



University of Tehran Press

Journal of Environmental Studies
Vol. 50, No. 3, Autumn 2024

Journal Homepage: www.Jes.ut.ac.ir
Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

Investigation of the Polar Pattern of Air Pollution Based on Meteorological Factors in the Coastal Belt of Mazandaran Province

Hadigheh Bahrami-Pichaghchi¹, **Reza Norooz-Valashedi**²✉, **Mohammad Ali Gholami Sefidkouhi**³

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, University of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran, Email: h.bahrami@stu.sanru.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, University of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran, Email: r.norooz@sanru.ac.ir
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, University of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran, Email: ma.gholami@sanru.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Research Article:
Research Paper

Article history:

Received: 22 July 2024

Received: 22 October 2024

Accepted: 23 October 2024

Publish online:

21 November 2024

Keywords:

Bivariate polar plots, GEE, NO₂, Pollutant

Air pollution is one of the most significant environmental issues, as exposure to air pollutants is widely linked to various health problems. This study aimed to investigate the polar pattern of air pollution based on meteorological factors in the coastal belt of Mazandaran Province. Data on the concentrations of SO₂, CO, NO₂, and O₃ from the TROPOMI sensor, along with meteorological variables (wind speed and direction), were analyzed for the period from 2018 through 2022. Time series plots, Wind Rose diagrams, Pollution Rose diagrams, and bivariate polar plots were employed for data analysis and identification of emission sources. The examination of temporal patterns revealed that, at most stations, the highest concentrations of SO₂, CO, and NO₂ occurred in 2021, while the peak O₃ concentration was recorded in 2019. Annual analyses using Wind Rose and Pollution Rose diagrams indicated that the predominant wind direction associated with pollutant concentrations in Amirabad and Babolsar stations aligned with wind speed. In contrast, Ramsar and Nowshahr stations displayed different relationships between wind speed and pollutant concentration direction. Moreover, the polar patterns in the Wind Rose and Pollution Rose diagrams for two seasonal variables demonstrated that the directions of wind speed and pollutant concentration differed, with the highest concentration of each pollutant occurring at low wind speeds. The findings also indicated that the eastern areas of the Mazandaran coastal strip experience higher levels of air pollution compared to the western part of the study area, attributed to weather conditions, a higher density of industries, increased vehicle traffic, the Shahid Salimi Power Plant, Miankaleh peninsula, and the burning crop residues. Therefore, employing visual polar analysis for pollution management is expected to be highly effective.

Cite this article: Bahrami-Pichaghchi, H., Norooz-Valashedi, R., Gholami Sefidkouhi, M. A. (2024). Investigation of the Polar Pattern of Air Pollution Based on Meteorological Factors in the Coastal Belt of Mazandaran Province. *Journal of Environmental Studies*, 50 (3), 371- 390. <http://doi.org/10.22059/jes.2024.378057.1008507>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: 10.22059/jes.2024.378057.1008507

Extended Abstract

Introduction

Pollution is defined as environmental contamination caused by substances in the atmosphere that are harmful to human health and other living organisms. The concentration of air pollutants is strongly influenced by factors such as transportation, chemical transformations, atmospheric conditions, topography, geography, and the interaction between pollutants. To evaluate these changes, air quality models are employed to estimate the distribution of pollutants released into the atmosphere. Various mathematical modeling approaches for air quality can be found in the scientific literature, one of which is the receptor model. This model utilizes statistical techniques to estimate the extent of diffusion over both local and long distances. Receptor models are commonly used to identify, describe, and monitor the distribution of air pollutant sources. Among these models are Wind Rose and Pollution Rose plots, bivariate polar plots, clustering, and conditional bivariate probability functions. These models are implemented in the OpenAir package of R statistical software, facilitating the analysis of atmospheric data. Additionally, the analysis of polar diagrams, wind, and dust pollution allows for the assessment of changes in contributions from specific sources as a function of wind direction and time. This research aims to investigate the polar pattern of air pollution based on meteorological factors in the coastal belt of Mazandaran Province during the period from 2018 through 2022.

Materials and Methods

Mazandaran Province, covering an area of 223,842 km², is located in the north of Iran, within the geographical range of 35°47' to 36°35' north latitude and 50°34' to 54°10' east longitude. The data used in this study includes six variables, with two variables—wind speed (m/s) and wind direction—considered as effective variables, and four target variables: SO₂, NO₂, CO, and O₃. These variables were obtained daily from the National Meteorological Organization (<https://irimo.ir>) and the TROPOMI sensor for the period of 2018-2022. The Wind Rose and Pollution Rose plots were utilized to determine the direction of wind speed and pollutants, while bivariate polar analytical plots were employed to identify potential emission sources of pollutants.

Discussion

Using the Google Earth Engine (GEE) environment, the temporal distribution of air pollution parameters (SO₂, CO, NO₂, and O₃) was extracted. By coding in JavaScript within GEE, images of these four pollution parameters from the Sentinel-5P satellite were retrieved. Filters were applied to define the study years (from June 29, 2018, to 2022) and locations (Amirabad, Ramsar, Babolsar, and Nowshahr stations along the coastal strip of Mazandaran Province). Images containing clouds were excluded using cloud filters, and the daily averages were calculated to extract time series data for each pollutant according to the meteorological stations under study.

Since Wind Rose, Pollution Rose, and bivariate polar plots are instrumental in identifying sources of air pollution, the sources at Amirabad station include the Shahid Salimi Power Plant to the west, Miankaleh to the east, and traffic along the coastal road to the north. Additionally, the NO₂ pollutant in the summer season, originating from the northwest direction, indicates severe pollution in the vicinity of the Neka Power Plant, attributed to increased electricity production during this season when all power plant units are operational. At Babolsar station, traffic from the north and heating devices burning fossil fuels during winter are identified as sources of CO, SO₂, and O₃ pollution, with prevailing wind directions from the north, northwest, and east. The burning of straw and stubble in spring and autumn is also likely a source of CO and O₃ pollution. Finally, the graphs indicate that in other wind directions, pollutant concentrations are minimal, suggesting a lack of significant pollution sources in those areas.

Conclusions

The current research aimed to investigate the analytical patterns of Wind Rose, Pollution Rose, and bivariate polar air pollution on a daily, seasonal, and annual basis using satellite data, while also examining their relationship with meteorological variables. In this regard, the four air pollution variables—CO, NO₂, SO₂, and O₃—were analyzed. Overall, the highest concentrations of SO₂, CO, and NO₂ at most stations were recorded in 2021, while the peak O₃ concentration occurred in 2019. These results indicate that even during the COVID-19 pandemic and quarantine, pollutant concentrations along the coastal strip of Mazandaran increased. The annual Wind Rose and Pollution Rose plots were consistent with the prevailing wind direction, wind speed, and pollutant concentrations at Amirabad and Babolsar stations. However, Ramsar and Nowshahr stations exhibited different relationships between wind speed and pollutant concentrations. Consequently, the relationship between wind speed and air pollution is complex and varies based on location, season, and pollutant type. Seasonal Wind Rose and bivariate polar plots for wind speed and pollutants also displayed differences, with maximum concentrations of each pollutant occurring at low wind speeds.



