



Research Paper

Studying Effect of Climatic Variables on Temporal Distribution of Air Pollution Using Sentinel-5P Data in Mazandaran Province, Iran

Hadigheh Bahrami-Pichaghchi¹, Reza Norooz-Valashedi^{2*} and Mohammad Ali Gholami Sefidkouhi³

¹Ph.D. Scholar, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

²Assist. Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

³Assoc. Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

Article information

Received: January 08, 2024

Revised: February 26, 2024

Accepted: April 14, 2024

Keywords:

Homogeneity Test

Mazandaran

Pollutant

Satellite

Sensor

*Corresponding author:

r.norooz@sanru.ac.ir



Abstract

Studying air pollution distribution and factors is crucial for control. The research focused on analyzing air pollution distribution and its correlation with climatic variables in Mazandaran Province from 2018 to 2022 using Remote Sensing. Air pollution distribution analyzed with TROPOMI sensor in Google Earth Engine system. Air pollution change point analyzed with Petit's homogeneity test. Additionally, Pearson's correlation test was utilized to assess the correlation among variables. Spatial analysis of air pollution showed that the highest amount of air pollution in the period of 2018-2022 was in the east of Mazandaran and at altitudes of 0-500 m. The test results showed that the concentrations of CO, O₃, and SO₂ gases had a significant downward trend in some months. However, the average NO₂ gas in October 2020 has been significant at the level of 5%. The seasonal air pollution concentration with NO₂ gas is higher in winter and autumn. The highest concentration of O₃ is in winter and spring. However, the highest concentration of SO₂ is related to winter and autumn. The number of sunshine hours with a correlation coefficient between 0.5 and 0.8 has been the most effective climate component on air pollution. Meteorological factors impact temporal-spatial dispersion directly, indirectly.

How to cite this paper: Bahrami-Pichaghchi, H., Norooz-Valashedi, R., & Gholami Sefidkouhi, M. A. (2024). Studying the effect of climatic variables on temporal distribution of air pollution using Sentinel-5P data in Mazandaran Province, Iran. *Environ. Water Eng.*, 10(4), 480-495. <https://doi.org/10.22034/ewe.2024.434545.1906> (In Persian)



© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** Journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Today, air pollution is considered one of the main and most important problems of the planet. Because it has significant effects on human health as well as human assets. Therefore, air pollution has attracted the attention of the world and managers. As a result, measuring and knowing the exact amount of air pollution is considered very necessary and important to reduce the deadly effects of air pollution on living organisms and the environment. From a reciprocal point of view, the concentration of air pollutants is subject to change depending on the local topography, source emission, and surrounding meteorological conditions. However, among these factors, meteorological variables such as temperature, precipitation, relative humidity, etc. are mainly responsible for changes in the concentration of air pollutants in the environment. To estimate a small amount of air pollution, there are various tools such as laboratory measurement, remote sensing technology, ground stations, and modeling. In the current research, the aim is to evaluate the effect of climatic variables on the temporal distribution of air pollution such as CO, NO₂, O₃, and SO₂ variables using Sentinel-5P satellite data in conjunction with the TROPOMI sensor in the humid climate of the north of the Iran and on the edge of the Caspian Sea.

Material and Methods

Mazandaran province with an area of 223,842 km² is located in the north of Iran in the geographical range of 35° 47' to 36° 35' north latitude and 50° 34' to 54° 10' east longitude. Since the present study aims to investigate the temporal-spatial distribution of air pollution, the air pollution stations where air pollution data are measured and recorded should be investigated. However, there is no pollution monitoring station in Mazandaran province, so remote sensing data, which are freely available, were used. The data used includes ten variables, among which six variables are called wind speed (m/s), precipitation (mm), sunshine hours (hr), temperature (°C), relative humidity (%), and horizontal visibility min (km) as effective variables, and four variables called SO₂, NO₂, CO, and O₃ were considered as target variables. The mentioned variables were obtained daily during the period of 2018-2022 from the National Meteorological Organization and the TROPOMI sensor. In this study, Petit's test of

homogeneity was used to investigate the change point of the time series. Also, Pearson's correlation coefficient was used to investigate the relationship between air pollution and meteorological variables.

Results

Using the Google Earth Engine (GEE) environment, the temporal-spatial distribution of pollution parameters (CO, NO₂, SO₂, and O₃) was extracted. By coding in JavaScript language in GEE, the images of four pollution parameters of the Sentinel-5p satellite were called. Using filters, the study years (6/29/2018 and 2022) and place (Mazandaran province) were defined. After that, the images with clouds were extracted by defining the cloud filters and by defining the average filters for 5 years, the average maps were extracted. The results of the spatial distribution of CO, NO₂, O₃, and SO₂ in Mazandaran province are presented annually in Fig. 1. As it is clear from the results this article, the highest amounts of CO and SO₂ are about 0.03 mol/m² and 0.48 mol/m², respectively, corresponding to the east of Mazandaran and the altitude class of 0-500 m. Its lowest value is about 0.018 mol/m² and zero corresponds to the altitude classes of 2500-5600 m. The highest amount of O₃ is about 0.14 mol/m², corresponding to the cities near the shores of the Caspian Sea, Mazandaran. Its lowest value is about 0.13 mol/m² corresponding to the high altitudes of Mazandaran. Also, the high NO₂ concentration of 14.52 mol/m² in Mazandaran province is related to cities with high population density and more traffic such as Sari, Gharakhil, and Amol. Its lowest value is about 6.18 mol/m², corresponding to the heights of Mazandaran.

The relationship between climate variables and air pollution variables is examined daily, for which Pearson's correlation test is used at the 95% level. This study shows that the components of sunshine hours, horizontal visibility min, and temperature have a direct relationship with the daily changes in air pollution (O₃ and CO), and the components of relative air humidity, average wind speed, and average temperature have an inverse relationship with the daily changes of air pollution (SO₂ and NO₂). Among these, the highest intensity of correlation belongs to the variable of sunshine hours, whose absolute value of correlation coefficients in all stations is between 0.5 and 0.8. So, its highest correlation belongs to Galugh station with a value of 0.8.

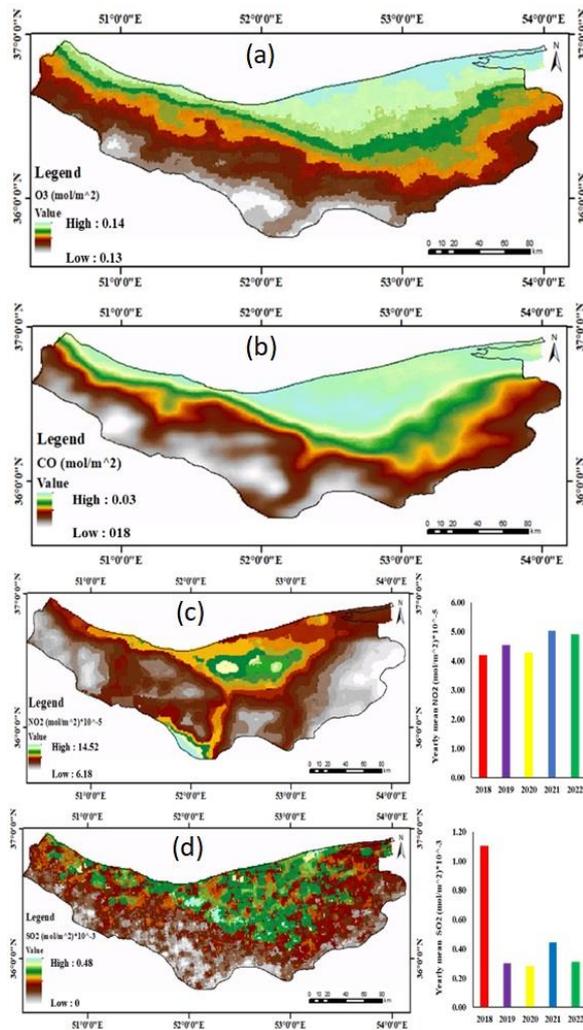


Fig. 1 Air pollution map, and bar chart of annual mean SO₂ and NO₂: a) O₃ map, b) CO map, c) Map and bar chart of annual mean NO₂, and d) Map and bar chart of annual mean SO₂ in the study area for the period 2018-2022

Conclusions

The current study aimed to investigate changes in air pollution daily, monthly, quarterly and annually based on satellite data, and to investigate its relationship with meteorological factors. In this

regard, four air pollution variables including CO, NO₂, SO₂, and O₃ were investigated. Then the factors affecting air pollution were determined. In general, the results of the current research indicate that:

1. The areas that are in the altitude class of 0-500 m have more air pollution than high altitudes due to more industries, vehicle traffic, the Shahid Salimi power plant, and the burning of straw and stubble.
2. Meteorological variables such as temperature, sunshine hours, wind speed, and humidity play an important role in determining air quality. Changes in these variables can affect the dispersion and concentration of pollutants in the atmosphere.
3. High concentration of SO₂ in cold months of the year is due to burning of Mazut and diesel in the existing power plant in the studied area.
4. Meteorological variables such as temperature, sunshine hours, wind speed and humidity play an important role in determining air quality. Changes in these parameters can affect the dispersion and concentration of pollutants in the atmosphere.

Acknowledgment

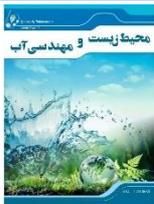
This article is extracted from the approved doctoral thesis at Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. The authors wish to sincerely thank the Meteorological Organization of Mazandaran Province for their assistance in conducting this research. It is important to mention that no financial support was received from any organization or institution for this study.

Data Availability

The data generated in this research is presented in the text of the article.

