماهانه کمیت‌های مورد مطالعه

در این بخش روند تغییرات میانگین ماهانه کمیت‌های دما، سرعت باد، فشار، سرعت قائم جو در ترازهای مختلف، ارتفاع لایه‌مرزی و ضریب تهویه هوا مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. با توجه به محدودیت، در این بخش تنها بخشی از نتایج در قالب جدول ارائه می‌شود. متوسط تغییرات دمای ماهیانه طی ساعات ۰۰ تا ۲۱ UTC در جدول ۱ حاکی از اختلاف دما تا ۲۵ درجه سلسیوس در ساعات ۰۰، ۰۳، ۲۱ و ۱۸ UTC بین ماه‌های گرم و سرد سال و همچنین اختلاف دما تا ۳۰ درجه سلسیوس بین ماه‌های گرم و سرد سال در ساعات ۰۶، ۰۹، ۱۲ و ۱۵ UTC است. اختلاف موجود و همچنین دماهای کمتر در ماه‌های سرد سال بخصوص در ساعات شبانه و صبحگاهی می‌تواند کاهش ارتفاع لایه‌مرزی در این ماه‌ها را بیان دارد و افزایش پتانسیل آلودگی هوا را به همراه داشته باشد. تغییرات متوسط سرعت باد ماهیانه طی ساعات ۰۰ تا ۲۱ UTC در جدول ۲ بیان می‌دارد طی ساعات‌های ۰۰ و ۰۳ UTC متوسط سرعت باد در تمام ماه‌ها بسیار کم و حدود ۰/۵ تا ۱ متر بر ثانیه است. همچنین در ساعات‌های ۱۸ و ۲۱ نیز حدود ۰/۵ تا ۱/۵ متر بر ثانیه است. متوسط سرعت کم باد در این ساعات در ماه‌های مختلف سال و بخصوص ماه‌های سرد سال گواہ بر عدم جابجایی آلاینده‌ها در این ساعات شبانه‌روز است. متوسط سرعت باد طی ساعت ۰۶ تا ۱۵ UTC بین ماه‌های مختلف سال اختلاف بیشتری دارد و در ساعت ۱۲ UTC این اختلاف به ۲/۵ متر بر ثانیه نیز می‌رسد. نکته قابل ذکر متوسط سرعت باد کم در ماه‌های آذر و دی حتی در ساعت ۱۲ UTC است. بررسی تغییرات متوسط فشار ماهیانه طی ساعات‌های ۰۰ تا ۲۱ UTC نشان داد که پرفشارترین ماه‌ها به ترتیب آبان، مهر و آذر و میزان تغییرات متوسط فشار در این ماه‌ها در شبانه‌روز حدود ۲ میلی بار است. کم فشارترین ماه‌ها به ترتیب تیر، مرداد و خرداد و میزان تغییرات متوسط فشار حدود ۲/۵ میلی بار است. متوسط فشار بالا در ماه‌های سرد سال و میزان کمتر تغییرات روزانه در این ماه‌ها حاکی از پایداری بیشتر جو و در نتیجه افزایش پتانسیل آلودگی هوا در این ماه‌ها است.

جدول ۱- متوسط ماهانه دمای هوا در ساعات ۰۰ و ۰۳ و ۰۶ و ۰۹ و ۱۲ و ۱۵ و ۱۸ و ۲۱ UTC طی سال‌های (۱۳۸۰-)

(۱۳۹۹)

Table 1. Average monthly air temperature at 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, and 21 UTC during the years (1380-1399)

	0	3:00	6:00	9:00	12:00	15:00	18:00	21:00
فروردین	7.5	6.3	11.6	15.5	16.6	14.4	11.6	9.4
اردیبهشت	11.9	11.5	17.7	21.5	22.3	20.2	16.8	14.2
خرداد	16.8	16.9	24.2	28.6	29.9	28	23.6	20.2
تیر	21.6	21.2	28.3	33.1	34.5	32.3	28	24.9

مرداد	21.6	20.5	28	33.2	34.6	31.9	27.4	24.5
شهریور	17.8	16	24	29.9	31.4	27.7	23.6	20.6
مهر	12.4	10.5	18	24	25.4	21.1	17.9	14.9
آبان	6.1	4.9	9.2	14.2	15.5	11.8	9.6	7.6
آذر	0.7	-0.2	2.5	6.8	8.6	5.3	3.4	1.8
دی	-2.2	-3.1	-0.8	3.4	5.4	2.3	0.4	-1.1
بهمن	-1.2	-2.2	0.6	4.9	6.8	4	1.9	0.3
اسفند	3.5	2.3	6.6	11.2	12.8	10.1	7.4	5.4

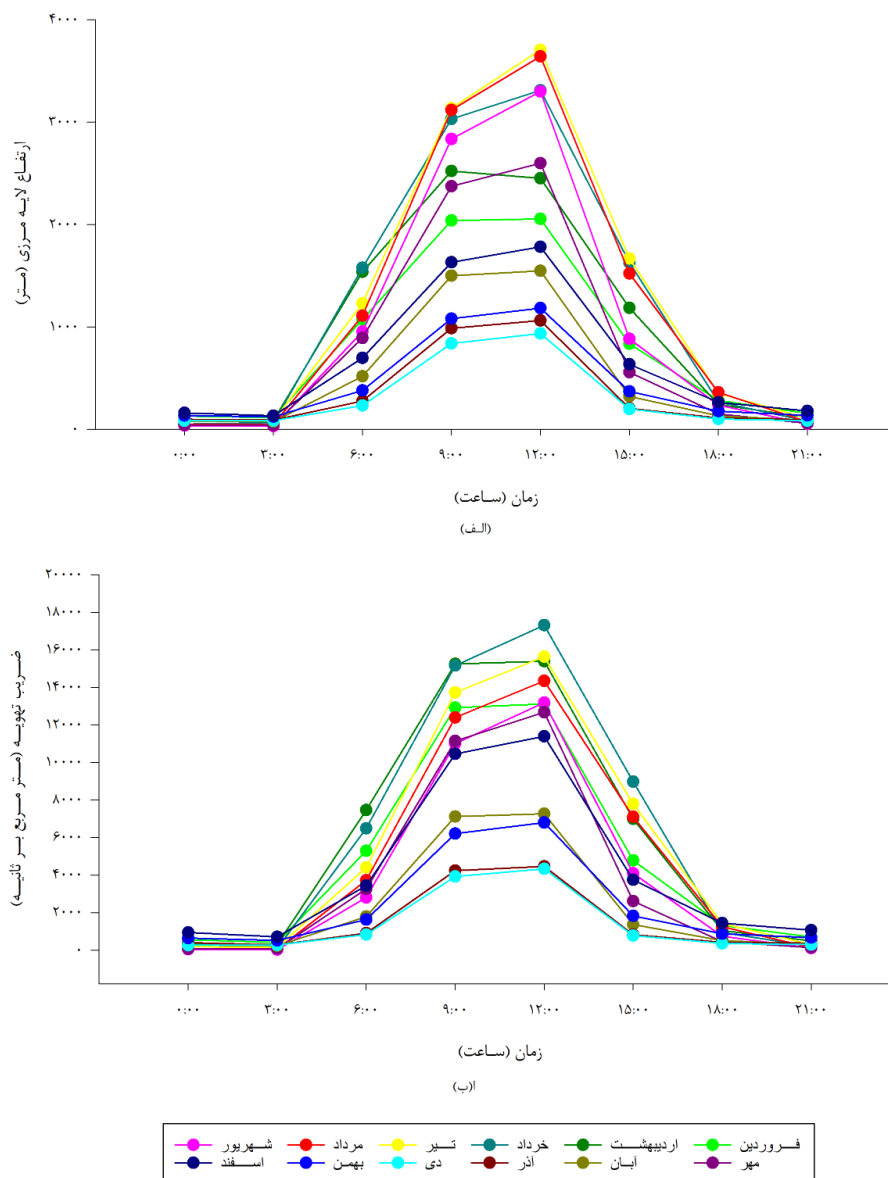
جدول ۲- متوسط سرعت باد ماهانه در ساعات ۰۰ و ۰۳ و ۰۶ و ۰۹ و ۱۲ و ۱۵ و ۱۸ و ۲۱ UTC طی سال‌های (۱۳۸۰-۱۳۹۹)