بررسی الگوی قطبی آلودگی هوا بر اساس عوامل هواشناختی در نوار ساحلی استان مازندران

حدیقه بهرامی پیچاقچی^۱، رضا نوروز ولاشیدی^۲، محمدعلی غلامی سفیدکوهی^۳

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، رایانامه: h.bahrami@stu.sanru.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، رایانامه: r.norooz@sanru.ac.ir
۳. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، رایانامه: ma.gholami@sanru.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	آلودگی هوا یکی از مهم‌ترین مسایل محیط‌زیستی است. زیرا قرار گرفتن در معرض آلاینده‌های هوا به طور گسترده با مشکلات سلامتی مرتبط است. این مطالعه با هدف بررسی الگوی قطبی آلودگی هوا بر اساس عوامل هواشناختی در نوار ساحلی استان مازندران صورت گرفت. از داده‌های غلظت SO_2 ، CO ، NO_2 ، O_3 سنجنده TROPOMI و متغیرهای هواشناسی (سرعت و جهت باد) در دوره ۲۰۲۲-۲۰۱۸ بهره گرفته شد. نمودارهای سری زمانی، گلباد، گلغبار و قطبی دو متغیره برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و شناسایی منابع انتشار استفاده شد. بررسی الگوی تغییرات زمانی نشان داد در اکثر ایستگاه‌ها بیشترین مقدار SO_2 ، CO و NO_2 مربوط به سال ۲۰۲۱ و O_3 مربوط به سال ۲۰۱۹ است. نتایج بررسی در مقیاس سالانه گلباد و گلغبار نشان داد جهت باد غالب غلظت آلاینده‌ها در ایستگاه امیرآباد و بابلسر هم جهت سرعت باد است، در حالی که ایستگاه رامسر و نوشهر جهت سرعت باد با جهت غلظت آلاینده‌ها متفاوت است. اما الگوی قطبی موجود در گلباد و گلغبار دو متغیره فصلی نشان داد جهت سرعت باد و آلاینده با هم متفاوت است به طوری که بیشترین مقدار غلظت هر یک از آلاینده‌ها در سرعت باد پایین اتفاق افتاده است. همچنین نتایج نشان داد مناطقی که در شرق نوار ساحلی مازندران هستند به دلیل شرایط آب و هوایی، صنایع بیشتر، تردد وسایل نقلیه، نیروگاه شهید سلیمی، تالاب میانکاله و سوزاندن بقایای گیاهی دارای آلودگی هوای بیشتری نسبت به غرب منطقه مورد مطالعه هستند. بنابراین ارزیابی تحلیل بصری قطبی جهت مدیریت آلودگی بسیار کارآمد خواهد بود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۲	
تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۰۹/۰۱	
کلیدواژه‌ها: آلاینده، نمودار قطبی دو متغیره، NO_2 ، GEE	

استناد: بهرامی پیچاقچی، حدیقه؛ نوروز ولاشیدی، رضا؛ غلامی سفیدکوهی محمدعلی. (۱۴۰۳). بررسی الگوی قطبی آلودگی هوا بر اساس عوامل هواشناختی در نوار ساحلی استان مازندران. نشریه محیط‌شناسی، ۵۰ (۳)، ۳۷۱-۳۹۰.
<http://doi.org/10.22059/jes.2024.378057.1008507>

DOR: 20.1001.1.10258620.1403.50.3.7.8

© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.



DOI: 10.22059/jes.2024.378057.1008507

۱. مقدمه

آلودگی به‌عنوان آلودگی محیط‌زیست ناشی از وجود موادی در جو، که برای سلامتی انسان و سایر موجودات زنده مضر است تعریف می‌شود (Manisalidis et al., 2020). این پدیده هر ساله باعث حدود ۷ میلیون مرگ زودرس می‌شود (WHO, 2021)، که بیش از پنج برابر تعداد افراد کشته شده در تصادفات رانندگی است و از تعداد رسمی مرگ و میر ناشی از COVID-19 فراتر می‌رود (Espinoza-Guillen et al., 2023). آلودگی هوا از منابع طبیعی و انسانی نشأت می‌گیرد، که دومی بزرگترین انتشاردهنده آلاینده‌های جوی است (Lang et al., 2016; Yang et al., 2016). سازمان بهداشت جهانی به‌ویژه نگران پنج آلاینده اصلی است که برای آنها محدودیت یا استانداردهایی تعیین کرده است که می‌توانند برای ارزیابی اثرات بالقوه سلامت مورد استفاده قرار گیرند (WHO, 2021). این آلاینده‌ها ذرات معلق، دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)^۱، دی‌اکسید گوگرد (SO_2)^۲، و ازن (O_3)^۳ هستند. علاوه بر این، آلاینده‌های هوا مانند ذرات معلق (PM)، مونوکسید کربن (CO)^۴، NO_2 و SO_2 و O_3 به عنوان عوامل خطر مهم برای اختلالات قلبی عروقی و تنفسی و محرک‌های مرگ‌ومیر جهانی شناخته می‌شوند (Sheng and Tang, 2013). بنابراین، اندازه‌گیری و دانستن مقدار دقیق آلاینده‌ها، برای کاهش اثرات مرگبار آلاینده‌ها بر روی محیط‌زیست و موجودات زنده بسیار حایز اهمیت است. جهت برآورد مقدار کمی آلودگی هوا، ابزارهای مختلفی نظیر اندازه‌گیری ماهواره، آزمایشگاهی، ایستگاه‌های زمینی و مدل‌سازی وجود دارد. در میان این روش‌ها ماهواره، آلاینده‌ها را با دقت زمانی و مکانی بسیار بالاتری از روش‌های دیگر برآورد می‌نماید (Saw et al. 2021). لذا آلودگی هوا یکی از مهم‌ترین مشکلات محیط‌زیستی در مناطق شهری و صنعتی است که تاثیرات قابل توجهی بر سلامت انسان و محیط‌زیست دارد. عوامل مختلفی از جمله فعالیت‌های انسانی، شرایط آب و هوایی و توپوگرافی منطقه در پراکندگی و تجمع آلاینده‌های هوا نقش دارند. درک الگوهای مکانی و زمانی آلودگی هوا و شناسایی عوامل موثر بر آن، می‌تواند به مدیریت و کنترل آلودگی هوا کمک شایانی کند. غلظت آلاینده‌های هوا به‌شدت تحت تاثیر حمل‌ونقل، دگرگونی‌های شیمیایی، شرایط جوی، توپوگرافی و جغرافیا، برهم‌کنش بین آلاینده‌ها و غیره قرار می‌گیرد (De Simone et al., 2014). برای ارزیابی این تغییرات، از مدل‌های کیفیت هوا استفاده می‌شود که برای تخمین توزیع آلاینده‌های منتشر شده در جو انجام می‌شود (Demirarslan & Zeybek, 2021). رویکردهای متعددی برای مدل‌سازی ریاضی کیفیت هوا در ادبیات علمی یافت می‌شود که یکی از آنها مدل گیرنده^۵ است. این مدل از تکنیک‌های آماری برای تخمین میزان انتشار در فواصل محلی و طولانی استفاده می‌کند. مدل‌های گیرنده اغلب برای شناسایی، توصیف و نظارت بر توزیع منابع آلاینده‌های هوا استفاده می‌شوند (Uria-Tellaetxe & Carslaw, 2014; Hopke, 2016; Demirarslan & Zeybek, 2021). در میان این مدل‌ها، نمودارهای گلباد و گلغبار، قطبی دو متغیره^۶، خوشه‌بندی و تابع احتمال دو متغیره شرطی وجود دارد (Demirarslan & Zeybek, 2021). این مدل‌ها در بسته openair نرم‌افزار آماری R، طراحی شده که برای تجزیه‌وتحلیل داده‌های جوی پیاده سازی می‌شود (Uria-Tellaetxe & Carslaw, 2014; Carslaw, 2021). به همین ترتیب، تحلیل نمودار قطبی، گلباد و گلغبار آلودگی امکان ارزیابی تغییرات سهم از یک منبع خاص را به عنوان تابعی از جهت و زمان باد فراهم می‌کند (Yeganeh et al., 2021). نوار ساحلی استان مازندران به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود، از جمله مناطق مهم در زمینه آلودگی هوا در ایران است. این منطقه با داشتن فعالیت‌های صنعتی و انسانی گسترده، همچنین شرایط آب و هوایی خاص (مانند بادهای دریایی و توپوگرافی کوهستانی)، الگوهای پیچیده‌ای از آلودگی هوا را تجربه می‌کند. بررسی این الگوها و عوامل موثر بر آن، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را برای مدیریت آلودگی هوا در این منطقه فراهم کند. در این راستا، مطالعه حاضر جهت بررسی الگوی قطبی آلودگی هوا بر اساس عوامل هواشناختی در نوار ساحلی استان مازندران انجام شده است. استفاده از نمودارهای قطبی به همراه تحلیل ارتباط بین آلودگی هوا و متغیرهای هواشناختی، امکان شناسایی الگوهای مکانی و زمانی آلودگی هوا و عوامل موثر بر