Conflicts of interest

The authors of this paper declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



ISSN: 2476-3683

محیط زیست و مهندسی آب

Homepage: www.jewe.ir

مقاله پژوهشی

اثر متغیرهای اقلیمی بر توزیع زمانی آلودگی هوا با استفاده از داده‌های Sentinel-5P در استان مازندران

حدیقه بهرامی پیچاقچی^۱، رضا نوروز ولاشدی^{۲*} و محمدعلی غلامی سفیدکوهی^۳

^۱دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
^۲استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
^۳دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: [۱۴۰۲/۱۰/۱۸]
 تاریخ بازنگری: [۱۴۰۲/۱۲/۰۷]
 تاریخ پذیرش: [۱۴۰۳/۰۱/۲۶]

واژه‌های کلیدی:

آزمون همگنی
 آلاینده
 سنجنده
 ماهواره

*نویسنده مسئول:

r.norooz@sanru.ac.ir



تحلیل توزیع آلودگی هوا و عوامل کارا بر آن برای پیشگیری و کنترل آلودگی هوا امری ضروری است. هدف از این پژوهش بررسی توزیع زمانی-مکانی آلودگی هوا و بررسی ارتباط آن با متغیرهای اقلیمی در گستره مازندران برای سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۱۸ به روش دورسنجی است. توزیع زمانی و مکانی آلودگی هوا با استفاده از سنجنده TROPOMI ماهواره سنتینل ۵ در محیط گوگل ارث برآورد شد. تحلیل نقطه تغییر با روش آزمون همگنی پتیت انجام شد. همچنین برای ارزیابی همبستگی بین متغیرها از آزمون همبستگی پیرسون استفاده شد. تحلیل مکانی نشان داد بیشترین مقدار آلودگی هوا در دوره ۲۰۲۲-۲۰۱۸ در شرق مازندران، و ارتفاعات صفر تا ۵۰۰ m بوده است. نتایج آزمون پتیت نشان داد غلظت گازهای CO₂، O₃ و SO₂ در برخی ماه‌ها افت نزولی معنی‌داری دارند. اما مقدار متوسط NO₂ در ماه اکتبر سال ۲۰۲۰ به صورت صعودی در سطح ۵٪ معنی‌دار بوده است. غلظت NO₂ در زمستان و پاییز بیشتر است. بیشترین غلظت O₃ در زمستان و بهار است. اما بیشترین غلظت SO₂ مربوط به فصل زمستان و پاییز است. تعداد ساعات آفتابی با ضریب همبستگی بین ۰/۵ تا ۰/۸ کاراترین مؤلفه اقلیمی بر آلودگی هواست. در نتیجه عوامل هواشناختی به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر پراکندگی زمانی-مکانی آلودگی هوا اثر می‌گذارد.

نحوه استناد به این مقاله:

بهرامی پیچاقچی، حدیقه، نوروز ولاشدی، رضا. & غلامی سفیدکوهی، محمدعلی. (۱۴۰۳). اثر متغیرهای اقلیمی بر توزیع زمانی آلودگی هوا با استفاده از داده‌های Sentinel-5P در استان مازندران. محیط زیست و مهندسی آب. 10(4) 480-495
<https://doi.org/10.22034/ewe.2024.434545.1906>

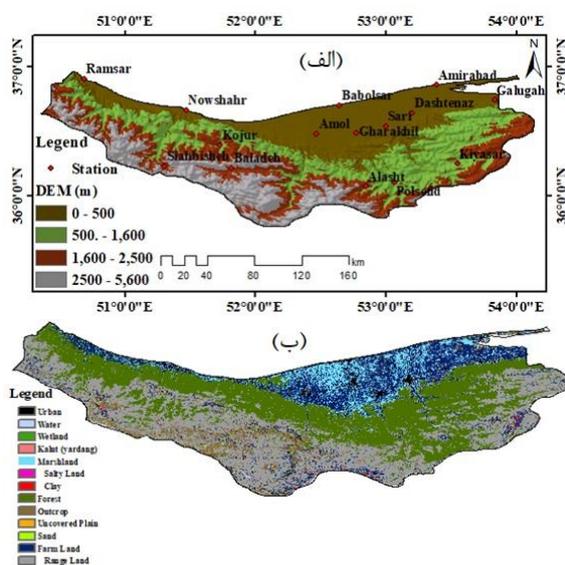


۱- مقدمه

مطالعه Soleimany et al. (2021) آلاینده‌های هوای شهر Kaunas لیتوانی را با استفاده از داده‌های ایستگاه زمینی و داده‌های ماهواره‌ای بررسی نمودند، و اذعان داشتند که همبستگی قوی و قابل قبول بین داده‌های ماهواره‌ای و اندازه‌گیری‌های زمینی وجود دارد. این نتایج نشان‌دهنده توانایی قابل قبول تصاویر ماهواره‌ای در پایش آلودگی هوا است. Ghannadi et al. (2022) برای پایش آلودگی هوا از تصاویر ماهواره Sentinel-5p در شهرهای بزرگ صنعتی ایران بهره گرفتند. آن‌ها گزارش کردند با توجه به همبستگی قوی داده ماهواره Sentinel-5p با مقادیر اندازه‌گیری‌های زمینی، می‌توان از داده ماهواره در مطالعات کلان مدیریتی با هدف کاهش آلاینده‌های هوا استفاده نمود. (Tonion and Pirotti (2022) به مقایسه داده NO₂ حاصل از Sentinel-5P با اندازه‌گیری‌های زمینی پرداختند. آن‌ها دریافتند که همبستگی بین اندازه‌گیری‌های زمین و داده‌های Sentinel-5p وجود دارد. در تحقیقی Kazemi Garajeh et al. (2023) آلاینده‌های CO، NO₂، SO₂ و O₃ با استفاده از تصاویر Sentinel-5p در اراک ایران برآورد کردند، آن‌ها دریافتند که داده‌های Sentinel-5p همراه با رویکردهای مبتنی بر خودکار می‌توانند بهتر از روش‌های سنتی برای نقشه‌برداری و پایش آلودگی هوا عمل کنند. شرایط هواشناسی اثرات قابل توجهی بر آلودگی هوا دارد به طوری که شرایط هواشناسی به‌عنوان یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر کیفیت هوا، تضعیف، انتشار، انتقال و تبدیل آلاینده‌های جوی را محدود می‌کند، و در نتیجه بر توزیع و غلظت آلاینده‌های جوی تأثیر می‌گذارد (He et al. 2016). باین‌حال تأثیر شرایط هواشناسی بر انتشار آلاینده‌ها و کیفیت هوای شهری در مناطق و فصول مختلف، متفاوت است. به‌عنوان مثال، Safarianzengir et al. (2020) به تحلیل و پهنه‌بندی مکانی و زمانی آلودگی هوا (CO) با استفاده از داده‌های ماهواره Sentinel-5p در ایران پرداخته، و اذعان داشتند که بیش‌ترین میزان CO مربوط به ماه فروردین سال ۱۳۹۸ حدود ۰/۳۹ mol/m² است. همچنین آن‌ها بیان داشتند که بیش‌ترین میزان CO در ماه‌های سرد سال رخ می‌دهد. (Gharibi and Shayesteh (2021) کاربرد تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-5p در شناسایی کانون‌های

امروزه آلودگی هوا یکی از اصلی‌ترین و مهم‌ترین مشکلات کره زمین محسوب می‌شود. چراکه تأثیرات چشم‌گیری بر سلامت انسان و همچنین دارایی‌های انسان دارد. از جمله آسیب‌های فراوانی به حیات گیاهان و جانوران و به‌طور کلی بوم سامانه‌های زیستی وارد می‌کند. لذا نقش عمده‌ای در تغییرات اقلیمی جهان ایفا می‌کند. با توجه به تراکم بالای جمعیت در مازندران، مسافرپذیری و سایر عوامل این استان از مشکلات عمده حاصل از آلودگی هوا مستثنی نیست. میلیون‌ها نفر در سراسر جهان به دلیل قرار گرفتن در معرض آلاینده‌های هوا مانند نیتروژن دی‌اکسید (NO₂)، گوگرد دی‌اکسید (SO₂)، کربن مونوکسید (CO)، متان (CH₄)، ازن (O₃) و ذرات معلق در هوا، از مشکلات سلامتی رنج می‌برند. طبق گزارش سازمان بهداشت جهانی در سال ۲۰۱۸ آلودگی هوا منجر به مرگ بیش از ۴/۲ میلیون انسان در سراسر جهان شده است (WHO 2018). بنابراین آلودگی هوا توجه جهانیان و مدیران را به خود جلب کرده است. در نتیجه، اندازه‌گیری و دانستن مقدار دقیق آلودگی هوا، برای کاهش اثرات مریب آلودگی هوا بر روی موجودات زنده و محیط‌زیست بسیار ضروری و حائز اهمیت تلقی می‌شود. از دیدگاه متقابل، غلظت آلاینده‌های هوا بسته به توپوگرافی محلی، انتشار منبع و شرایط هواشناسی اطراف در معرض تغییر است (Banerjee et al. 2011). باین‌حال، در میان این عوامل، متغیرهای هواشناسی همچون دما، بارش، رطوبت نسبی، سرعت باد و غیره عمدتاً مسئول ایجاد تغییرات در غلظت آلاینده‌های هوا در محیط هستند. جهت برآورد مقدار کمی آلودگی هوا، ابزارهای مختلفی نظیر اندازه‌گیری آزمایشگاهی، فناوری سنجش‌ازدور، ایستگاه‌های زمینی و مدل‌سازی وجود دارد. روش‌های مستقیم اندازه‌گیری آلودگی هوا، به دلیل هزینه بالا دستگاه‌های اندازه‌گیری و عدم پیوستگی آن، برای بررسی مکانی-زمانی مناسب نیستند. اما سنجش‌ازدور، آلودگی هوا را با دقت زمانی و مکانی بسیار بالاتری از روش‌های دیگر برآورد می‌کند. برخی معایب روش‌های مستقیم اندازه‌گیری آلودگی هوا، پژوهشگران را به این سمت سوق داده که از روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری آلودگی هوا مثل سنجش‌ازدور استفاده کنند (Saw et al. 2021).