Table 2. Average monthly wind speed at 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 and 21 UTC during the years (1380-1399)

	0:00	3:00	6:00	9:00	12:00	15:00	18:00	21:00
فروردین	1.13	0.96	1.96	3.81	4.44	3.39	2.12	1.53
اردیبهشت	0.88	0.75	2.07	3.94	4.55	3.48	2.05	1.24
خرداد	0.55	0.4	1.71	3.63	4.48	3.97	1.94	1.02
تیر	0.65	0.49	1.55	3.43	4.22	4.2	1.74	1
مرداد	0.51	0.4	1.35	3.04	4.06	3.8	1.09	0.74
شهریور	0.41	0.33	1.06	2.82	3.91	3.21	1.26	0.74
مهر	0.43	0.31	0.99	2.97	3.7	2.13	1.42	0.81
آبان	0.5	0.42	0.98	2.15	2.65	1.68	1.24	0.66
آذر	0.64	0.57	0.91	1.65	1.89	1.31	0.84	0.69
دی	0.6	0.57	0.85	1.68	2.08	1.36	0.9	0.69
بهمن	1	0.92	1.3	2.51	2.94	1.99	1.4	1.1
اسفند	1.23	1.1	1.83	3.53	4.3	3.04	2.03	1.6

نمودار تغییرات ماهیانه متوسط سرعت قائم جو نشان داد که در تمام ماه‌های سال در ساعت‌های ۰۳، ۰۰ و ۲۱ UTC در تراز ۸۲۵ میلی‌بار فرونشست هوا وجود دارد. در ساعت ۱۸ UTC نیز به‌جز ماه‌های تیر، مرداد و شهریور که امکان صعود کم هوا را دارند در سایر ماه‌های سال فرونشست هوا وجود دارد. در مهرماه نیز به‌جز ساعت‌های ۰۹، ۱۲ و ۱۵ UTC در سایر ساعت‌های روز شرایط فرونشست دارد و همچنین خردادماه نیز شرایط مهرماه را دارد تنها در ساعت ۰۶ UTC با هم اختلاف دارند. سایر ماه‌های سال که شامل ماه‌های سرد سال و فروردین و اردیبهشت می‌شود در کلیه ساعت‌های شبانه‌روز به‌طور متوسط شرایط فرونشست هوا برقرار است. نمودار تغییرات ماهیانه متوسط سرعت قائم جو در تراز ۷۰۰ میلی‌بار بیان می‌دارد که در تمام ماه‌های سال به‌جز تیر و مرداد در ساعت‌های ۰۳، ۰۰ و ۲۱ UTC فرونشست هوا وجود دارد. در ساعت ۱۸ UTC نیز به‌جز ماه‌های تیر، مرداد و شهریور که امکان صعود کم هوا را دارند در سایر ماه‌های سال فرونشست هوا وجود دارد. تغییرات ماهیانه فرونشینی جو در ساعت ۰۹، ۱۲ و ۱۵ UTC در ماه‌های مختلف

سال نسبت به سایر ساعت‌های شبانه‌روز زیاد است. دامنه تغییرات در ساعت UTC۱۲ بین ۰/۶- تا ۰/۲۵ است. از آبان تا اسفند و همچنین فروردین و اردیبهشت متوسط ماهانه سرعت قائم جو نشان می‌دهد در کلیه ساعت‌های شبانه‌روز شرایط فرونشست هوا برقرار است. تغییرات ماهیانه متوسط سرعت قائم جو در ساعات ۰۰ تا ۲۱ UTC میل به خنثی بودن در تراز ۵۰۰ میلی‌باری را در اغلب ماه‌ها نشان می‌دهد. بررسی متوسط سرعت قائم جو در ساعت ۰۰ تا ۰۶ UTC در ماه‌های گرم سال با توجه به حاکم شدن پراارتفاع جنب حاره بر روی کشور و همچنین استان مرکزی میل به فرونشینی جو در تراز ۵۰۰ میلی‌بار را در این ماه‌ها نشان می‌دهد و در مورد ماه‌های سرد سال در این بازه ساعتی در تراز ۵۰۰ میلی‌بار به میزان کم میل به صعود وجود دارد. در ساعت UTC۱۲ در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد متوسط سرعت قائم جو مهیا بودن شرایط صعود را گواه است.



شکل ۷- تغییرات متوسط ارتفاع لایه مرزی و (ب) ضریب تهویه هوا ماهانه در ساعات ۰۰ و ۰۳ و ۰۶ و ۰۹ و ۱۲ و ۱۵ و ۱۸ و ۲۱
 UTC طی سال‌های (۱۳۸۰-۱۳۹۹)

Figure 6. Changes in average boundary layer height (top) and air conditioning coefficient (bottom) monthly at 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, and 21 TC during the years (1380-1399)