1. Nitrogen dioxide
2. Sulfur dioxide
3. Ozone
4. Carbon monoxide
5. Receptor model
6. Bivariate polar graphs

آن را فراهم می‌کند.

علاوه بر اهمیت موضوع، مطالعه حاضر از جنبه نوآوری نیز حایز اهمیت است. اگرچه مطالعات متعددی در زمینه آلودگی هوا در ایران انجام شده است، اما بررسی الگوهای قطبی آلودگی هوا و ارتباط آن با عوامل هواشناختی در مازندران، موضوعی است که کمتر مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از نمودارهای قطبی به همراه تحلیل همبستگی و رگرسیون چندگانه، امکان شناسایی الگوهای مکانی و زمانی آلودگی هوا و عوامل موثر بر آن را فراهم می‌کند. همچنین، انجام این مطالعه در محدوده استان مازندران، با توجه به شرایط آب و هوایی و توپوگرافی خاص این منطقه، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را در مورد الگوهای آلودگی هوا در مناطق ساحلی کشور فراهم کند. در مجموع، مطالعه حاضر با هدف بررسی الگوی قطبی آلودگی هوا بر اساس عوامل هواشناختی در نوار ساحلی استان مازندران انجام شده است. نتایج این مطالعه می‌تواند به درک بهتر الگوهای آلودگی هوا و عوامل موثر بر آن در این منطقه کمک کرده و به عنوان راهنمایی برای سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌ریزی‌های مرتبط با کنترل و مدیریت آلودگی هوا مورد استفاده قرار گیرد.

۲. پیشینه پژوهش

مطالعات متعددی در زمینه آلودگی هوا و عوامل موثر بر آن در سطح جهان و در ایران انجام شده است. در سطح بین‌المللی، برخی از این مطالعات به بررسی الگوهای مکانی و زمانی آلودگی هوا و ارتباط آن با متغیرهای هواشناختی پرداخته‌اند. که در ادامه به صورت مبسوط به آن پرداخته خواهد شد. در این مطالعات به الگوهای قطبی آلودگی هوا با سرعت و جهت باد و در برخی ارتباط نزدیک بین آلودگی هوا و پارامترهای هواشناختی مانند دما، رطوبت نسبی و سرعت باد را مورد بررسی قرار خواهند داد. در ایران نیز مطالعات مختلفی در زمینه آلودگی هوا انجام شده است. با این حال، مطالعات محدودی در زمینه بررسی الگوهای قطبی آلودگی هوا و ارتباط آن با عوامل هواشناختی در نوار ساحلی استان مازندران انجام شده است. مطالعه حاضر با هدف پر کردن این خلأ تحقیقاتی و ارائه درک عمیق‌تری از الگوهای آلودگی هوا و عوامل موثر بر آن در این منطقه انجام شده است. در جدیدترین مطالعات از مدل‌هایی به نام کلی گیرنده ذکر شده در مقدمه برای شناسایی منابع آلودگی هوا استفاده شده است (Hama et al., 2020; Jorquera & Villalobos, 2020; Prabhu et al., 2020; Temiz, 2024; Tsai et al., 2024; Jandacka, 2024). مطالعه Hama et al. (2020) که از نمودارهای قطبی دو متغیره و خوشه‌بندی k-means در منطقه دهلی هند، برای شناسایی منابع محلی PM_{2.5} و PM₁₀ استفاده کردند دریافتند که حمل‌ونقل جاده‌ای و گرمایش خانگی منابع اصلی آلودگی هستند. Jorquera & Villalobos, (2020) از خوشه‌بندی k-means برای شناسایی منابع اصلی آلودگی PM_{2.5} و PM₁₀ در سه منطقه شهری شیلی، با ویژگی‌های هواشناسی خاص و منابع متنوع آلودگی استفاده کردند. این مطالعه ترافیک وسایل نقلیه، سوزاندن چوب‌های مسکونی و گرد و غبار ناشی از باد محیط بیابان مجاور را به عنوان منابع اصلی این آلاینده‌ها نشان داد. Prabhu et al. (2020) تابع احتمال دو متغیره شرطی در هیمالیا برای شناسایی منابع محلی کربن سیاه استفاده کرد. این مطالعه نشان داد که فعالیت‌های سوزاندن زیست توده محلی برای گرم کردن و پخت و پز، منابع اصلی انتشار کربن سیاه هستند. همچنین مطالعه Yeganeh et al. (2021) از تحلیل نمودار قطبی برای تجسم جنبه‌های زمانی غلظت کربن سیاه در مقیاس مکانی بر اساس جهت باد استفاده کرد. Espinoza-Guillen et al., (2023) برای شناسایی منابع SO₂ در شهر لا اوریا^۱ پرو، از داده‌های غلظت ساعتی SO₂ و متغیرهای هواشناسی (سرعت و جهت باد) بهره گرفتند. نمودارهای سری زمانی، گلباد و گلغار، نمودارهای قطبی دو متغیره و غیره برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و شناسایی منابع انتشار استفاده نمودند. با بررسی تغییرات روزانه و ماهانه غلظت SO₂ نشان دادند که به ترتیب در ساعات صبح و در پایان سال (دسامبر) به اوج خود می‌رسد. همچنین گزارش کردند منابع اصلی انتشار SO₂ شناسایی شده، تردد وسایل نقلیه سبک و سنگینی است. Tudor, (2022) به بررسی ویژگی‌های مکانی-زمانی O₃، روندها، حمل‌ونقل و تاثیر اقدامات کنترل COVID-19 در بریتانیا پرداختند. برای تجزیه و تحلیل غلظت O₃ از مسیر خوشه‌ای، نمودارهای گلباد و گلغار آلودگی استفاده نمودند. گزارش کردند که اکثر آلاینده‌های SO₂، CO و NO₂ دارای روند کاهشی هستند، به جز O₃ که روند صعودی قابل توجهی در لندن و روند

صعودی ملایم‌تری در ادینبورگ نشان می‌دهد. (Safarrad & Yousefi, 2022) آلودگی هوای را براساس ویژگی‌های باد و بارش در تهران بررسی کردند. از داده‌های روزانه NO₂ ماهواره سنتینل و داده‌های روزانه باد و بارش بهره گرفتند. گزارش کردند که افزایش سرعت باد تا ۲/۵ m/s سبب کاهش میزان آلاینده NO₂ می‌شود، اما سرعت‌های باد بیشتر از آن لزوماً کاهش بیشتر NO₂ را در پی نخواهد داشت. (Mansurian & Nejadkoorki, 2023) به تحلیل حساسیت انتشار آلودگی هوای یک کارخانه فولاد نسبت به جهت باد غالب در شهرستان اردکان پرداختند. گزارش کردند که بادهای غالب در این منطقه در جهت شمال، شمال‌غربی و جنوب‌شرقی هستند و بیشترین مقادیر آلودگی هم جهت با باد غالب منطقه هستند. (Khebri et al. 2024) به بررسی کیفیت هوا و منابع آلودگی صنعتی در شهر بندرعباس پرداختند. گزارش کردند غلظت O₃ و SO₂ در شب با جهت باد ارتباط معنی‌دار داشته است.