هوای استان مازندران به دلیل ویژگی‌های خاص جغرافیایی آن و فاصله کم بین مناطق کوهستانی و دریا، همراه با بارش‌های سالانه ۶۳۱ mm در سال و میانگین دما 17°C در طول سال است. در بین مناطق مختلفی که تحت تأثیر سوء آلاینده‌های هوا قرار گرفته‌اند، استان مازندران نیز از این امر مستثنا نبوده و رشد روزافزون ترافیک شهری و برون شهری، مازوت‌سوزی و گازوئیل سوزی نیروگاه شهید سلیمی نکا در شرق این استان، فعالیت‌های کشاورزی، آتش‌سوزی جنگل، و انتشار انواع آلودگی‌ها، در این مناطق می‌تواند اثرات جانبی محیط‌زیستی را به همراه داشته باشد (Ghanbari et al. 2006; Ghorbani et al. 2021). از آنجاکه هدف مطالعه حاضر بررسی توزیع زمانی- مکانی آلودگی هوا است، می‌بایست ایستگاه‌های آلودگی هوا که در آن‌ها داده‌های آلودگی هوا اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند، مورد بررسی قرار گیرند. اما در استان مازندران ایستگاه آلودگی سنجش وجود ندارد. بنابراین از داده‌های سنجش‌ازدور که به صورت رایگان در دسترس هستند استفاده شد. در شکل (۱) موقعیت جغرافیایی استان مازندران، نقشه طبقات ارتفاعی (الف)، پوشش اراضی (ب) و پراکندگی نقاط اطلاعات زمینی و ایستگاه‌های همدیدی هواشناسی مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۱- الف- موقعیت ایستگاه‌های همدیدی و نقشه طبقات ارتفاعی و ب- نقشه پوشش اراضی منطقه مورد مطالعه

Fig.1 a) Location of synoptic stations and DEM map and b) Land Cover map of the study area

آلاینده‌های هوا برای سال ۲۰۱۹ در ایران بررسی، و گزارش کردند که غلظت آلاینده‌های CO و O_3 در پاییز روند افزایشی و در بهار روند کاهشی داشته است. در پژوهشی (2019) *et al.* Kayes رابطه بین متغیرهای هواشناسی و آلاینده‌های هوا در شهر داکا، پایتخت بنگلادش بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که غلظت SO_2 در هوای داکا در حال افزایش است. همچنین رابطه منفی بین SO_2 و NO_2 با دما وجود دارد. Oji and Adamu (2020) همبستگی عوامل هواشناسی با آلاینده‌های هوا در نیجریه بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که تغییر متغیرهای هواشناسی به طور قابل توجهی بر ارتباط بین آلاینده‌های هوا و ویژگی‌های فصلی و منطقه‌ای تأثیر می‌گذارد.

با توجه به مطالعات قبلی کاراترین متغیرهای هواشناسی بر آلودگی هوا، شامل مولفه‌های دما، رطوبت نسبی و فشار بوده‌اند. همچنین بررسی مطالعات نشان می‌دهد که روش سنجش‌از دور برای برآورد آلودگی هوا در نقاط مختلف جهان به کار گرفته شده است، و نتایج بهتری را در مقایسه با روش‌های تجربی ایجاد کرده است. پژوهش‌های زیادی در مورد پیش آلودگی هوا به وسیله فناوری سنجش‌از دور در ایران و جهان صورت گرفته است؛ اما در ایران کمتر به بررسی ارتباط بین آلودگی هوا با عوامل هواشناختی پرداخته شده است. تنها تحقیقات انجام شده در ایران شامل شهرستان‌های شیراز و تهران بوده که در طبقات اقلیمی خشک و نیمه‌خشک قرار می‌گیرند (Safarrad and Yousefi 2022; Abdolazimi et al. 2023). در پژوهش جاری، قصد بر ارزیابی اثر متغیرهای اقلیمی بر توزیع زمانی آلودگی هوا نظیر متغیرهای NO_2 ، O_3 و SO_2 با استفاده از داده‌های Sentinel-5P در اقلیم مرطوب شمال کشور و در حاشیه دریای خزر است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

استان مازندران با مساحتی بالغ بر 23842 km^2 در شمال کشور ایران و در محدوده جغرافیایی $35^{\circ} 47'$ تا $36^{\circ} 35'$ عرض شمالی و $50^{\circ} 34'$ تا $54^{\circ} 10'$ طول شرقی قرار دارد. این منطقه در شمال ایران و در ساحل دریای خزر واقع شده و در بین رشته‌کوه‌های البرز در شمال و کوه‌های تالش در غرب قرار گرفته است. بیشترین ارتفاع این محدوده 5670 m و کمینه ارتفاع آن 21 m از سطح دریاهای آزاد است. آب و

۲-۲- داده‌های زمینی و ماهواره Sentinel-5p

داده‌های مورد استفاده شامل ده متغیر است که از این میان شش متغیر تحت عنوان سرعت باد (m/s)، بارش (mm)، ساعات آفتابی (hr)، دما (°C)، رطوبت نسبی (%) و حداقل دید افقی (km) به‌عنوان متغیرهای زمینی و ایستگاهی مستقل هواشناسی و چهار متغیر تحت عنوان SO_2 ، NO_2 ، CO و O_3 به‌عنوان متغیر هدف در نظر گرفته شدند. متغیرهای ایستگاهی نام برده در مقیاس روزانه و طی دوره ۲۰۲۲-۲۰۱۸ از سازمان هواشناسی کشور (<https://irimo.ir>) و اطلاعات سنسور از دوری ماهواره Sentinel-5p حاصل از فعالیت سنسور TROPOMI دریافت شدند. ماهواره Sentinel-5p به‌وسیله سازمان فضایی اروپا به دنبال برنامه خود که نظارت بر محیط‌زیست و آنالیز آلاینده‌های هوا در کل کره زمین را دنبال می‌کرد، در ۱۳ اکتبر سال ۲۰۱۷ میلادی به فضا پرتاب شده است. از مأموریت‌های این ماهواره می‌توان به پایش آلاینده‌هایی مانند CO ، SO_2 ، NO_2 ، O_3 و AI اشاره کرد. سنسورهای این ماهواره برای پایش آلاینده‌های هوا در این ماهواره استفاده می‌شود سنسور TROPOMI^۱ است. این سنسور ابزاری برای پایش تروپوسفر^۲ است (Loyola et al. 2018)، این دستگاه با هندسه تصویربرداری Pushbroom، اتمسفر زمین را در سه محدوده فرابنفش و مرئی (Ultraviolet یا UV) (۲۷۰ تا ۴۹۵ nm) و مادون قرمز نزدیک (Near-infrared یا NIR) (۶۷۵ تا ۷۷۵ nm) و مادون قرمز کوتاه (Short-wavelength-infrared یا SWIR) (۲۳۰۵ تا ۲۳۸۵ nm) تصویربرداری می‌کند.

از طریق ناحیه اول می‌توان O_3 ، SO_2 ، NO_2 و HCHO (فرمالدئید) را برآورد نمود. از مزایای سنسور TROPOMI می‌توان به قدرت تفکیک مکانی بالا، پوشش جهانی روزانه و نسبت سیگنال به نویز بالا اشاره کرد (Veefkind et al. 2012). این ماهواره در حال حاضر جدیدترین ماهواره به‌منظور پایش آلودگی است، که می‌تواند اطلاعات به روز را در اختیار کاربران قرار دهد و از سایر سنسورهای مشابه SCIAMACHY و OMI با فناوری‌های پیشرفته‌تر برای کسب و ضبط اطلاعات استفاده می‌کند. سنسور TROPOMI از لحاظ توان تفکیک طیفی، مکانی و زمانی

نسبت به سنسورهای قبلی عملکرد بهتری دارد (Veefkind et al. 2012). بنابراین در مطالعه حاضر، از سنسور TROPOMI جهت پایش آلودگی استفاده می‌شود.

در این پژوهش از محصولات داده سنسور TROPOMI ماهواره Sentinel-5P به‌صورت روزانه با توان تفکیک مکانی 1000×1000 متر طی دوره ۲۰۲۲-۲۰۱۸ استفاده شد. نام داده‌های مورد استفاده شامل O_3 (tropospheric_

$NO_2_column_number_density$)، CO و SO_2 ($SO_2_column_number_density$) داری واحد mol/m^2 ($CO_column_number_density$) هستند. بدین منظور با استفاده از کد نویسی به زبان جاوا اسکریپت^۳ در محیط گوگل ارث انجین^۴ (GEE) داده‌های روزانه آلودگی هوا برای منطقه مورد مطالعه استخراج شد.