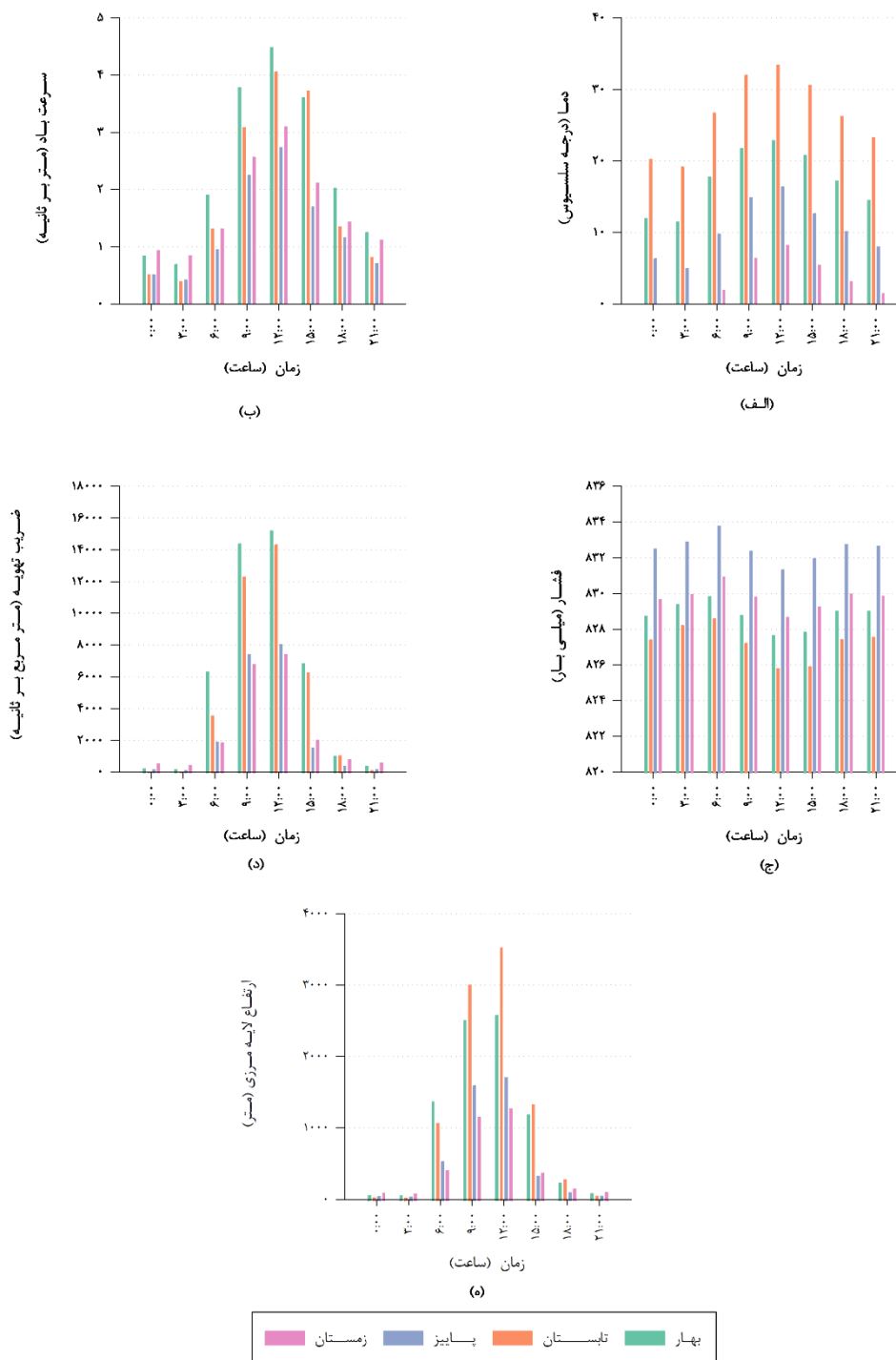
در نمودار شکل ۷ تغییرات متوسط ارتفاع لایه مرزی و ضریب تهویه هوا ماهانه آمده است. کمترین ارتفاع لایه مرزی به ترتیب در ماه‌های دی، آذر و بهمن است که ارتفاع لایه مرزی در این ماه‌ها در ساعت ۰۹ و ۱۲ UTC حدود ۱۰۰۰ متر و کمتر است. در ماه‌های تیر و مرداد نیز بیشترین ارتفاع لایه مرزی در ساعت ۱۲ UTC به‌طور متوسط بیش از ۳۵۰۰ متر

است. میزان تغییرات متوسط ارتفاع لایه‌مرزی در ساعت‌های ۰۳، ۰۴، ۰۵ و ۱۸ UTC به علت پایداری بیشتر جو و عدم دریافت تابش طی این ساعت‌ها در ماه‌های مختلف اختلاف زیادی ندارد؛ اما در سایر ساعت‌ها در طول روز یعنی بین ساعت ۰۶ تا ۱۵ UTC به علت تابش و ناپایداری‌تر شدن جو اختلاف متوسط ارتفاع لایه‌مرزی قابل‌توجه است. اختلاف متوسط ارتفاع لایه‌مرزی در ساعت‌های ۰۹ و ۱۲ UTC در ماه دی و تیر بیش از ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متر نیز است. تغییرات متوسط ارتفاع لایه‌مرزی در طول ساعت‌های شبانه‌روز در ماه‌های دی، آذر و بهمن به نسبت سایر ماه‌ها بسیار کمتر است که گواهِ بر انباشت آلاینده‌ها در صورت وجود آن‌ها است. بررسی نمودار شکل ۳-۳۷ متوسط ضریب تهویه ماهیانه طی ساعت‌های ۰۰ تا ۲۱ UTC نتایج قابل‌توجهی را ارائه می‌نماید. ضریب تهویه در ساعت‌های ۰۳، ۰۴ و ۱۸ در کلیه ماه‌های سال کمتر از ۱۰۰۰ مترمربع بر ثانیه است. در ماه‌های آذر و دی در ساعت‌های ۰۶ و ۱۵ UTC متوسط ضریب تهویه کمتر از ۱۰۰۰ مترمربع بر ثانیه است. در ساعت ۰۹ و ۱۲ UTC ضریب تهویه حدود ۴۰۰۰ مترمربع بر ثانیه است. در ماه‌های آبان و بهمن در ساعت‌های ۰۶ و ۱۵ UTC متوسط ضریب تهویه کمتر از ۲۰۰۰ مترمربع بر ثانیه است. در ساعت ۰۹ و ۱۲ UTC ضریب تهویه حدود ۶۰۰۰ تا ۷۰۰۰ مترمربع بر ثانیه است. در سایر ماه‌ها ضریب تهویه در ساعت ۰۶ بین ۳۰۰۰ تا ۷۰۰۰ مترمربع بر ثانیه و در ساعت ۱۵ UTC بین ۳۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ مترمربع بر ثانیه است. بیشترین ضریب تهویه را خردادماه در ساعت ۱۲ UTC با ۱۷۰۰۰ مترمربع بر ثانیه دارد. ضریب تهویه ماه‌های مهر، اسفند و شهریور در ساعت ۰۹ UTC ۱۰۰۰۰ تا ۱۱۰۰۰ مترمربع بر ثانیه و در ساعت ۱۲ UTC ۱۱۰۰۰ تا ۱۳۰۰۰ مترمربع بر ثانیه است.