با توجه به موارد فوق، این نمودارها بسیار مفید هستند. زیرا امکان مشاهده رفتار آلاینده‌ها را بر اساس جهت و سرعت باد فراهم می‌کنند (Ali-Taleshi et al., 2021; Nguyen et al., 2022). به طور مشابه، مقایسه داده‌های سری زمانی آلاینده ضروری است زیرا اطلاعات مربوط به مشارکت منابع محلی و شرایط هواشناسی را نشان می‌دهد (Eunhwa-Woogon et al., 2016). بنابراین، با توجه به مشکلاتی که نوار ساحلی استان مازندران در مورد آلاینده‌ها با آن مواجهه بوده است و عدم وجود تحقیقات تا به امروز که منابع آلاینده‌ها را در شهرهایی با توپوگرافی پیچیده و شرایط جوی متغیر در ایران شناسایی کرده باشد. همچنین توسعه برنامه‌های مدیریت کیفیت هوا ضروری است. به همین دلیل، مطالعه حاضر با هدف محوری تحلیل الگوی قطبی آلودگی هوا بر اساس عوامل هواشناختی در نوار ساحلی استان مازندران در طول دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ صورت می‌گیرد. برخی از اهداف جزئی و اختصاصی نیز همانند شناسایی و تحلیل الگوی دوقطبی آلودگی‌ها، بررسی دو عامل مهم هواشناسی بر نحوه انتشار، شناخت منابع آلاینده محلی و توسعه مدل و ارایه راهکارهای مدیریتی - بصری به منظور تحلیل و بهبود کیفیت هوا مورد توجه بوده است. این تحقیق می‌تواند ابزار مفیدی در مدیریت کیفیت هوا باشد زیرا اطلاعات ارزشمندی را می‌تواند برای تدوین راهبردهایی به نفع بهبود کیفیت هوای محلی ارایه دهد.

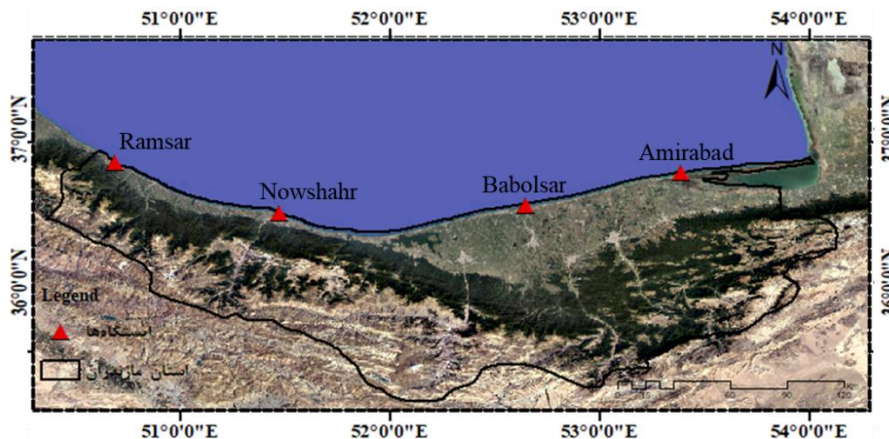
۳. روش‌شناسی پژوهش

۳-۱. محدوده مطالعه

استان مازندران در در محدوده جغرافیایی ۴۷° ۳۵' تا ۳۵° ۳۵' عرض شمالی و ۳۴° ۵۰' تا ۵۴° ۱۰' طول شرقی قرار گرفته است. این منطقه در شمال کشور ایران و در ساحل دریای خزر واقع شده است. بیشترین ارتفاع این محدوده ۵۶۷۰ m و کمینه ارتفاع آن ۲۱ m- از سطح دریاهای آزاد است. آب و 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 ۱۷ °C در طول سال است. در بین مناطق مختلفی که تحت تاثیر سوء آلودگی هوا قرار گرفته‌اند، استان مازندران نیز از این امر مستثنا نبوده و صنایع بیشتر، رشد روزافزون ترافیک شهری و برون شهری، مازوت‌سوزی و گازوئیل‌سوزی نیروگاه شهید سلیمی نکا در شرق این استان، آتش‌سوزی جنگل، فعالیت‌های کشاورزی، 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 آنجا که هدف مطالعه حاضر بررسی الگوی قطبی آلودگی هوا بر اساس عوامل هواشناختی در نوار ساحلی استان مازندران است، می‌بایست ایستگاه‌های آلودگی هوا که در آن‌ها داده‌های آلودگی هوا اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند مورد بررسی قرار گیرند. اما در نوار ساحلی استان مازندران ایستگاه آلودگی سنجش وجود ندارد. بنابراین از داده‌های ماهواره‌ای که به صورت رایگان در دسترس هستند استفاده شد. موقعیت جغرافیایی استان مازندران، و پراکندگی ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است.

۳-۲. داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده شامل شش متغیر است که از این میان دو متغیر تحت عنوان سرعت باد (m/s)، جهت باد به‌عنوان متغیرهای موثر، و چهار متغیر تحت عنوان SO₂، NO₂، CO و O₃ به‌عنوان متغیر هدف در نظر گرفته شدند. متغیرهای نام برده در مقیاس روزانه و طی دوره ۲۰۲۲-۲۰۱۸ از سازمان هواشناسی کشور (www/https://irimo.ir) و سنجنده TROPOMI دریافت شدند.



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های همیدی منطقه مورد مطالعه (منبع: نگارنده)

جدول ۱. اطلاعات داده‌های سنجنده TROPOMI (Veefkind et al. 2012)

توان تفکیک مکانی	بیشترین	کمترین	واحد	نام داده
0.01 arc degrees	۰/۳۰۴۸	۰/۰۲۵	mol/m ²	O ₃ _column_number_density
0.01 arc degrees	۰/۲۴	-۴۸	mol/m ²	SO ₂ _column_number_density
0.01 arc degrees	۰/۰۱۹۲۰۴۴	-۰/۰۰۰۵۳۷	mol/m ²	tropospheric_NO ₂ _column_number_density
0.01 arc degrees	۵/۷۱	-۳۴/۴۳	mol/m ²	CO_column_number_density

۳-۳. داده‌های ماهواره Sentinel-5p

ماهواره Sentinel-5p توسط سازمان فضایی اروپا به دنبال برنامه خود که نظارت بر محیط‌زیست و آنالیز آلاینده‌های هوا در کل کره زمین را دنبال می‌کند، در ۱۳ اکتبر سال ۲۰۱۷ میلادی به فضا پرتاب شده است. از ماموریت‌های این ماهواره می‌توان به پایش آلاینده‌هایی مانند CO، NO₂، SO₂، O₃ و AI اشاره کرد. سنجنده‌ای که برای پایش آلاینده‌های هوا در این ماهواره استفاده می‌شود سنجنده TROPOMI^۱ است. این سنجنده 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) (۲۷۰nm تا ۴۹۵) و مادون قرمز نزدیک (Near-infrared یا NIR) (۶۷۵ تا ۷۷۵) و مادون قرمز کوتاه (Short-wavelength-infrared یا SWIR) (۲۳۰۵ تا ۲۳۸۵) در ارتفاع ۸۲۴ کیلومتری از سطح تصویربرداری می‌کند.