۲-۳- آزمون ناپارامتری پتیت

جهت بررسی تعیین نقطه تغییر آلودگی هوا از آزمون پتیت استفاده شده است. آزمون پتیت روشی ناپارامتریک است که نیاز به برازش دادن هیچ توزیعی بر روی سری داده‌ها ندارد. این آزمون به منظور تعیین نقطه تغییر سری زمانی استفاده می‌شود (Pettitt 1979). این روش زمان وقوع تغییر معنی‌دار در میانگین سری‌های زمانی را مشخص می‌کند (Kahya 2006). آماره آزمون $U_{t,T}$ است که آزمون می‌کند، آیا دو مجموعه نمونه X_1, \dots, X_t و X_{t+1}, \dots, X_T از یک جامعه آماری هستند، که به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود (Pettitt 1979).

$$U_{t,T} = U_{t+1} \sum_{j=1}^T Sgn(X_i - X_j) \quad (1)$$

که، t طول دوره آماری و T تعداد داده در سری آماری است. تابع $Sgn(X_i - X_j)$ با رابطه (۲) به دست می‌آید (Pettitt 1979):

$$Sgn(X_i - X_j) = \begin{cases} +1 & (X_j - X_k) > 0 \\ 0 & (X_j - X_k) = 0 \\ -1 & (X_j - X_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

³JavaScript

⁴Google Earth Engine

¹TROPOspheric Monitoring Instrument

²Troposphere

از ماتریس ضرایب همبستگی پیرسون معنی‌داری آن در سطح معنی‌داری ۵٪ بررسی شد.

۳- یافته‌ها و بحث

با استفاده از محیط گوگل ارث انجین (GEE)، توزیع زمانی- مکانی پارامترهای آلودگی (CO ، NO_2 ، SO_2 و O_3) استخراج شد. با کدگذاری به زبان جاوا اسکریپت در GEE، تصاویر چهار پارامتر آلودگی ماهواره‌ای Sentinel-5P فراخوانی شد. با استفاده از فیلترها، سال‌های مطالعه (۲۰۱۸/۶/۲۹ و ۲۰۲۲) و مکان (استان مازندران) تعریف شد. پس از آن، تصاویر دارای ابر با تعریف فیلترهای ابری فیلتر و با تعریف فیلترهای میانگین برای ۵ سال، میانگین نقشه‌ها استخراج شد. نتایج توزیع مکانی CO ، NO_2 ، O_3 و SO_2 در استان مازندران به صورت سالانه در شکل (۲) ارائه شده است.

در نهایت احتمال معنی‌داری برای نقطه تغییر $P(t)$ با استفاده از رابطه (۳) به دست می‌آید (Pettitt 1979):

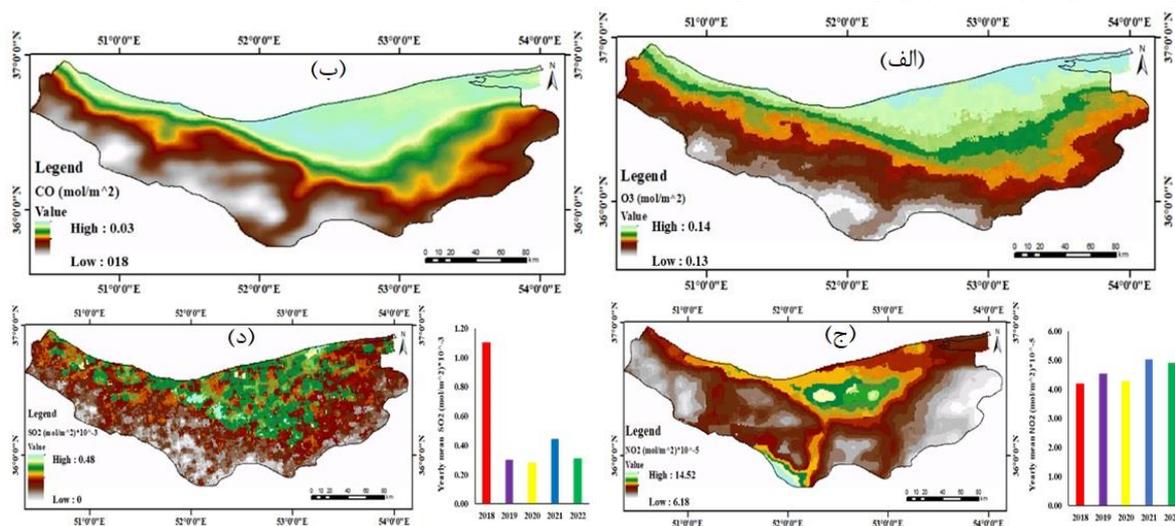
$$p \cong 2 \exp \left[\frac{-6k_T^2}{T^3 + T^2} \right] \quad (3)$$

۲-۴- آزمون همبستگی پیرسون

جهت بررسی ارتباط بین متغیرهای آلودگی هوا و هواشناسی از آزمون همبستگی پیرسون استفاده شد. ضریب همبستگی از ضرایب مهم برای تعیین میزان ارتباط و همبستگی بین دو متغیر X و Y است (Shihab 2022). این ضریب با نماد r نشان داده می‌شود و به صورت رابطه (۴) ارائه می‌شود (Shihab 2022):

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \bar{X}}{S_x} \right) \left(\frac{Y_i - \bar{Y}}{S_y} \right) \quad (4)$$

که، n تعداد داده‌های سری زمانی، S_x و S_y انحراف از معیار، \bar{X} و \bar{Y} میانگین X و Y است پس از محاسبه مقدار r با استفاده



شکل ۲- نقشه آلودگی هوا، و نمودار میله‌ای میانگین سالانه SO_2 و NO_2 : الف- O_3 ، ب- CO ، ج- NO_2 و د- SO_2 در منطقه مورد مطالعه برای بازه ۲۰۱۸-۲۰۲۲

Fig. 2 Air pollution map, and bar chart of annual mean SO_2 and NO_2 : a) O_3 , b) CO , c) NO_2 and d) SO_2 in the study area for the period 2018-2022

حدود $14/52 \text{ mol/m}^2$ استان مازندران مربوط به شهرهای با تراکم جمعیت زیاد و تردد بیش‌تر مانند ساری، قراخیل و آمل است. کم‌ترین مقدار آن حدود $6/18 \text{ mol/m}^2$ مربوط به ارتفاعات مازندران است.

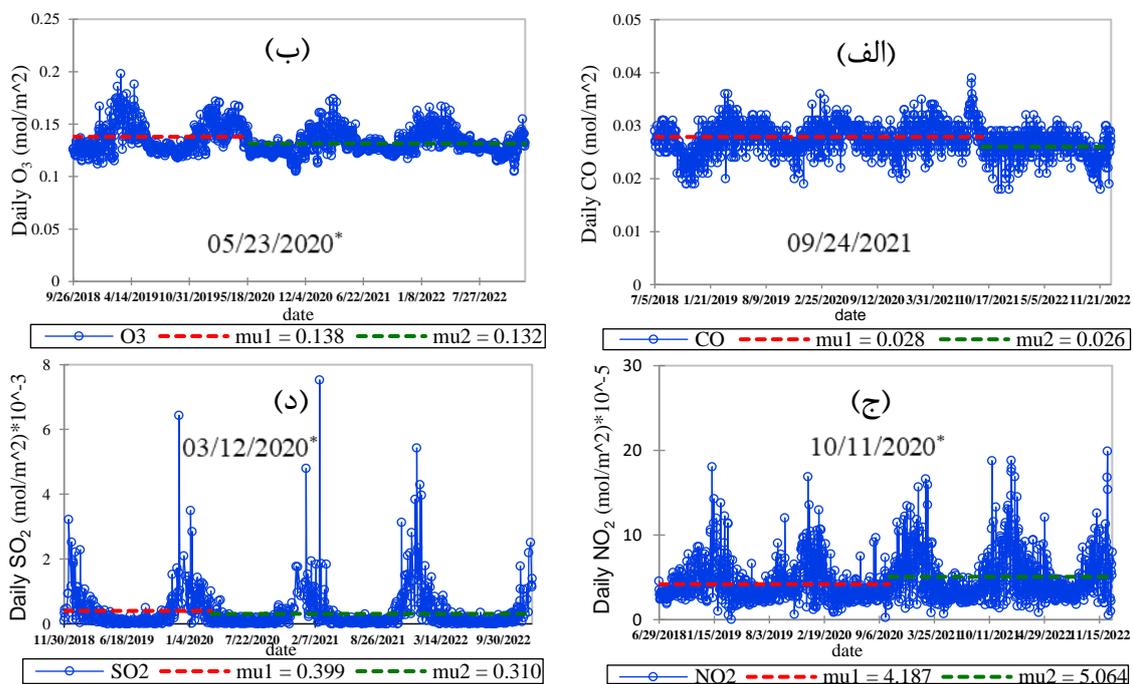
به‌طور کلی با توجه به نقشه طبقات ارتفاعی و پوشش اراضی، مناطقی که در طبقه ارتفاعی صفر تا 500 m هستند به‌دلیل صنایع بیش‌تر، تردد وسایل نقلیه، نیروگاه شهید سلیمی و سوزاندن کاه و کلش دارای آلودگی هوای بیش‌تر نسبت به

همان‌طور که از نتایج مشخص است بیش‌ترین مقدار CO و SO_2 به ترتیب حدود $0/3 \text{ mol/m}^2$ و $0/48 \text{ mol/m}^2$ مربوط به شرق مازندران و طبقه ارتفاعی صفر تا 500 m است. کم‌ترین مقدار آن حدود $0/18 \text{ mol/m}^2$ و صفر مربوط به طبقات ارتفاعی $2500-5600 \text{ m}$ است. بیش‌ترین مقدار O_3 حدود $0/14 \text{ mol/m}^2$ مربوط به شهرهای نزدیک سواحل دریای خزر مازندران است. کم‌ترین مقدار آن حدود $0/13 \text{ mol/m}^2$ مربوط به ارتفاعات بالا مازندران است. همچنین غلظت بالای NO_2

نقطه شکست سری زمانی آلاینده‌ها را به دو سری قبل نقطه تغییر و بعد از نقطه تغییر تقسیم می‌نماید، که میانگین تغییرات هر سری باهم متفاوت است. به عبارتی دیگر تغییر در ساختار سری‌های زمانی رخ داده است که این تغییرات معنی‌دار اطلاعات مهمی را در اختیار پژوهشگر می‌گذارد. به طوری که میانگین تغییرات برای CO قبل سال ۲۰۲۱ برابر ۰/۰۲۸ و بعد این سال برابر ۰/۰۲۶، برای O₃ قبل سال ۲۰۲۰ برابر ۰/۱۳۸ و بعد این سال برابر ۰/۱۳۲، برای NO₂ قبل سال ۲۰۲۰ برابر ۴/۱۸۷ و بعد این سال برابر ۵/۰۶۴ و SO₂ قبل سال ۲۰۲۰ برابر ۰/۳۹۹ و بعد این سال برابر ۰/۳۱۰ است. بیشترین تغییر میانگین مربوط به NO₂ است. که نسبت به بقیه آلاینده‌های دیگر به صورت افزایشی اتفاق افتاده است. در حالی که روند میانگین تغییرات آلاینده‌ها دیگر مانند CO، SO₂ و O₃ بعد نقطه تغییر کاهش یافته است. لذا بررسی این تغییرات ناگهانی نشان می‌دهد، عوامل طبیعی و انسانی توأم سبب تغییر در مقدار غلظت آلاینده‌ها به ویژه از سال ۲۰۲۰ به صورت افزایشی شده است. در نهایت نتایج حاصل هشدار است در مورد تغییرات آب و هوا و عوامل انسانی که در این منطقه رخ داده است.