بررسی روند میانگین فصلی کمیت‌های مورد مطالعه

متوسط تغییرات دمای فصلی طی ساعات ۰۰ تا ۲۱ UTC حاکی از اختلاف دما تا حدود ۲۰ درجه سلسیوس در ساعات ۱۸ تا ۰۳ UTC و اختلاف دما تا حدود ۲۵ درجه سلسیوس در ساعات ۰۶ تا ۱۵ UTC بین فصل زمستان و تابستان است. دماهای کمتر در دو فصل پاییز و زمستان بخصوص در ساعات شبانه و صبحگاهی در پایین بودن ارتفاع لایه‌مرزی در این دو فصل تأثیرگذار است؛ بنابراین می‌تواند سبب افزایش پتانسیل نگهداشت آلاینده‌ها در این زمان شود (شکل ۷، الف). متوسط سرعت باد در فصل‌های زمستان و بخصوص پاییز در تمام ساعت‌های شبانه‌روز کم است و همان‌طور که در نمودار ب از شکل ۸ آمده است میزان متوسط سرعت باد در این فصول در اغلب ساعات کمتر از ۱/۵ متر بر ثانیه است. متوسط سرعت باد در فصل بهار و تابستان با اختلاف کمی بیشتر از زمستان و پاییز است. به‌طور کلی متوسط سرعت باد کم به‌ویژه در ساعت‌های شبانه و صبحگاهی در تمام فصول حاکی از امکان جابجایی کم آلاینده‌ها و ارتفاع کم لایه‌مرزی است. سرعت باد در فصول گرم در ساعت‌های روزانه به‌طور متوسط بیشتر از فصول گرم سال است که ارتفاع لایه‌مرزی بیشتری را در این فصول سبب می‌شود. متوسط فشار در فصل پاییز بیش از سایر فصل‌ها است که در نمودار ج شکل ۸

مشخص است. فصل زمستان نیز با حدود ۲ میلی بار متوسط فشار کمتر پس از فصل پاییز متوسط فشار بیشتری نسبت به فصل تابستان و بهار دارد. کمترین متوسط فشار فصلی را فصل تابستان دارد که دامنه تغییرات متوسط فشار آن بین ۸۲۶ تا ۸۲۸/۵ میلی بار است. در ساعت‌های ۱۲ و ۱۵ UTC متوسط فشار کمترین مقدار را در فصل تابستان دارد. متوسط فشار بالا در فصل پاییز و زمستان این فصل‌ها را مستعد نگهداشت آلاینده‌ها می‌کند و متوسط فشار کم در فصل تابستان و بهار، ایجاد جریانات همرفتی و جابجایی هوا را سبب می‌شود. نمودار د شکل ۸ متوسط ضریب تهویه فصلی طی ساعت‌های ۰۰ تا ۲۱ UTC را نشان می‌دهد. در تمامی فصل‌ها ضریب تهویه در ساعت ۰۰، ۰۳، ۱۸ و ۲۱ UTC کمتر از ۱۰۰۰ مترمربع بر ثانیه است. در ساعت ۰۶ و ۱۵ UTC متوسط ضریب تهویه در فصل زمستان و پاییز کمتر از ۲۰۰۰ مترمربع بر ثانیه است. در ساعت ۰۶ UTC ضریب تهویه در تابستان و بهار به ترتیب برابر با ۴۰۰۰ و ۷۰۰۰ مترمربع بر ثانیه است. در ساعت ۱۵ UTC ضریب تهویه در تابستان و بهار برابر با ۸۰۰۰ مترمربع بر ثانیه است. در ساعت ۰۹ و ۱۲ UTC ضریب تهویه فصل پاییز و زمستان بین ۷۰۰۰ تا ۸۰۰۰ مترمربع بر ثانیه است. در ساعت ۰۹ UTC ضریب تهویه در تابستان و بهار به ترتیب برابر با ۱۲۰۰۰ و ۱۴۰۰۰ مترمربع بر ثانیه است. در ساعت ۱۲ UTC ضریب تهویه در تابستان و بهار حدود ۱۴۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ مترمربع بر ثانیه است. همان‌طور که نمودار ه از شکل ۸ نشان می‌دهد متوسط ارتفاع لایه‌مرزی در فصل تابستان اختلاف قابل توجهی با سایر فصل‌ها به‌ویژه با فصل پاییز و زمستان دارد. طی ساعت‌های ۰۰، ۰۳، ۱۸ و ۲۱ UTC اختلاف بین متوسط ارتفاع لایه‌مرزی کم است. در ساعت‌های ۰۶ و ۱۵ UTC اختلاف بین فصل زمستان و پاییز کم است. همچنین این اختلاف بین تابستان و بهار نیز کم است؛ اما این اختلاف بین فصول سرد و فصول گرم سال در ساعت‌های ذکر شده قابل توجه است. در ساعت‌های ۰۹ و ۱۲ UTC اختلاف بین فصل‌های مختلف سال زیاد است. این اختلاف بین فصل زمستان و تابستان در ساعت ۰۹ UTC حدود ۲۰۰۰ متر و در ساعت ۱۲ UTC بیش از ۲۰۰۰ متر است؛ بنابراین با توجه به تغییرات متوسط ارتفاع لایه‌مرزی در فصل‌های زمستان و پاییز و کم بودن ضریب تهویه هوا امکان انباشت آلاینده‌های جوی بخصوص در ساعت‌های شبانه و صبحگاهی زیاد است. در فصل‌های تابستان و بهار به‌خصوص در طول روز با توجه به افزایش ارتفاع لایه‌مرزی و نیز وزش باد مؤثر پتانسیل نگهداشت آلاینده‌ها کم می‌شود.