از طریق ناحیه اول می‌توان O₃، SO₂، NO₂ و HCHO (فرمالدئید) را برآورد نمود. از مزایای سنجنده 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 سنجنده‌های مشابه OMI و SCIAMACHY با فناوری‌های پیشرفته‌تر برای کسب و ضبط اطلاعات استفاده کند. سنجنده TROPOMI از لحاظ توان تفکیک طیفی، مکانی و زمانی نسبت به سنجنده‌های قبلی عملکرد بهتری دارد (Veefkind et al. 2012). بنابراین در مطالعه حاضر، از سنجنده TROPOMI جهت پایش آلودگی استفاده می‌شود. در این پژوهش از پروداکت داده سنجنده TROPOMI ماهواره Sentinel-5P به‌صورت روزانه با توان تفکیک مکانی 1000×1000 متر طی دوره ۲۰۲۲-۲۰۱۸ استفاده شد. مشخصات داده‌های مورد استفاده در جدول (۱) آماده است. بدین‌منظور با استفاده از کدنویسی به زبان جاوا اسکریپت^۳ در محیط گوگل ارث انجین (GEE)^۱ داده‌های روزانه آلودگی هوا برای منطقه مورد مطالعه استخراج شد.

1. TROPOspheric Monitoring Instrument
 2. Troposphere
 3. JavaScript

۳-۴. سری زمانی

تغییرات زمانی یک آلاینده اجازه می‌دهد تا زمانی که حداقل یا حداکثر غلظت رخ می‌دهد شناسایی شود. به همین ترتیب، الگوی رفتاری را نشان می‌دهد که به شناسایی روزها یا ماههایی که غلظت‌ها تمایل به افزایش یا کاهش دارند و منابع احتمالی آلودگی را استنباط می‌کند، کمک کند (Althuwaynee et al., 2020). به منظور مطالعه تغییرات زمانی، نمودارهای دو مقیاس زمانی (روزانه و سالانه) ساخته شد. برای بررسی تغییرات آلاینده‌ها نمودار سری زمانی با میانگین روزانه با استفاده از توابع timePlot و timeVariation به ترتیب از بسته openair نرم‌افزار R نسخه ۴,۰,۳ ترسیم شد.

۳-۵. نمودارهای گلباد و گل‌بار

ترسیم گلباد علاوه بر این که درصد فراوانی بادهای با سرعت بیشتر از یک نات را در جهات مختلف جغرافیایی مشخص می‌کند، جهت وزش بادهای غالب منطقه را نیز نشان می‌دهد و با استفاده از آن یک دید کلی از وضعیت وزش باد در منطقه مورد مطالعه را به ما نشان می‌دهد. بنابراین گلباد توزیع فراوانی جهت و سرعت باد را در فواصل مختلف و همچنین غالب و حداکثر مقدار آن را به ترتیب در یک بازه زمانی نشان می‌دهد (Agustine et al., 2017). برعکس، گل‌بار همان منطبق را اعمال می‌کند اما سرعت باد را با مجموعه دیگری از داده‌ها، به عنوان مثال غلظت یک آلاینده، جایگزین می‌کند (Carslaw, 2021). برای تشریح گلباد و گل‌بار از داده‌های روزانه جهت باد، سرعت باد و غلظت روزانه SO₂، NO₂، CO و O₃ استفاده شد. توابع windRose و pollutionRose بسته openair نرم‌افزار R نسخه ۴,۰,۳ به ترتیب برای به دست آوردن نمودارهای ذکر شده در بالا استفاده شد.

۳-۶. نمودارهای تحلیل قطبی

نمودارهای تحلیلی قطبی دو متغیره ابزارهای مفیدی برای شناسایی منابع انتشار بالقوه یک آلاینده جوی، از طریق تجزیه و تحلیل کیفی-بصری هستند (Carslaw & Ropkins, 2012; Rojano et al., 2018). این نمودارها در مختصات قطبی ارائه شده‌اند، که تغییر غلظت آلاینده را همراه با سرعت و جهت باد نشان می‌دهد و امکان شناسایی منابع انتشار احتمالی و جهت پراکندگی آنها و همچنین وابستگی غلظت آلاینده به سرعت باد را فراهم می‌کند (Khan et al., 2016). برای شناسایی منابع احتمالی انتشار SO₂، NO₂، CO و O₃ در نوار ساحلی مازندران نمودارهای قطبی دو متغیره با استفاده از داده‌های روزانه جهت باد، سرعت باد، و غلظت روزانه آلاینده‌ها توسعه یافتند. نمودارهای قطبی دو متغیره با استفاده از تابع polarPlot بسته openair در نرم‌افزاری R به دست آمد (Carslaw, 2021). برای تسهیل در تفسیر نمودار، این تابع از مدل افزودنی تعمیم یافته (GAM)^۲ برای هموارسازی استفاده می‌کند که با استفاده از بسته mgcv انجام می‌شود (Carslaw, 2021).

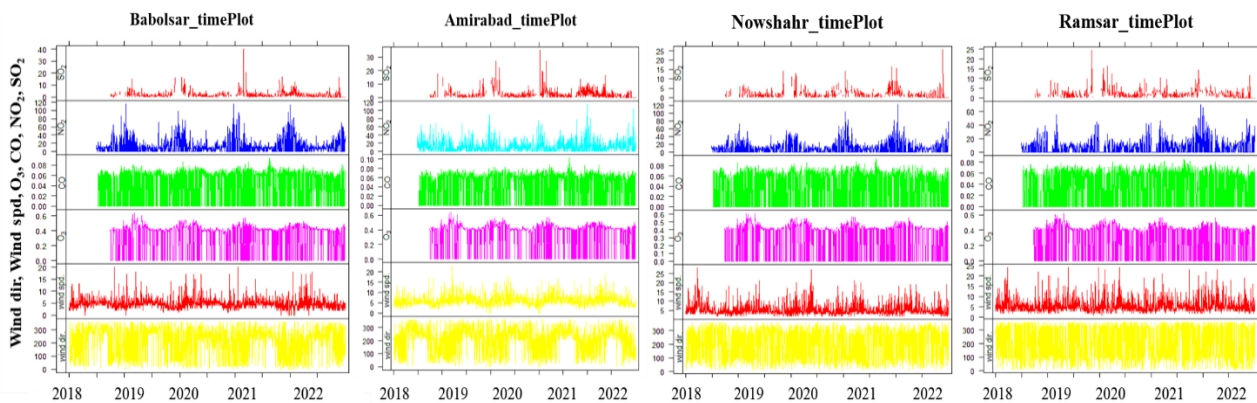
همچنین از تابع PolarAnnulus برای تجسم روند تغییرات روزانه طی دوره مورد مطالعه استفاده شد. تابع PolarAnnulus راهی برای در نظر گرفتن جنبه‌های زمانی غلظت آلاینده بر اساس جهت باد فراهم می‌کند. این نمودارها ظرفیت نمایش اطلاعات خیلی مهمی در مورد منابع ارائه می‌دهند: به خصوص اگر بیش از یک آلاینده در دسترس باشد.