ارتفاعات بالاتر هستند. بیش تر این طبقه ارتفاعی مربوط به کشاورزی است (شکل‌های ۱ و ۲). غلظت CO و O₃ طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ بدون تغییر بوده است، اما به نظر می‌رسد غلظت SO₂ و NO₂ در طول همه‌گیری کووید-۱۹ سال ۲۰۲۰ به دلیل شرایط قرنطینگی و محدودیت رفت‌وآمد تردد وسایل حمل و نقل نسبت به سال بعد از همه‌گیری کووید-۱۹ (۲۰۲۱-۲۰۲۲) کاهش چشم‌گیری داشته است (شکل ۲)، در تحقیق Abdolazimi et al. (2023) نیز نتایج تغییر مقادیر گاز NO₂ در سال ۲۰۲۰ نسبت به سال ۲۰۱۹ به بحران کووید-۱۹ با اثر بر کاهش تردها و ترافیک شهری اشاره شده است، که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد.

برای بررسی روند تغییرات سری زمانی هر یک از آلاینده‌ها طی دوره مورد مطالعه از آزمون همگنی پتیت بهره گرفته شده است (شکل ۳). نقطه شکست برای CO در ماه سپتامبر سال ۲۰۲۱، O₃ در ماه مه سال ۲۰۲۰ و SO₂ در ماه مارس سال ۲۰۲۰ به صورت نزولی رخ داده است. ولی برای NO₂ در ماه اکتبر سال ۲۰۲۰ به صورت صعودی رخ داده است که این تغییرات در سطح ۵٪ معنی‌دار است.



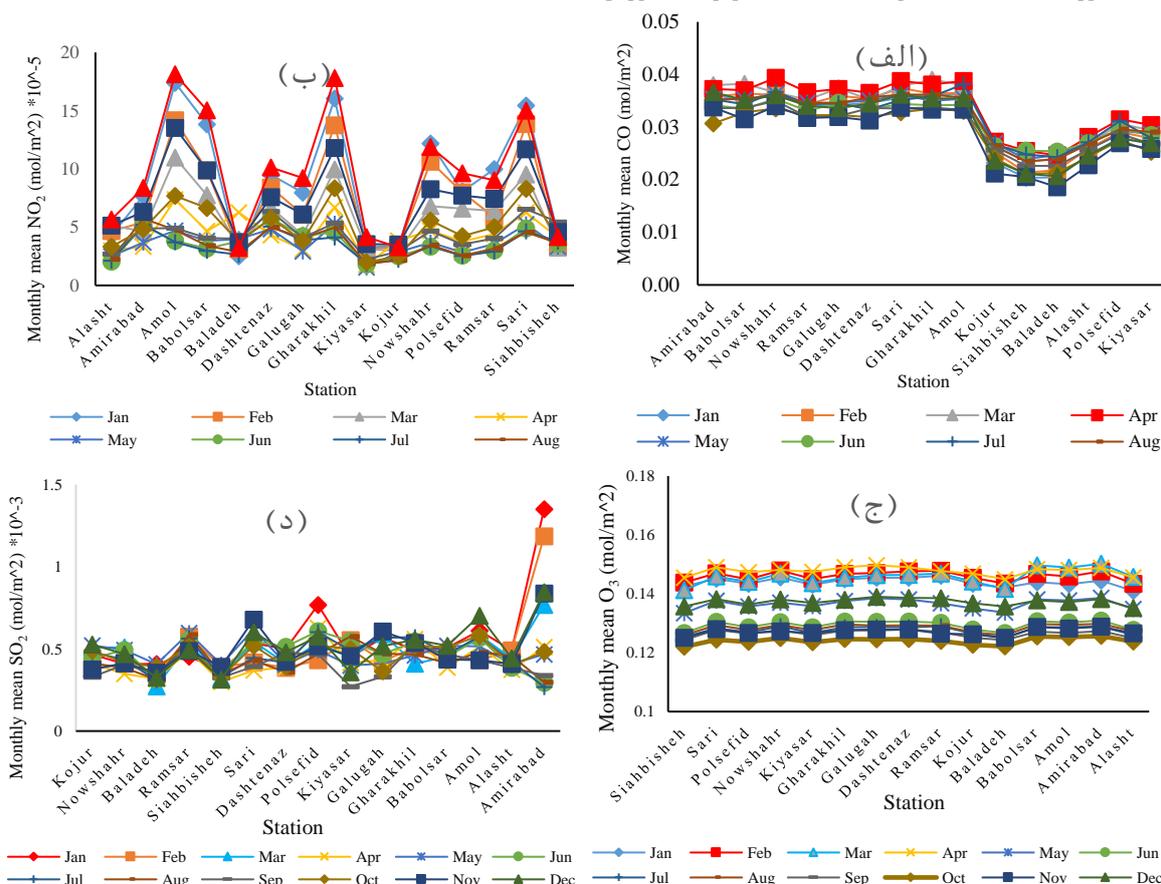
شکل ۳- نتایج آزمون پتیت برای بررسی زمان تغییر ناگهانی میانگین آلودگی هوا، میانگین: الف- CO، ب- O₃، ج- NO₂ و د- SO₂ در ماه‌های مختلف ۲۰۱۸-۲۰۲۲ منطقه مورد مطالعه

Fig. 3 The results of Petit's test to investigate the time of sudden change of air pollution mean: a) CO, b) O₃, c) NO₂ and d) SO₂ in different months of 2018-2022 in the study area

۳-۱- تغییرات ماهانه و فصلی آلودگی هوا در ایستگاه‌های مازندران

که بیشتر از ماه‌های دیگر است. غلظت NO_2 برای ایستگاه‌های مثل آمل، قراخیل، ساری و نوشهر به ترتیب در ماه‌های دسامبر، ژانویه، فوریه، نوامبر و مارس بیشتر است. غلظت O_3 تقریباً در همه ماه‌ها تفاوت خاصی رخ نداده است. همچنین بیشترین مقدار SO_2 در ماه‌های ژانویه و فوریه، مارس و دسامبر مربوط به ایستگاه امیرآباد و ماه می مربوط به پل سفید است، و کمترین مقدار این آلاینده‌ها در همه ماه‌ها مربوط به ایستگاه‌های مثل بلده، کجور و سیاه‌بیشه است که در ارتفاعات مازندران قرار دارند (شکل ۴).

ابتدا داده‌های آلودگی هوا به صورت روزانه برای هر یک از ایستگاه‌های استان مازندران با استفاده از محصولات ماهواره Sentinel-5p در GEE استخراج شد. سپس تغییرات میانگین ماهانه آلودگی هوای ایستگاه‌های استان مازندران بررسی شد (شکل ۴). غلظت CO ایستگاه‌های مثل امیرآباد، بابلسر، نوشهر و غیره استان مازندران در همه ماه‌ها بیشتر از ایستگاه‌های مانند کجور، سیاه‌بیشه، بلده و آلاشت است به‌ویژه ماه آوریل



شکل ۴- تغییرات میانگین ماهانه غلظت آلودگی هوا، عناصر: الف- CO ، ب- NO_2 ، ج- O_3 و د- SO_2 در ایستگاه‌های مازندران برای سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۱۸ بر حسب mol/m^2

Fig. 4 Monthly mean changes of air pollution concentration: a) CO , b) NO_2 , c) O_3 d) SO_2 in Mazandaran stations for the years 2018-2022 in terms of mol/m^2