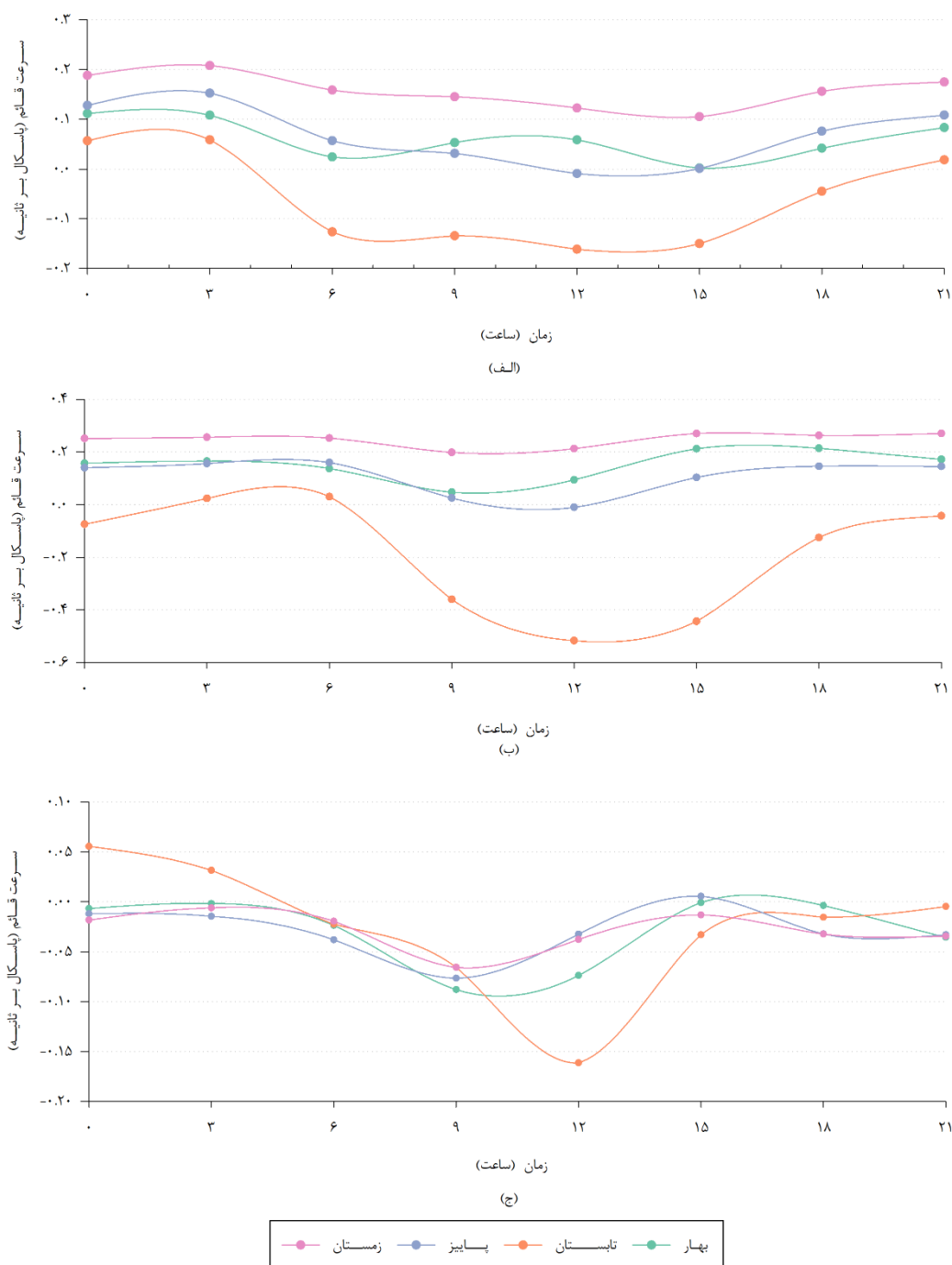


شکل ۸- متوسط تغییرات فصلی الف) دما، ب) سرعت باد، ج) فشار، د) ضریب تهویه هوا و د) ارتفاع لایه مرزی در ساعات ۰۰ و ۰۳ و

۰۶ و ۰۹ و ۱۲ و ۱۵ و ۱۸ و ۲۱ UTC طی سال‌های (۱۳۸۰-۱۳۹۹)

Figure 6. Average seasonal changes of a) temperature, b) wind speed, c) pressure, d) air conditioning coefficient and d) boundary layer height at 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 and 21 UTC during the years (1380-1399)

نحوه تغییرات متوسط سرعت قائم جو در فصول مختلف طی ساعت‌های ۰۰ تا ۲۱ UTC در ترازهای ۸۲۵ میلی‌بار بیانگر شرایط فرونشست در تمامی ساعت‌های شبانه‌روز در فصل‌های زمستان، پاییز و بهار است که در نمودار (الف) از شکل ۹ آمده است. در فصل تابستان نیز در ساعت‌های ۰۳، ۰۴ و ۰۵ با توجه به متوسط سرعت قائم جو شرایط فرونشست در تراز ۸۲۵ میلی‌بار وجود دارد. در ساعت ۰۶ تا ۱۸ UTC در فصل تابستان شرایط برای صعود جو در این تراز وجود دارد. تحلیل نمودار تغییرات متوسط سرعت قائم جو نشان از عدم صعود هوا در این تراز ارتفاعی بخصوص در فصول همراه با آلودگی است. نمودار (ب) از شکل ۹ نحوه تغییرات متوسط سرعت قائم جو در فصول مختلف طی ساعت‌های ۰۰ تا ۲۱ UTC در تراز ۷۰۰ میلی‌بار است که بیانگر شرایط فرونشست در کلیه ساعت‌های شبانه‌روز در فصل‌های زمستان، پاییز و بهار است. در فصل تابستان نیز در ساعت‌های ۰۳ و ۰۴ UTC با توجه به متوسط سرعت قائم جو شرایط فرونشست در تراز ۷۰۰ میلی‌بار وجود دارد. در ساعت ۰۹ تا ۱۸ UTC در فصل تابستان شرایط برای صعود جو در این تراز وجود دارد. در روزهای سرد سال تغییرات متوسط سرعت قائم جو نشان از عدم صعود هوا در تراز ارتفاعی ۷۰۰ میلی‌باری است. بررسی وضعیت فصلی تغییرات متوسط سرعت قائم جو در تراز ۵۰۰ میلی‌بار در نمودار (ج) از شکل ۹ نیز نوسانات کم‌تر این تراز ارتفاعی را نسبت به ترازهای ۸۲۵ و ۷۰۰ میلی‌باری نشان می‌دهد. در فصل تابستان در ساعت‌های بامدادی و صبحگاهی تمایل به فرونشینی در جو وجود دارد و در ساعت‌های ظهر و عصر میل به صعود جو وجود دارد. در فصل‌های بهار، پاییز و زمستان در ساعات شبانه و صبحگاهی شرایط خنثی و در ساعت‌های ظهر میل به صعود هوا در این تراز وجود دارد.