۴. یافته‌های پژوهش

با استفاده از محیط GEE، توزیع زمانی پارامترهای آلودگی هوا (SO₂، CO، NO₂ و O₃) 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 (ایستگاه‌های امیرآباد، رامسر، بابلسر و نوشهر نوار ساحلی استان مازندران) تعریف شد. پس از آن، تصاویر دارای ابر با تعریف فیلترهای ابری فیلتر و با تعریف فیلترهای میانگین روزانه، سری زمانی هر یک از آلاینده‌ها با توجه به ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه استخراج شد.

1. Google Earth Engine
2. Generalized Additive Model

نتایج سری زمانی CO ، O_3 ، SO_2 و NO_2 برحسب ppb ، سرعت باد بر حسب m/s و جهت باد در ایستگاه‌های نوار ساحلی استان مازندران به صورت روزانه در شکل (۲) ارایه شده است. این نمودار، تغییرات زمانی چندین پارامتر محیطی را در بازه زمانی روزانه ۲۰۲۲-۲۰۱۸ نشان می‌دهد. در ایستگاه امیرآباد بیشترین مقدار SO_2 برابر $۳۵/۱۰$ ، NO_2 برابر $۱۱۵/۷۲$ ، CO برابر $۰/۱۰$ و O_3 برابر $۰/۶۵$ ppb است. ایستگاه بابلسر بیشترین مقدار SO_2 برابر $۳۹/۹۴$ ، NO_2 برابر $۱۱۶/۴۴$ ، CO برابر $۰/۰۹$ و O_3 برابر $۰/۶۴$ ppb است. ایستگاه رامسر بیشترین مقدار SO_2 برابر $۲۴/۴۸$ ، NO_2 برابر $۷۰/۴۲$ ، CO برابر $۰/۰۸$ و O_3 برابر $۰/۶۲$ است. ایستگاه نوشهر بیشترین مقدار SO_2 برابر $۲۵/۵۵$ ، NO_2 برابر $۱۰۴/۱۰$ ، CO برابر $۰/۰۹$ و O_3 برابر $۰/۶۱$ است (شکل ۲).



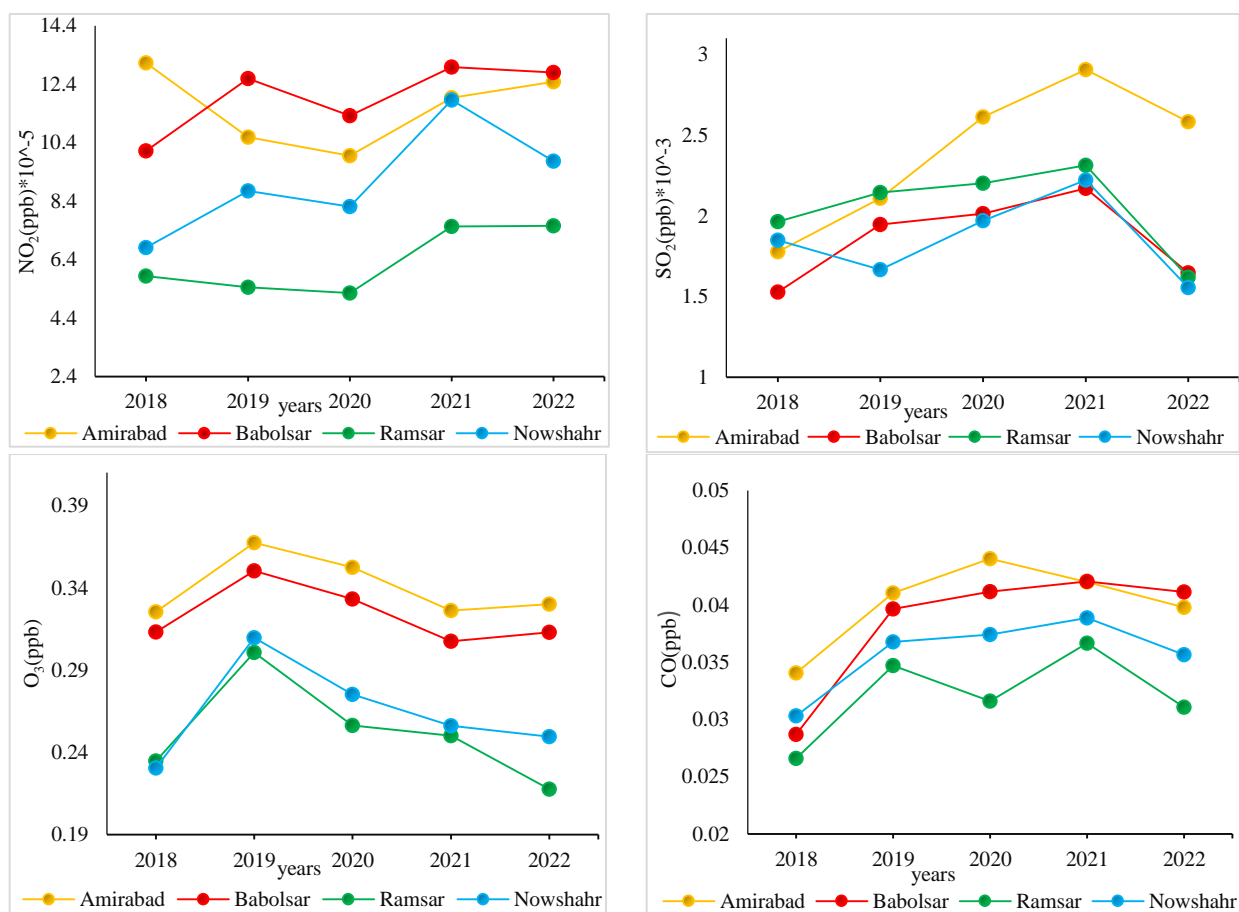
شکل ۲. سری زمانی روزانه برای چندین متغیر ایستگاه‌های امیرآباد، بابلسر، نوشهر و رامسر (منبع: یافته‌های تحقیق)

از لحاظ سالانه آلاینده‌ها بر حسب ppb ، ایستگاه امیرآباد بیشترین مقدار SO_2 برابر $۲/۹۱$ سال ۲۰۲۱ ، NO_2 برابر $۱۳/۱۳$ سال ۲۰۱۸ ، CO برابر $۰/۰۴$ سال ۲۰۲۰ ، O_3 برابر $۰/۳۷$ سال ۲۰۱۹ است. ایستگاه بابلسر بیشترین مقدار SO_2 برابر $۲/۱۷$ سال ۲۰۲۱ ، NO_2 برابر $۱۳/۲۷$ سال ۲۰۲۱ ، CO برابر $۰/۰۴$ سال ۲۰۲۱ ، O_3 برابر $۰/۳۵$ سال ۲۰۱۹ است. ایستگاه نوشهر بیشترین مقدار SO_2 برابر $۲/۲۲$ سال ۲۰۲۱ ، NO_2 برابر $۱۲/۱۲$ سال ۲۰۲۱ ، CO برابر $۰/۰۴$ سال ۲۰۲۱ ، O_3 برابر $۰/۳۱$ سال ۲۰۱۹ است. ایستگاه رامسر بیشترین مقدار SO_2 برابر $۲/۳۱$ سال ۲۰۲۱ ، NO_2 برابر $۷/۵۶ - ۷/۵۵$ سال $۲۰۲۲ - ۲۰۲۱$ ، CO برابر $۰/۰۴$ سال ۲۰۲۱ ، O_3 برابر $۰/۳۰$ سال ۲۰۱۹ است. به طور کلی در همه ایستگاه‌ها بیشترین مقدار SO_2 مربوط به سال ۲۰۲۱ است. به جز ایستگاه امیرآباد بیشترین غلظت CO و NO_2 مربوط به سال ۲۰۲۱ است. بیشترین مقدار O_3 هم مربوط به سال ۲۰۱۹ است (شکل ۳).