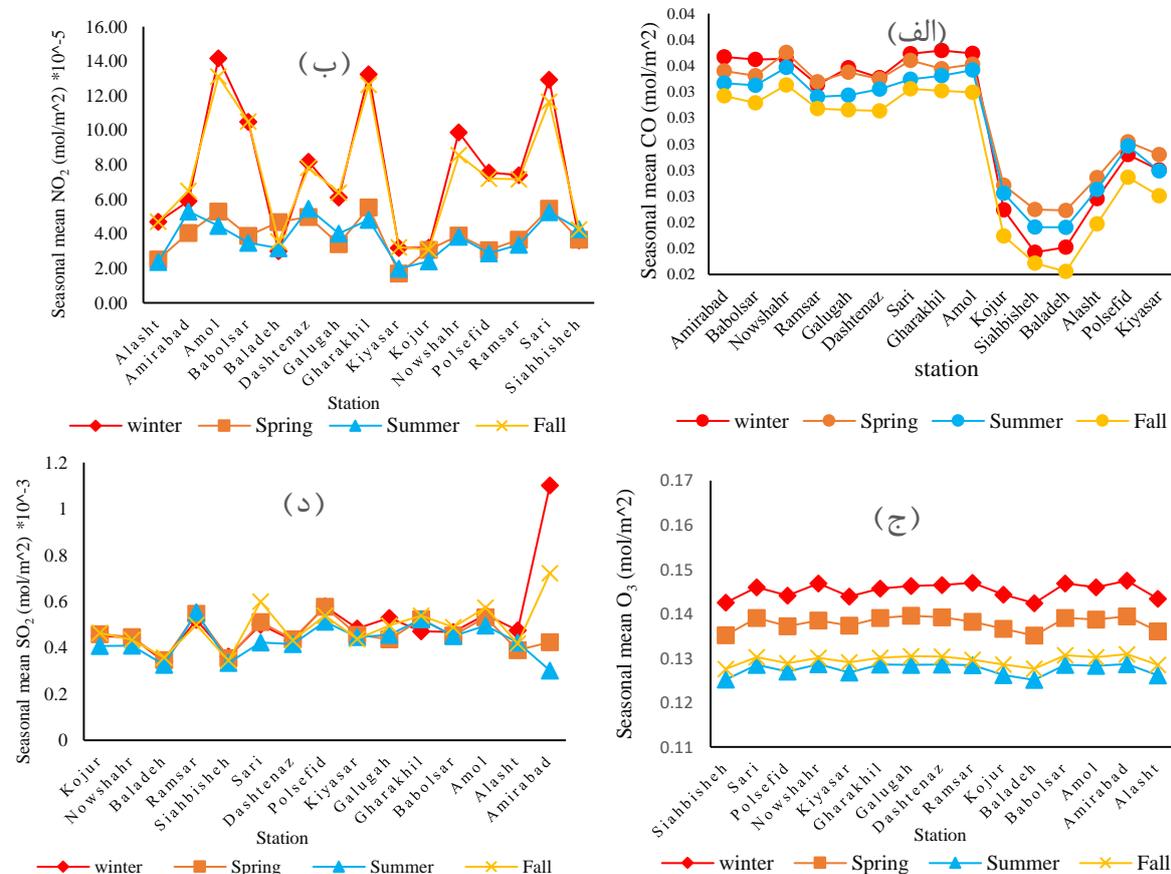
سردتر می‌توانند آلاینده‌ها را نزدیک‌تر به زمین محبوس کنند، که منجر به غلظت‌های بالاتر NO_2 می‌شود. این سطوح بالای NO_2 می‌تواند اثرات مضر بر سلامت انسان و محیط‌زیست داشته باشد. بنابراین، اجرای اقداماتی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و ترویج منابع انرژی پاک‌تر برای کاهش تأثیر آلودگی NO_2 در طول ماه‌های سرد بسیار مهم است.

در طول ماه‌های سرد سال، سطح آلودگی هوا NO_2 افزایش می‌یابد. به احتمال زیاد ترکیب دماهای پایین‌تر و شرایط آب و هوایی خاص می‌تواند به این افزایش کمک کند. همچنین با کاهش دما، مردم بیشتر به دستگاه‌های گرمایشی متکی هستند و سوخت‌های فسیلی را می‌سوزانند، و آلاینده‌ها را در هوا آزاد می‌کنند. علاوه بر این، الگوهای راکد هوا در ماه‌های

همچنین بیشترین مقدار O_3 در همه ایستگاه‌ها مربوط به فصل‌های زمستان و بهار است (شکل ۵). سطح O_3 می‌تواند در زمستان به دلیل ترکیبی از انتقال توده‌های هوای غنی از O_3 ، تغییرات دما، رطوبت و تأثیر فعالیت‌های صنعتی بالا باشد (Liu et al. 2020). بیشترین مقدار غلظت SO_2 مربوط به فصل زمستان و پاییز و کمترین مقدار آن مربوط به فصل تابستان ایستگاه امیرآباد است. به نظر می‌رسد نیروگاه شهید سلیمی نکا که در این منطقه قرار دارد در ماه‌های سرد سال مازوت سوزی و گازوئیل سوزی صورت می‌گیرد، در نتیجه باعث بالا رفتن غلظت SO_2 در فصل سرد می‌شود.

پس از این مرحله، به دلیل اینکه سطح اتمسفر دوباره شروع به گرم شدن می‌کند، غلظت این آلاینده کاهش می‌یابد (Mamtimin Meixner 2011).

تغییرات فصلی آلودگی هوای ایستگاه‌های استان مازندران در شکل (۵) نشان داده شده است. تغییرات غلظت CO در همه فصل‌ها شبیه هم است و کمترین مقدار CO مربوط به ایستگاه‌های بلده، کجور و سیاه‌بیشه است (شکل ۵). غلظت NO_2 در زمستان و پاییز ایستگاه‌های آمل، قراخیل و ساری بیش‌تر از دیگر ایستگاه‌ها است. در حالی که کمترین مقدار NO_2 مربوط به ایستگاه‌های بلده، کجور و سیاه‌بیشه در فصل زمستان است.



شکل ۵- تغییرات میانگین فصلی غلظت آلودگی هوا، عناصر: الف- CO، ب- NO_2 ، پ- O_3 و ت- SO_2 در ایستگاه‌های مازندران برای سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۱۸ بر حسب mol/m^2

Fig. 5 Seasonal mean changes of air pollution concentration: a) CO, b) NO_2 , c) O_3 and d) SO_2 stations for the years 2018-2022 in terms of mol/m^2

برای این امر از آزمون همبستگی پیرسون در سطح اعتماد ۹۵٪ استفاده می‌شود. نتایج این بررسی در جدول (۱) آورده شده است.

۲-۳- ارتباط متغیرهای آلودگی هوا با متغیرهای اقلیمی در این بخش ارتباط بین متغیرهای اقلیمی با متغیرهای آلودگی هوا در مقیاس روزانه مورد بررسی قرار گرفت، که

جدول ۱- ضریب همبستگی پیرسون بین متغیرهای آلودگی هوا با متغیرهای اقلیمی در ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 1 Pearson correlation coefficient between air pollution and climate variables in the studied stations

| Station | Variable | Relative Humidity (%) | Temperature (°C) | Wind Speed (m/s) | Precipitation (mm) | Horizontal Visibility min (km) | Sunshine Hours (hr) |
|------------|-----------------|-----------------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------------------|---------------------|
| Amol | O ₃ | -0.51* | 0.07* | -0.19* | -0.29* | 0.32* | 0.73* |
| | CO | -0.32* | 0.07* | -0.11* | -0.16* | 0.17* | 0.46* |
| | NO ₂ | -0.23* | -0.28* | -0.20* | -0.19* | 0.20* | 0.45* |
| | SO ₂ | -0.20* | -0.24* | -0.09* | -0.09* | 0.07* | 0.22* |
| Sari | O ₃ | -0.56* | 0.04 | -0.02 | -0.28* | 0.41* | 0.73* |
| | CO | -0.31* | 0.07* | 0.02 | -0.15* | 0.21* | 0.47* |
| | NO ₂ | -0.2* | -0.24* | -0.17* | -0.19* | 0.24* | 0.44* |
| | SO ₂ | -0.12* | -0.22* | -0.04 | -0.07* | 0.01 | 0.15* |
| Amirabad | O ₃ | -0.33* | 0.06* | -0.17* | -0.26* | 0.26* | 0.66* |
| | CO | -0.20* | 0.11* | -0.02 | -0.11* | 0.18* | 0.44* |
| | NO ₂ | -0.21* | 0.08* | -0.08* | -0.16* | 0.11* | 0.40* |
| | SO ₂ | 0.00 | -0.27* | -0.15* | -0.05 | -0.03 | 0.13* |
| Babolsar | O ₃ | -0.45* | 0.08* | -0.18* | -0.32* | 0.27* | 0.63* |
| | CO | -0.21* | 0.13* | -0.06* | -0.17* | 0.20* | 0.47* |
| | NO ₂ | -0.15* | -0.24* | -0.28* | -0.20* | 0.16* | 0.26* |
| | SO ₂ | -0.13* | -0.21* | -0.12* | -0.07* | 0.04 | 0.12* |
| Nowshahr | O ₃ | -0.45* | 0.06 | -0.06 | -0.37* | 0.37* | 0.66* |
| | CO | -0.13* | 0.04 | 0.02 | -0.12* | 0.12* | 0.20* |
| | NO ₂ | -0.14* | -0.32* | -0.13* | -0.19* | 0.11* | 0.27* |
| | SO ₂ | -0.12* | -0.37* | -0.12* | -0.04 | 0.02 | -0.01 |
| Ramsar | O ₃ | -0.32* | 0.10* | -0.02 | -0.23* | 0.32* | 0.71* |
| | CO | -0.23* | 0.17* | 0.02 | -0.09* | 0.17* | 0.38* |
| | NO ₂ | -0.24* | -0.01 | -0.07* | -0.15* | 0.19* | 0.50* |
| | SO ₂ | -0.13* | -0.11* | -0.03 | -0.08* | 0.10* | 0.27* |
| Galugah | O ₃ | -0.45* | 0.16* | 0.05 | -0.15* | 0.23* | 0.80* |
| | CO | -0.23* | 0.06 | 0.02 | -0.08* | 0.13* | 0.49* |
| | NO ₂ | -0.24* | -0.09* | -0.04 | -0.11* | 0.16* | 0.48* |
| | SO ₂ | -0.12* | -0.36 | -0.07 | -0.04 | 0.03 | 0.07 |
| Dashtenaz | O ₃ | -0.50* | 0.02 | -0.12* | -0.24* | 0.36* | 0.73* |
| | CO | -0.30* | 0.07* | -0.06* | -0.11* | 0.25* | 0.47* |
| | NO ₂ | -0.33* | -0.07* | -0.18* | -0.16* | 0.19* | 0.49* |
| | SO ₂ | -0.18* | -0.23* | -0.09* | -0.06* | 0.11* | 0.21* |
| Gharakhil | O ₃ | -0.59* | 0.04 | -0.15* | -0.27* | 0.41* | 0.72* |
| | CO | -0.33* | 0.08* | -0.05 | -0.10* | 0.21* | 0.42* |
| | NO ₂ | -0.27* | -0.26* | -0.22* | -0.19* | 0.27* | 0.46* |
| | SO ₂ | -0.18* | -0.22* | -0.10* | -0.08* | 0.13* | 0.19* |
| Polsefid | O ₃ | -0.66* | 0.05* | 0.14* | -0.22* | 0.47* | - |
| | CO | -0.23* | 0.10* | 0.13* | -0.05* | 0.23* | - |
| | NO ₂ | -0.42* | -0.10* | 0.03 | -0.16* | 0.26* | - |
| | SO ₂ | -0.24* | -0.15* | -0.06* | -0.05 | 0.07* | - |
| Alasht | O ₃ | -0.63* | 0.15* | 0.22* | -0.25* | 0.55* | - |
| | CO | -0.21* | 0.11* | 0.11* | -0.09* | 0.20* | - |
| | NO ₂ | -0.40* | 0.13* | 0.17* | -0.16* | 0.37* | - |
| | SO ₂ | -0.21* | -0.06* | 0.00 | -0.07* | 0.18* | - |
| Kojur | O ₃ | -0.52* | 0.08* | -0.07* | -0.21* | 0.41* | - |
| | CO | -0.13* | 0.08* | 0.07* | -0.09* | 0.13* | - |
| | NO ₂ | -0.40* | 0.22* | 0.11* | -0.15* | 0.28* | - |
| | SO ₂ | -0.21* | -0.04 | -0.08* | -0.07* | 0.15* | - |
| Siahbisheh | O ₃ | -0.43* | 0.20* | 0.15* | -0.26* | 0.39* | 0.53* |
| | CO | 0.00 | 0.16* | -0.10* | -0.16* | 0.02 | 0.25* |
| | NO ₂ | -0.23* | 0.34* | 0.00 | -0.20* | 0.23* | 0.44* |
| | SO ₂ | 0.00 | 0.11* | -0.13* | -0.06* | 0.03 | 0.13* |
| Baladeh | O ₃ | -0.52* | 0.09* | 0.08* | -0.23* | 0.35* | - |
| | CO | -0.12* | 0.11* | 0.20* | -0.13* | 0.21* | - |
| | NO ₂ | -0.46* | 0.27* | 0.20* | -0.14* | 0.24* | - |
| | SO ₂ | -0.27* | 0.02 | -0.02 | -0.06* | 0.08* | - |
| Kiyasar | O ₃ | -0.58* | 0.11* | 0.00 | -0.26* | 0.49* | 0.65* |
| | CO | -0.13* | 0.12* | -0.07* | -0.08* | 0.18* | 0.39* |
| | NO ₂ | -0.40* | 0.04 | 0.09* | -0.20* | 0.34* | 0.41* |
| | SO ₂ | -0.21* | -0.10* | 0.02 | -0.08* | 0.19* | 0.16* |