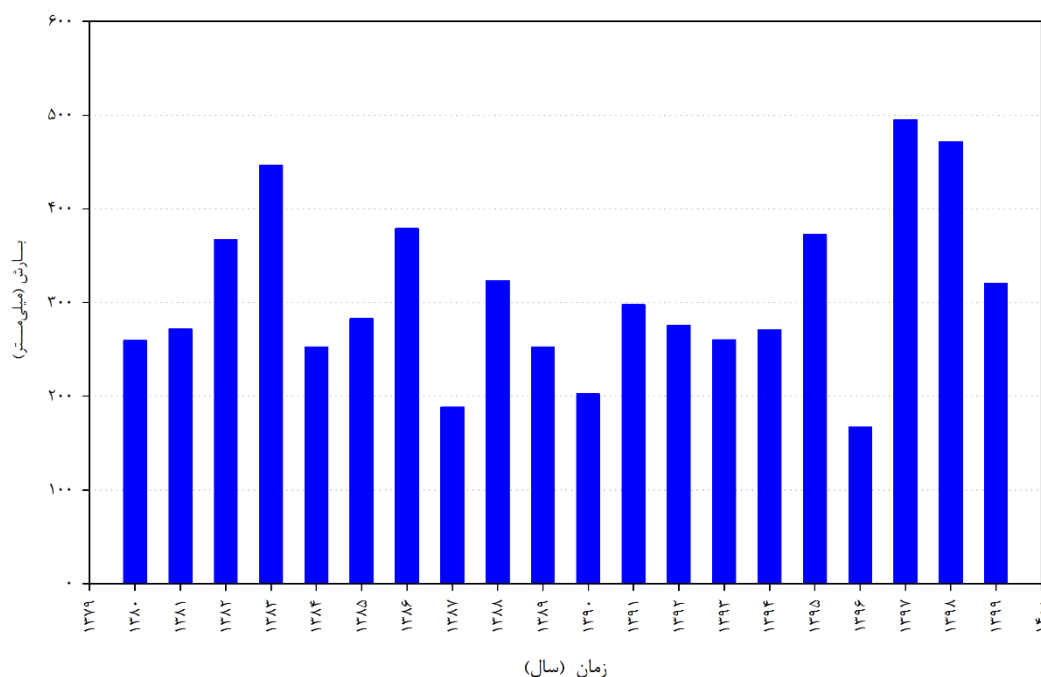


شکل ۹- تغییرات فصلی متوسط سرعت قائم جو (فرونشینی جو) در ساعات ۰۰ و ۰۳ و ۰۶ و ۰۹ و ۱۲ و ۱۵ و ۱۸ و ۲۱ UTC در تراز الف) ۸۲۵ میلی بار، ب) ۷۰۰ میلی بار و ج) ۵۰۰ میلی بار طی سال‌های (۱۳۸۰-۱۳۹۹). محور قائم سرعت قائم جو بر حسب پاسکال بر ثانیه و محور افقی ساعت بر حسب UTC است.

Figure 7. Average seasonal changes of atmospheric vertical velocity (atmospheric subsidence) at 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, and 21 UTC at levels a) 825 mb, b) 700 mb and c) 500 mb during years (1380-1399). The vertical axis is the vertical velocity of the atmosphere in pascals per second and the horizontal axis is the hour in UTC.

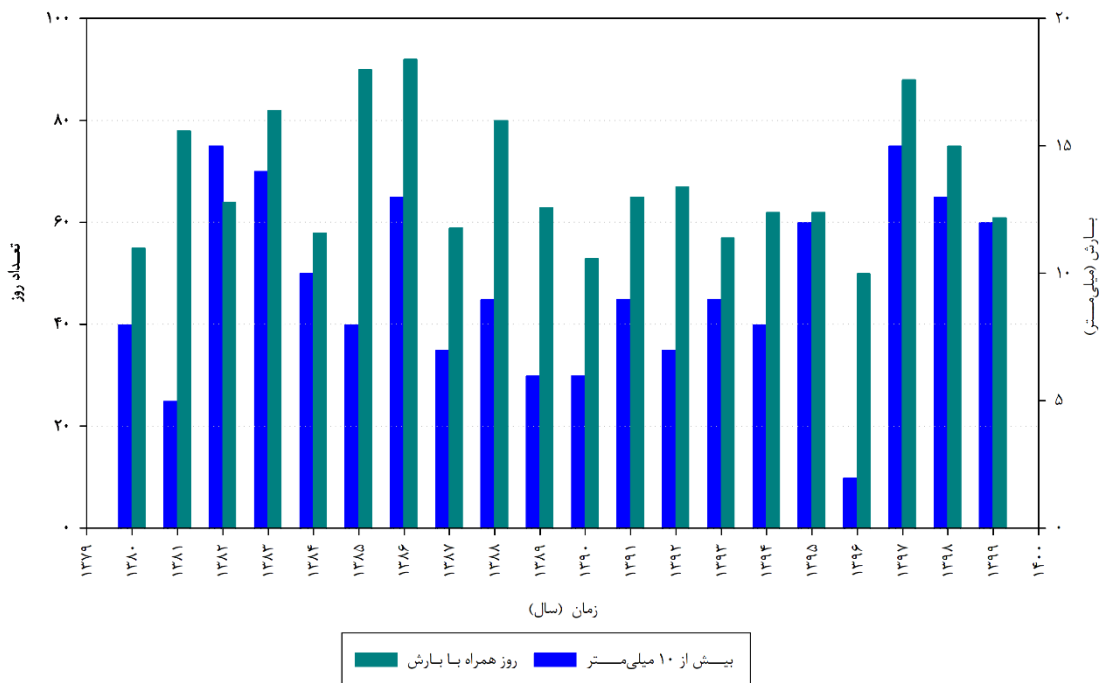
در این مقاله بارش مؤثر و همچنین ناپایداری جوی همراه با سامانه‌های بارشی به‌عنوان کمیتی که می‌تواند موجب کاهش آلاینده‌های جوی شود مورد بررسی قرار می‌گیرد. میزان متوسط بارش طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹ در ایستگاه همدیدی اراک $308/5$ میلی‌متر است. نمودار بارش سالانه در این بازه زمانی که در شکل (۱۰) آمده است حاکی از ثبات بارش سالیانه به میزان بیش از 400 میلی‌متر در سال‌های ۱۳۸۳، ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ است. در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۹۶ نیز میزان بارش کمتر از 200 میلی‌متر بوده است. متوسط بارش سالیانه به میزان $308/5$ میلی‌متر بارش و با سهم روزانه کمتر از یک میلی‌متر در سال نقش قابل توجهی برای کاهش آلاینده‌ها نیست.

تعداد روزهای بارشی و میزان بارش روزانه بیش از 10 میلی‌متر طی دوره آماری ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹ آمده در نمودار شکل (۱۱) حاکی از متوسط 68 روز همراه با بارش و تنها 9 روز همراه با بارش بیش از 10 میلی‌متر است. بیشترین روز همراه با بارش 92 روز در سال ۱۳۸۶ و کمترین روز همراه با بارش 50 روز در سال ۱۳۹۶ است. در سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۹۶ تعداد روزهای با بارش بیش از 10 میلی‌متر به ترتیب 13 و 2 روز است. سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۹۷ بیشترین روزهای همراه با بارش بیش از 10 میلی‌متر 15 روز است. با توجه به میزان بارش متوسط سالیانه و همچنین تعداد روزهای بارشی و به‌ویژه اینکه اغلب روزهای بارشی کمتر از 10 میلی‌متر است، می‌توان گفت بارش به‌عنوان یک کمیت اقلیمی نمی‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش آلاینده‌ها داشته باشد.