در شکل (۴) سرعت باد به فواصل نشان داده شده توسط مقیاس در هر پنجره تقسیم می‌شود. دایره‌های خاکستری درصد فراوانی جهت باد (FCWD)^۲ را نشان می‌دهند. تجزیه و تحلیل داده‌های سرعت و جهت باد به وسیله گلباد نشان داد ایستگاه امیرآباد باد غالب در جهت جنوب غربی بیشترین فراوانی (حدود ۲۰ درصد) را دارد، در این ایستگاه میانگین سرعت باد برابر $۶/۰۳$ m/s و درصد باد آرام $۰/۳$ درصد است. ایستگاه بابلسر باد غالب در جهت غرب بیشترین فراوانی (حدود ۲۰ درصد) را دارد، همچنین میانگین سرعت باد برابر m/s $۴/۸۳$ و درصد باد آرام $۰/۵$ درصد است. ایستگاه نوشهر باد غالب در جهت شمال غربی به سمت غرب بیشترین فراوانی (حدود $۱۵ - ۱۶$ درصد) را دارد. همچنین میانگین سرعت باد برابر $۵/۲۸$ m/s و درصد باد آرام صفر درصد است. ایستگاه رامسر باد غالب در جهت شمال غربی بیشترین فراوانی (حدود ۲۴ درصد) را دارد، همچنین میانگین سرعت باد برابر $۵/۵۰$ m/s و درصد باد آرام صفر درصد است (شکل ۴).

1. Parts Per Billion (ppb)
2. Frequency of counts by wind direction

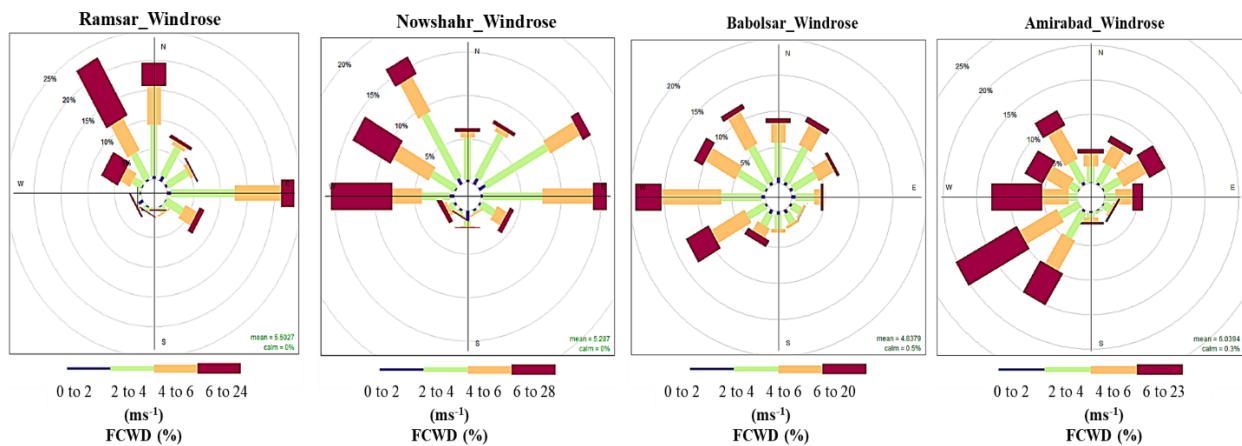
در شکل (۵) غلظت هر یک از آلاینده‌ها به فواصل نشان داده شده توسط مقیاس در هر پنجره تقسیم می‌شود. دایره‌های خاکستری درصد فراوانی جهت باد را نشان می‌دهند. بیشترین غلظت آلاینده‌ها بر حسب ppm ایستگاه امیرآباد به ترتیب، SO_2 در جهت جنوب و جنوب‌غربی با فراوانی حدود ۱۰ درصد و میانگین NO_2 ، $2/43$ در جهت جنوب‌غربی با فراوانی جهت باد حدود ۱۰ درصد و میانگین CO ، $11/58$ در جهت جنوب‌غربی با جهت باد حدود ۱۱ درصد و میانگین O_3 و $0/04$ در جهت جنوب‌غربی با فراوانی حدود ۱۰ درصد و میانگین $0/34$ رخ داده است. ایستگاه بابلسر، SO_2 در جهت غرب با فراوانی حدود ۱۱ درصد و میانگین $1/92$ ، غلظت NO_2 در جهت غرب با فراوانی حدود ۱۰ درصد و میانگین $12/43$ ، غلظت CO در جهت غرب با فراوانی حدود ۱۰ درصد و میانگین $0/33$ ، و غلظت O_3 در جهت غرب با فراوانی حدود ۱۲ درصد و میانگین $0/32$ است. ایستگاه نوشهر غلظت SO_2 در جهت شمال شرقی با فراوانی حدود ۹ درصد و میانگین $1/85$ ، غلظت NO_2 در جهت شمال شرقی با فراوانی حدود ۹ درصد و میانگین $9/48$ ، غلظت CO در جهت شمال شرقی و غربی با فراوانی حدود ۹ درصد و میانگین $0/36$ و غلظت O_3 در جهت شمال شرقی با فراوانی حدود ۱۱ درصد و میانگین $0/26$ است. ایستگاه رامسر غلظت SO_2 در جهت شرق با فراوانی حدود ۱۴ درصد و میانگین $2/06$ ، غلظت NO_2 در جهت شرق با فراوانی حدود ۱۴ درصد و میانگین $6/40$ ، غلظت CO در جهت شرق با فراوانی حدود ۱۴ درصد و میانگین $0/32$ ، غلظت O_3 در جهت شرق با جهت با فراوانی حدود ۱۶ درصد و میانگین $0/25$ است.



شکل ۳. سری زمانی سالانه آلاینده‌های SO_2 ، NO_2 و CO بر حسب ppm برای ایستگاه‌های امیرآباد، بابلسر، نوشهر و رامسر (منبع: یافته‌های تحقیق)

طبق نمودار گلباد و گلغبار سرعت باد و غلظت آلاینده‌ها در ایستگاه امیرآباد در جهت جنوب‌غربی، بابلسر در جهت غرب است ولی بر خلاف این ایستگاه‌ها دو ایستگاه رامسر و نوشهر جهت سرعت باد با جهت غلظت آلاینده‌ها متفاوت است (شکل‌های ۴ و ۵). بنابراین

سرعت باد می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر آلودگی هوا داشته باشد. به طوری که طیف وسیعی از عوامل، از جمله مکان، فصل، و نوع آلاینده‌ها، می‌توانند بر رابطه بین سرعت باد و آلودگی هوا تاثیر بگذارند (Xiong, 2023). همچنین تاثیر باد بر آلودگی هوا با شکل شهری پیچیده‌تر می‌شود، به طوری که مناطق شهری با تراکم بالا، مناطق آرام باد را ایجاد می‌کنند که می‌توانند آلاینده‌های هوا را حفظ یا متمرکز کنند (Yang et al., 2020). برای درک بهتر سرعت باد و غلظت آلاینده‌ها سعی شد ارتباط آنها به صورت فصلی بررسی شود (شکل‌های ۶ و ۷).