* P-Value: 0.05 significant level ns: non-significant

نسبی با متغیرهای آلودگی هوا بود، این می‌تواند مربوط دوره مطالعاتی و نحوه اندازه‌گیری آلودگی هوا باشد. به‌طوری که در تحقیق Ahmadi et al. (2015) دوره مطالعاتی طولانی (۲۰۰۹-۲۰۱۲) و از داده‌های زمینی آلودگی سنجی استفاده شده است. درحالی‌که در تحقیق جاری دوره مطالعاتی کوتاه (۲۰۲۲-۲۰۱۸) و از داده‌های ماهواره‌ای برای برآورد آلودگی هوا بهره گرفته شده است. دومین دلیل می‌تواند به دلیل اقلیم متفاوت هر دو تحقیق باشد. به‌طوری که اقلیم شهرستان سمنان سرد و نیمه‌خشک، و در غرب کشور ایران قرار دارد، بیشتر تحت تأثیر گردوغبار کشورهای همسایه مانند عراق در تابستان و بهار قرار دارد. درحالی‌که تحقیق جاری در اقلیم مرطوب و معتدل استان مازندران در شمال ایران انجام گرفته، که کمتر تحت تأثیر گردوغبار مناطق مجاور قرار دارد.

برای بررسی رابطه بین NO_2 و SO_2 با متغیرهای هواشناسی، مطالعه Banerjee et al. (2011) می‌توان اشاره کرد که در هند صورت گرفته است. آن‌ها یک رابطه منفی بین SO_2 با دما گزارش کردند. در مطالعه Kayes et al. (2019) که در هند صورت گرفت، رابطه منفی بین SO_2 و NO_2 با دما را گزارش نمودند، و به نقل از همان منبع مطالعه دیگری که در کلمبو^۱ صورت گرفت. نشان داد رابطه منفی بین SO_2 با دما وجود دارد، لذا این نتایج همسو با نتایج تحقیق جاری است. اما رابطه بین آلودگی هوا با SO_2 و دمای متوسط پیچیده است و بسته به مکان متفاوت است. به‌طوری که در مطالعه Calkins et al. (2016) که در دشت شمال چین صورت گرفته است، آن‌ها بیان کردند روزهایی با میزان SO_2 بالا با دمای کمی گرم‌تر همراه است. با این حال به نقل از همان منبع، در کلان‌شهر داکا، دریافتند که بالاترین غلظت SO_2 در فصل خشک رخ می‌دهد که معمولاً با دماهای بالاتر مرتبط است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که رابطه بین آلودگی هوای SO_2 و دمای متوسط تحت تأثیر طیف وسیعی از عوامل، از جمله فعالیت‌های صنعتی خاص مکان و شرایط هواشناسی قرار دارد.

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش جاری در راستای بررسی تغییرات آلودگی هوا به‌صورت روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه بر پایه داده‌های ماهواره‌ای، و بررسی ارتباط آن با عوامل هواشناسی انجام

این بررسی نشان می‌دهد که مؤلفه‌های ساعات آفتابی، حداقل دید افقی و دما دارای ارتباط مستقیم با تغییرات روزانه آلودگی هوا (O_3 و CO) بوده، و مؤلفه‌های رطوبت نسبی هوا، میانگین سرعت باد و میانگین دما دارای ارتباط معکوس با تغییرات روزانه آلودگی هوا (SO_2 و NO_2) هستند. از این میان بیشترین شدت همبستگی متعلق به متغیر ساعات آفتابی بوده است، که قدر مطلق ضرایب همبستگی آن در همه ایستگاه‌ها بین ۰/۵ تا ۰/۸ است. به‌طوری که بیشترین همبستگی آن متعلق به ایستگاه گلوگاه و به مقدار ۰/۸ است.

همان‌طور که مشاهده شده از بین متغیرهای آلودگی هوا NO_2 و SO_2 با متغیر میانگین دما دارای رابطه منفی است. به نظر می‌رسد افزایش سطوح متغیرهای هواشناسی مانند بارش، رطوبت و سرعت باد باعث کاهش غلظت اتمسفر آلاینده‌های فوق می‌شود. لذا مطالعات متعددی از جمله (Shihab 2022; Palmeira et al. 2022) نشان دادند بین متغیرهای هواشناسی و آلودگی هوا همبستگی معنی‌داری وجود دارد. نتایج تحقیق جاری نیز نشان داد بین آلودگی هوا و متغیرهای هواشناسی همبستگی وجود دارد که همسو با نتایج تحقیقات فوق‌الذکر است. برای مثال ارتباط بالای ساعات آفتابی و تابش نور مستقیم خورشید بر تولید آلاینده از ن بسیار مشهود است. یا برای بررسی آلودگی هوا، مطالعه Li et al. (2021) می‌توان اشاره کرد، که در دشت شمال چین انجام گرفت. آن‌ها نشان دادند O_3 در فصل زمستان و بهار بیشتر است. مطالعه Farhadi et al. (2020) که در تهران ایران صورت گرفت. آن‌ها نشان دادند CO در فصل زمستان بیشتر است. این نتایج همسو با نتایج تحقیق جاری است. مطالعه دیگری که Ahmadi et al. (2015) در سمنان صورت گرفت، نشان داد بیشترین غلظت آلاینده (SO_2) در روزهای سرد سال (دی تا بهمن) مشاهده شد. همسو با نتایج تحقیق جاری است. اما برخلاف نتایج پژوهش جاری Ahmadi et al. (2015) اذعان داشتند، که بیشترین غلظت NO_2 ، O_3 در تابستان و بهار و کمترین غلظت در فصول سرد سال مشاهده شد. همچنین Ahmadi et al. (2015) نتیجه گرفتند عوامل هواشناسی مانند دمای هوا، رطوبت نسبی و سرعت باد با متغیرهای آلودگی هوا بیشترین همبستگی را دارند. درحالی‌که در تحقیق جاری بیشترین همبستگی مربوط به ساعات آفتابی و رطوبت

¹ Colombo

سیاسگزاری

این مقاله از رساله دکتری مصوب در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری استخراج شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از سازمان هواشناسی کشور به ویژه استان مازندران که ما را در انجام این پژوهش یاری دادند، اعلام کنند. لازم به ذکر است که در انجام این پژوهش از هیچ سازمان یا نهادی کمک مالی دریافت نشده است. در پایان از جناب مهندس هوشنگ بهزادی نیز بابت حمایت‌های معنوی ایشان به عنوان مدیرکل اداره هواشناسی استان مازندران نیز تشکر می‌گردد.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های تولید شده در این پژوهش در متن مقاله ارائه شده است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که، هیچ‌گونه تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