شکل ۱۰- میزان بارش سالانه طی سال‌های (۱۳۸۰-۱۳۹۹)

Figure 8. The amount of annual precipitation during the years (1380-1399)

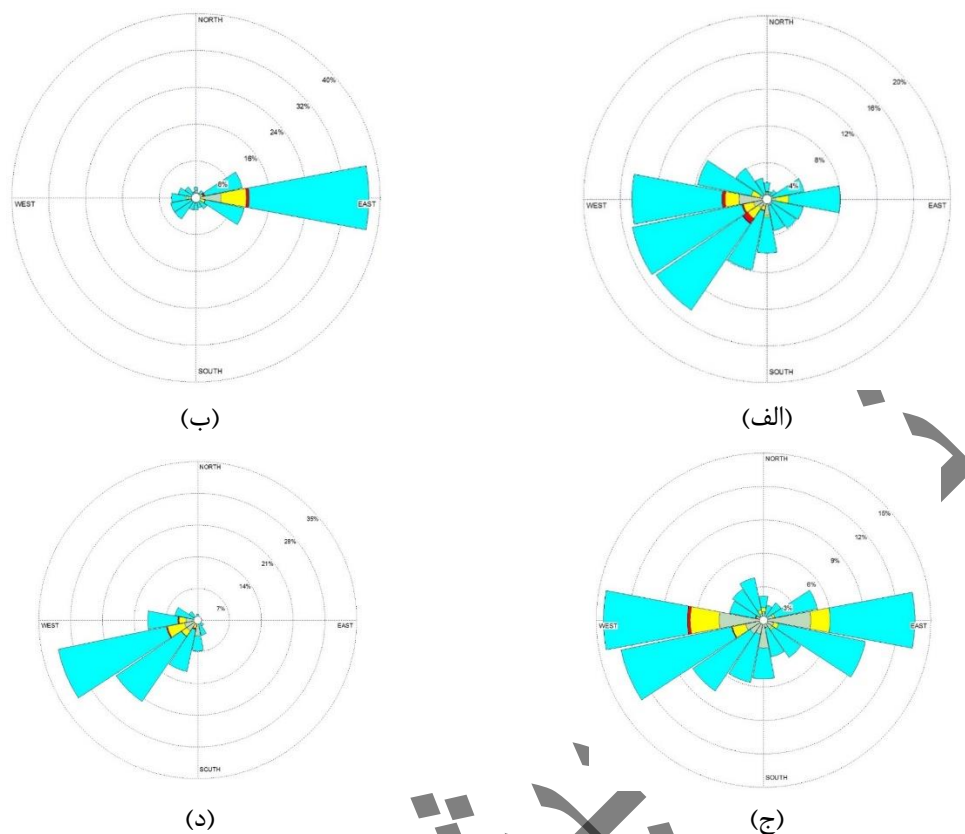


شکل ۱۱- تعداد روزهای همراه با بارش و روزهای با بارش بیش از ۱۰

Figure 9. The number of days with rain and days with more than 10

جابجایی آلودگی از نقاط دیگر به منطقه مورد مطالعه

بررسی دقیق انتقال آلودگی از نقطه‌ای به نقطه دیگر نیازمند مطالعه دقیق است؛ اما با توجه به اهمیت انتقال آلودگی شهر شازند و بخصوص آلودگی حاصل از نیروگاه برق شازند، در این مقاله اشاره مختصری به این مسئله شده است. ارتفاع شهر شازند از سطح دریا ۱۹۱۳ متر و ارتفاع دودکش نیروگاه شازند از سطح زمین ۲۰۰ متر است؛ بنابراین با استفاده از مؤلفه‌های افقی باد از داده‌های باز تحلیل شده Era5 باد برای سال ۲۰۱۹ در تراز فشاری ۸۰۰ میلی‌بار، گلباد شهر شازند رسم شد. گلباد فصل‌های بهار و زمستان ۲۰۱۹ شازند حاکی از باد غالب جنوب غربی است که می‌تواند منجر به انتقال آلودگی به سمت اراک گردد و گلباد فصل پاییز نیز حاکی از باد غالب جنوب غربی و باد نایب غالب شرقی است؛ اما در گلباد تابستان باد غالب شرقی است؛ بنابراین با توجه به جهت باد غالب جنوب در فصول بهار، پاییز و زمستان احتمال انتقال آلاینده‌های جوی از سمت شهر شازند به شهر اراک وجود دارد که می‌تواند در افزایش آلودگی شهر اراک نقش قابل توجهی ایفا کند.



شکل ۱۲- گلباد فصل الف) بهار، ب) تابستان، ج) پاییز و د) زمستان سال ۲۰۱۹ شازند در ارتفاع ۸۰۰ میلی بار.
Figure 10. wind rose season a) spring, b) summer, c) autumn and d) winter 2019 in Shazand at an altitude of 800 mb.

نتیجه گیری

در این مقاله شهر اراک یکی از آلوده‌ترین شهرهای کشور به‌عنوان منطقه مورد بررسی انتخاب شد. به‌منظور بررسی کمیت‌های جوی تأثیرگذار بر آلودگی جواز داده‌های ایستگاه همدیدی اصلی ایستگاه اراک و از داده‌های باز تحلیل‌شده Era5 با تفکیک ۰/۲۵ درجه به‌صورت روزانه استفاده شد. نتایج، پاسخگوی اهداف این مقاله بود که شامل شناسایی کمیت‌های هواشناسی تأثیرگذار بر پتانسیل آلودگی، بررسی کمیت‌های جوی و پتانسیل آلودگی از نظر پراکنش زمانی و تحلیل صحیح وضعیت آلودگی و عوامل آن با هدف یاری به مدیریت منابع آلاینده بودند.

نتایج حاکی از آن است که دماهای پایین در دوره سرد سال و همچنین دماهای کم شبانه و صبحگاهی در ماه‌های سرد سال می‌تواند سبب وارونگی دما و همچنین بالا رفتن پتانسیل نگهداشت آلاینده‌های جوی گردد. در این بازه متوسط فشار هوا نیز بالا است که می‌تواند سبب تشدید وارونگی شود. متوسط باد سطحی سالانه گویای تأثیر کم و ناچیز وزش باد به‌ویژه در ایام سرد سال و ساعت‌های صبحگاهی و شبانه است. نتایج بررسی مقادیر بارش نشان داد که سرانه بارشی تأثیر قابل توجهی در کاهش آلاینده‌ها ندارد. همچنین مشاهده شد ارتفاع لایه‌مرزی در فصول سرد سال و نیز در ساعات

شبانه به کمترین مقدار خود می‌رسد. به تبع آن مقادیر ضریب تهویه نیز کاهش می‌یابد و بنابراین پتانسیل نگهداشت آلاینده‌های جوی افزایش پیدا می‌کند و تجمع آلاینده‌ها در نزدیکی سطح زمین سبب کاهش کیفیت هوا می‌شود. در بررسی سرعت قائم جو نیز حرکات نزولی در فصول سرد سال و ساعات شبانه حاکم بودند. بررسی گل‌باد شهر شازند و اراک نیز مبین آن است که در فصول بهار، پاییز و زمستان شرایط برای انتقال آلاینده‌های جوی از شازند به اراک فراهم می‌شود که می‌تواند منجر به افزایش آلودگی شهر اراک شود. نتایج مطالعه وری و همایی (۱۴۰۱)، پناهی (۱۳۹۵)، جوان بخت امیری و خاتمی (۱۳۹۱) نیز ارتباط معنی دار و مستقیم کمیت‌های هواشناسی بر افزایش آلاینده‌های هوا را تأیید می‌کند و با نتایج این پژوهش همسو است.