References

- Abdolazimi, H., Farhadi, H., Roosta, H., & Mokhtari, N. (2023). Monitoring of the Nitrogen Dioxide Concentration in the Period of Covid-19 Using Sentinel-5 Satellite Data (Case Study: Shiraz Metropolis). *J. Nat. Environ. Hazards.*, 12(38), 1-1, DOI: [10.22111/jneh.2023.45267.1949](https://doi.org/10.22111/jneh.2023.45267.1949). [In Persian].
- Ahmadi, H., Ahmadi, T., Shahmoradi, B., Mohammadi, S., & Kohzadi, S. (2015). The effect of climatic parameters on air pollution in Sanandaj, Iran. *J. Adv. Environ. Health Res.*, 3(1), 49-61, DOI: [10.22102/jaehr.2015.40185](https://doi.org/10.22102/jaehr.2015.40185). [In Persian].
- Banerjee, T., Singh, S. B., & Srivastava, R. K. (2011). Development and performance evaluation of statistical models correlating air pollutants and meteorological variables at Pantnagar, India. *Atmos. Res.*, 99(3-4), 505-517, DOI: [10.1016/j.atmosres.2010.12.003](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.12.003).
- Calkins, C., Ge, C., Wang, J., Anderson, M., & Yang, K. (2016). Effects of meteorological conditions on sulfur dioxide air pollution in the North China plain during winters of 2006–
2015. *Atmos. Environ.*, 147, 296-309, DOI: [10.1016/j.atmosenv.2016.10.005](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.10.005).
- Farhadi, R., Hadavifar, M., Moeinaddini, M., & Amintoosi, M. (2020). Prediction of Air Pollutants Concentration Based on Meteorological Factors in Warm and Cold Season by Artificial Neural Network and Linear Regression, Case Study: Tehran. *J. Nat. Environ.*, 73(1), 115-127, DOI: [10.22059/jne.2020.278331.1681](https://doi.org/10.22059/jne.2020.278331.1681). [In Persian].
- Ghanbari, N., Shujaee, S., Ashrafipour, R. (2006). Investigating the state of air pollution in Mazandaran province and predicting the worsening of its environmental effects in the future (pp. 1-15). *the first specialized conference on environmental engineering*, Tehran. [In Persian].
- Ghannadi, M. A., Shahri, M., & Moradi, A. (2022). Air pollution monitoring using Sentinel-5 (Case study: Big industrial cities of Iran). *Environ. Sci.*, 20(2), 81-98, DOI: [10.52547/envs.2022.1026](https://doi.org/10.52547/envs.2022.1026). [In Persian].

- Gharibi, S., & Shayesteh, K. (2021). Application of Sentinel 5 satellite imagery in identifying air pollutants Hotspots in Iran. *J. Spatial Anal. Environ. Hazard.*, 8(3), 123-138, DOI: [10.52547/jsaeh.8.3.123](https://doi.org/10.52547/jsaeh.8.3.123) [In Persian].
- Ghorbani, M., Mahmoodi, A., Shokat Fadaee, M., & Khaledi, M. (2021). Investigating the Relationship between Air Pollutants and Meteorological Parameters in the Agricultural Sector of Mazandaran Province Using Logistic Regression. *Geogr. Environ. Sustain.*, 10(4), 17-37, DOI: [10.22126/ges.2021.5677.2285](https://doi.org/10.22126/ges.2021.5677.2285). [In Persian].
- He, J., Yu, Y., Xie, Y., Mao, H., Wu, L., Liu, N., & Zhao, S. (2016). Numerical model-based artificial neural network model and its application for quantifying impact factors of urban air quality. *Water Air Soil Pollut.*, 227, 1-16, DOI: [10.1007/s11270-016-2930-z](https://doi.org/10.1007/s11270-016-2930-z).
- Kayes, I., Shahriar, S. A., Hasan, K., Akhter, M., Kabir, M. M., & Salam, M. A. (2019). The relationships between meteorological parameters and air pollutants in an urban environment. *Global J. Environ. Sci. Manage.*, 5(3), 265-278, DOI: [10.22034/GJESM.2019.03.01](https://doi.org/10.22034/GJESM.2019.03.01).
- Kazemi Garajeh, M., Laneve, G., Rezaei, H., Sadeghnejad, M., Mohamadzadeh, N., & Salmani, B. (2023). Monitoring Trends of CO, NO₂, SO₂, and O₃ Pollutants Using Time-Series Sentinel-5 Images Based on Google Earth Engine. *Pollutants*, 3(2), 255-279, DOI: [10.3390/pollutants3020019](https://doi.org/10.3390/pollutants3020019).
- Li, K., Jacob, D. J., Liao, H., Qiu, Y., Shen, L., Zhai, S., ... & Kuk, S. K. (2021). Ozone pollution in the North China Plain spreading into the late-winter haze season. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 118(10), e2015797118, DOI: [10.1073/pnas.2015797118](https://doi.org/10.1073/pnas.2015797118).
- Liu, H., Liu, J., Liu, Y., Ouyang, B., Xiang, S., Yi, K., & Tao, S. (2020). Analysis of wintertime O₃ variability using a random forest model and high-frequency observations in Zhangjiakou—an area with background pollution level of the North China Plain. *Environ. Pollut.*, 262, 114191, DOI: [10.1016/j.envpol.2020.114191](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114191).
- Loyola, D. G., Gimeno García, S., Lutz, R., Argyrouli, A., Romahn, F., Spurr, R. J., & Schüssler, O. (2018). The operational cloud retrieval algorithms from TROPOMI on board Sentinel-5 Precursor. *Atmos. Meas. Tech.*, 11(1), 409-427, DOI: [10.5194/amt-11-409-2018](https://doi.org/10.5194/amt-11-409-2018)
- Mamtimin, B., & Meixner, F. X. (2011). Air pollution and meteorological processes in the growing dryland city of Urumqi (Xinjiang, China). *Sci. Total Environ.*, 409(7), 1277-1290, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2010.12.010](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.12.010).
- Oji, S., & Adamu, H. (2020). Correlation between air pollutants concentration and meteorological factors on seasonal air quality variation. *J. Air Pollut. Health*, 5(1), 11-32, DOI: [10.18502/japh.v5i1.2856](https://doi.org/10.18502/japh.v5i1.2856).
- Palmeira, A., Pereira, É., Ferreira, P., Diele-Viegas, L. M., & Moreira, D. M. (2022). Long-Term Correlations and Cross-Correlations in Meteorological Variables and Air Pollution in a Coastal Urban Region. *Sustain.*, 14(21), 14470, DOI: [10.3390/su142114470](https://doi.org/10.3390/su142114470).
- Partal, T., & Kahya, E. (2006). Trend analysis in Turkish precipitation data. *Hydrol. Process: Int. J.*, 20(9), 2011-2026, DOI: [10.1002/hyp.5993](https://doi.org/10.1002/hyp.5993)
- Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 28(2), 126-135. DOI: <https://doi.org/10.2307/2346729>
- Safarianzengir, V., Sobhani, B., Yazdani, M. H., & Kianian, M. (2020). Monitoring, analysis and spatial and temporal zoning of air pollution (carbon monoxide) using Sentinel-5 satellite data for health management in Iran, located in the Middle East. *Air Qual. Atmos. Health*, 13, 709-719, DOI: [10.1007/s11869-020-00827-5](https://doi.org/10.1007/s11869-020-00827-5)
- Safarrad, T., & Yousefi, Y. (2022). Investigation of air pollution in Tehran according wind and precipitation conditions. *J. Environ. Stud.*, 48(3), 387-402. DOI: [10.22059/jes.2022.343398.1008320](https://doi.org/10.22059/jes.2022.343398.1008320). [In Persian].
- Saw, G. K., Dey, S., Kaushal, H., & Lal, K. (2021). Tracking NO₂ emission from thermal power plants in North India using TROPOMI data. *Atmos. Environ.*, 259, 118514, DOI: [10.1016/j.atmosenv.2021.118514](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118514)

- Shihab, A. S. (2022). Investigating the Relationship between Air Pollutants and Meteorology: A Canonical Correlation Analysis. *Pol. J. Environ. Stud.*, 31(6), 5841-5849. [10.15244/pjoes/151908](https://doi.org/10.15244/pjoes/151908).
- Soleimany, A., Grubliauskas, R., & Šerevičienė, V. (2021). Application of satellite data and GIS services for studying air pollutants in Lithuania (case study: Kaunas city). *Air Qual. Atmos. Health*, 14(3), 411-429, DOI: [10.1007/s11869-020-00946-z](https://doi.org/10.1007/s11869-020-00946-z)
- Tonion, F., & Pirotti, F. (2022). SENTINEL-5P NO₂ data: Cross-validation and comparison with ground measurements. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 43, 749-756, DOI: [10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2022-749-2022](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2022-749-2022).
- Veefkind, J. P., Aben, I., McMullan, K., Förster, H., De Vries, J., Otter, G., Claas, J., de Haan, J. F., Kleipool, Q., van Weele, M., Hasekamp, O., Hoogeveen, R., Landgraf, J., Snel, R., Tol, P., Ingmann, P., Voors, R., Kruizingo, B., Vink, R., & Levelt, P. F. (2012). TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sens. Environ.*, 120, 70-83, DOI: [10.1016/j.rse.2011.09.027](https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027).
- World Health Organization. (2018). Air pollution and child health: *prescribing clean air: summary* (No. WHO/CED/PHE/18.01). World Health Organization.