به‌طور کلی بررسی کمیت‌های هواشناسی سطح زمین و سطوح فوقانی جو حاکی از پتانسیل بالای نگهداشت آلودگی و کم بودن ضریب تهویه شهر اراک است که به‌ویژه در ماه‌های سرد سال و در ساعات‌های شبانه و صبحگاهی قابل‌توجه‌تر است. بنابراین سیاست‌ها و تصمیم‌گیری‌ها می‌بایست با تأکید بر استقرار صنایع با آلاینده‌گی کم باشد و مدیریت منابع آلاینده مخصوصاً در ایام سرد سال و ساعات شبانه و صبحگاهی می‌بایست مورد توجه قرار گیرد.

باتوجه به محدودیت دسترسی به داده‌های پایش غلظت آلاینده‌ها در استان مرکزی پیشنهاد می‌شود علاوه بر گسترش شبکه زمینی پایش، در ادامه مطالعه حاضر از داده‌های سنجش‌ازدور برای بررسی دوره‌های آلوده جوی و مناطق تحت‌تأثیر آن استفاده شود. نتایج می‌تواند در بهبود پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها به‌ویژه در فصول سرد سال اثرگذار باشد.

References

منابع

- Badamfirooz, J., Rahmati, A., Daneshpajoo, N., Mousazadeh, R., & Mirzaei, R. (2022). Investigating the impact of existing and under construction industries on the air quality of Arak City using ADMS model. *Environmental Sciences*, 20(1), 21-40.
- Bodor, Z., K. Bodor, A. Keresztesi, R. Szép, 2020, Major air pollutants seasonal variation analysis and long-range transport of PM10 in an urban environment with specific climate condition in Transylvania (Romania). *Environmental Science and Pollution Research*.
- Borhani, F., Ehsani, A.H., McGuirk, S.L., Shafepour Motlagh, M., S.M. Mousavi, Y. Rashidi, Seyed Mohammad Mirmazloumi, 2023, Examining and predicting the influence of climatic and terrestrial factors on the seasonal distribution of ozone column depth over Tehran province using satellite observations. *Acta Geophys*. <https://doi.org/10.1007/s11600-023-01179-1>.
- Borhani, F., M. Shafepour Motlagh, A.H. Ehsani, Y. Rashidi, S. Maddah, S.M. Mousavi, 2023, On the predictability of short-lived particulate matter around a cement plant in Kerman, Iran: machine learning analysis. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20:1513–1526 .
- Chan, L., Qi-hong, D., Wei-wei, L., Bo-liang, H., Ling-zhi, S., 2012,

Characteristics of ventilation coefficient and its impact on urban air pollution. *Journal of Central South University* 19(3).

Choudhary, M. P., Vaibhav, G., 2013, Causes, Consequences and Control of Air Pollution, Conference: All India Seminar on Methodologies for Air Pollution Control At: Malviya National Institute of Technology, Jaipur, Rajasthan, India.

Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017): ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), *date of access*. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>.

Elahabadi, A., Ahmadi Asour, A., 2013, measurement of air pollutants in Sabzevar city, *Journal of Sabzevar University of Medical Sciences and Health Services*, 18 (2).

Gassmann, M., Mazzeo, N.A., 2000, Air Pollution Potential: Regional Study in Argentina, Article in *Environmental Management*, April 2000.

Ghahroudi Tali, M., 2016, Physical development of arak city applying natural indicators, *European Journal of Geography* 7(3).

Holton ,J.R., 2004, AN INTRODUCTION TO DYNAMIC METEOROLOGY, Elsevier Academic Press, Fourth Edition.

Hosseiniabalam. F. and Hejazi, A., 2012, Influence of Meteorological Parameters on Air Pollution in Isfahan, *Environment and Chemistry, IPCBEE* vol.46.

Jovan Bakht Amiri, S., Khatami, S.H., 2018, Investigating the relationship between air quality index pollutants and meteorological parameters in Tehran with regression analysis approach. *Human and Environment Quarterly*, 10 (1), 15-28.

Karam, A., Ranjbar Barouq, Z., Mohammadian, E., 2013, study of the effect of topography on the air pollution of Arak city. the first conference of geographical sciences of Iran.

Kayes, S.A. Shahriar, K. Hasan, M. Akhter, M.M. Kabir, M.A. Salam, 2019, The relationships between meteorological parameters and air pollutants in an urban environment. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 5(3), Summer 2019.

Kermani, M., Davalit, M., Fallah Jokandan, S., Aghaei, M., Bahrami Asl, F., Karimzadeh, S., 2016, Investigation of health index of air quality and its applications in seven cities of Iran in 1990. *Scientific Research Journal of University of Science Arak Medicine*, year 19, number 12, (serial number 117), March 2015.

Nowrozi, F. and Shamsipour, A.A., 2014, the effect of climatic factors in controlling or intensifying air pollution in Arak. *International Conference on Environmental Sciences, Engineering and Technologies*, Tehran.

Oji, S., H. Adamu, 2020, Correlation between air pollutants concentration and meteorological factors on seasonal air quality variation, *Journal of Air Pollution and Health*; 5(1)

Panahi, Ali, 2015, Investigation of the relationship between air quality index pollutants and meteorological parameters in severe storms of Tabriz city, *Geographical Space Quarterly*, No. 62, Pages 63-76

Salehi, M., Mirhoseini, S.H., Karimi, B., Hashiani, A.A., 2021, Association between airborne particles and meteorological parameters in Arak industrial city, *Journal of Air Pollution and Health (Winter 2021)*; 6(1).

Skoro, G., 1380, transportation, weather disasters and air pollution, translated by Dr. Shahriar Khalidi, Shahid Beheshti University Press, Tehran

Voiculescu, M., D.E. Constantin, S. Condurache-Bota, V. Călmuc, A. Ros, and C. Mariana Dragomir Bălănic, 2020, Role of Meteorological Parameters in the Diurnal and Seasonal Variation of NO₂ in a Romanian Urban Environment. International Journal of Environmental Research and Public Health.

Vari, Houra and Hamami, Miyad, 1401, the effect of meteorological parameters on the air pollution in Tehran and determining its status using geostatistics and geographic information system, the 8th international conference on interdisciplinary research in civil engineering, architecture and urban management of the 21st century Tehran, <https://civilica.com/doc/1533262>

Yansui L., Y. Zhou & J. Lu, 2020, Exploring the relationship between air pollution and meteorological conditions in China under environmental governance. scientific reports.

Zhen, L., L. Shen, C. Yan, J. Du, Y. Li, H. Zhao, 2020, Analysis of the Influence of Precipitation and Wind on PM_{2.5} and PM₁₀ in the Atmosphere. Advances in Meteorology.