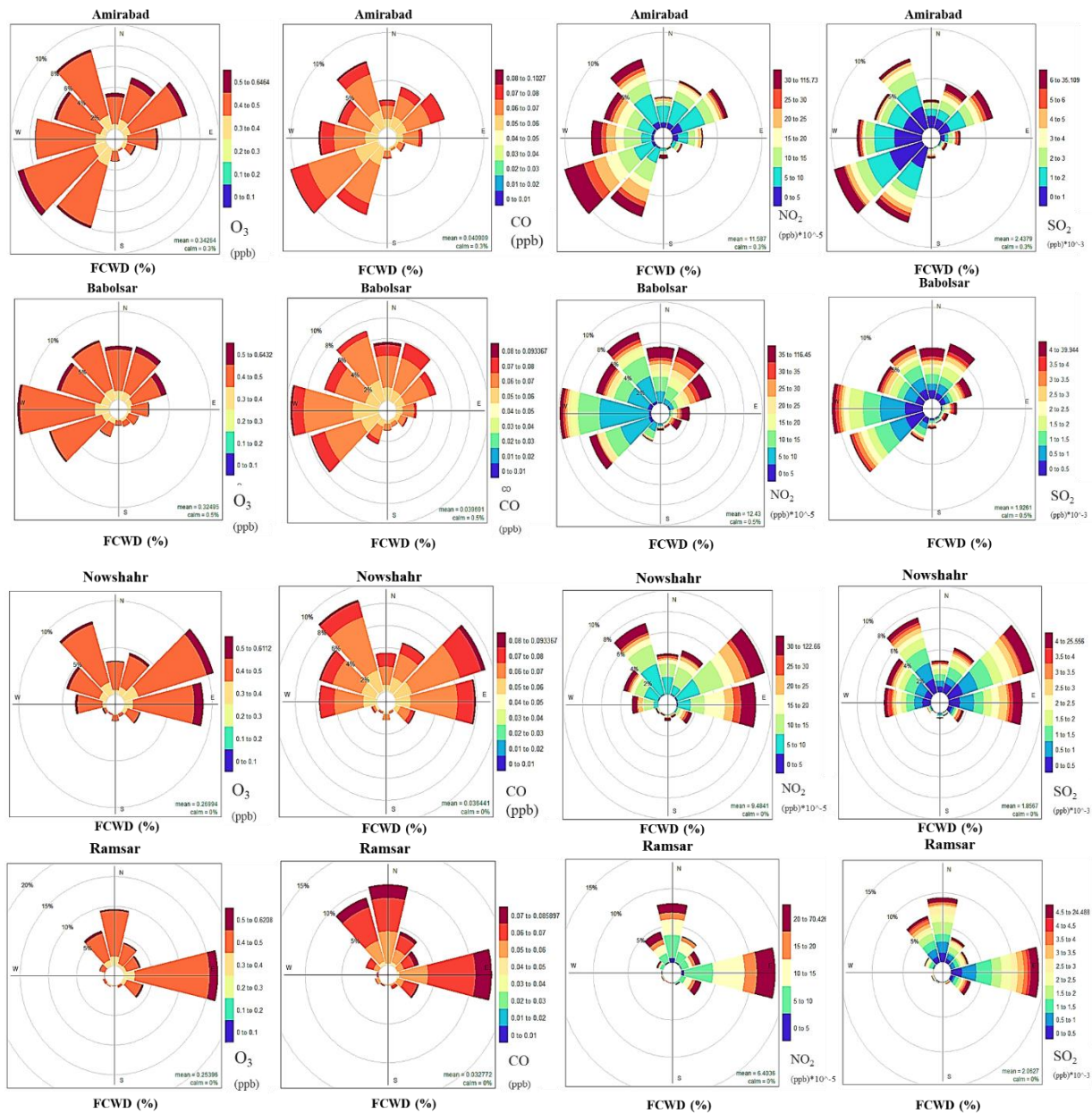


شکل ۴. گلباد ایستگاه‌های امیرآباد، نوشهر، رامسر و بابلسر برای دوره ۲۰۲۲-۲۰۱۸ (منبع: یافته‌های تحقیق)

گلباد شکل (۶) تفاوت‌های فصلی را در سرعت و جهت باد نشان می‌دهد. همچنین میانگین فصلی سرعت باد و درصد بادهای آرام را نشان می‌دهد. در ایستگاه امیرآباد جهت باد در فصل بهار عمدتاً از جنوب‌غرب و بخش‌های غرب و به‌طور مشابه در تابستان است. در حالی که در طول پاییز، از جنوب‌غربی است، اما در طول زمستان به نظر می‌رسد جهت باد ترجیحی وجود ندارد. میانگین سرعت باد در طول بهار ۶/۶۷ و پس از آن تابستان ۶/۶۱ سپس زمستان ۵/۴۹ و حداقل در پاییز ۵/۳۵ متر بر ثانیه بود. ایستگاه بابلسر جهت باد در فصل بهار عمدتاً از غرب و بخش‌های جنوب‌غربی و به‌طور مشابه در تابستان است. در حالی که در طول پاییز و زمستان به نظر می‌رسد جهت باد ترجیحی وجود ندارد. میانگین سرعت باد در طول بهار ۵/۴۵ و پس از آن تابستان ۵/۲۴، سپس زمستان ۴/۴۳ و حداقل در پاییز ۴/۲۰ متر بر ثانیه بود. ایستگاه رامسر جهت باد در فصل بهار، پاییز و زمستان عمدتاً از شمال‌غرب و بخش‌های شرق است اما در تابستان شمال‌غرب و شمال است. میانگین سرعت باد در طول بهار ۶/۲۳ و پس از آن تابستان ۵/۴۵، سپس زمستان ۵/۴۲ و حداقل در پاییز ۴/۸۹ متر بر ثانیه بود. ایستگاه نوشهر جهت باد در فصل بهار و زمستان عمدتاً از غرب و بخش‌های شرق، و تابستان در جهت شمال غربی است. در حالی که در طول پاییز به نظر می‌رسد جهت باد ترجیحی وجود ندارد. میانگین سرعت باد در طول بهار ۶/۵۷ و پس از آن تابستان ۴/۷۵، سپس زمستان ۵/۱۲ و حداقل در پاییز ۴/۶۸ متر بر ثانیه بود.

نمودارهای قطبی دو متغیره غلظت آلاینده‌ها، سرعت باد و جهت باد بر اساس فصل برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۱۸ در ایستگاه‌های امیرآباد، نوشهر، رامسر و بابلسر در شکل (۷) نشان داده شده است. مقیاس رنگ در شکل، غلظت آلاینده‌های SO_2 ، NO_2 ، CO و O_3 را در ppb نشان می‌دهد، و مقیاس شعاعی نشان‌دهنده سرعت باد بر حسب m/s است که به صورت شعاعی از مرکز نمودار افزایش می‌یابد. در ایستگاه امیرآباد غلظت‌های بالای CO فصل تابستان عمدتاً در جهت‌های شمال‌غرب، غرب و جنوب‌غربی، فصل زمستان در جهت شمال شرقی مشاهده می‌شود در حالی که فصل بهار غلظت متوسط CO در جهت شمال مشاهده شد. غلظت SO_2 در طول زمستان همه جهات به خصوص نیمکره شمالی غلظت بسیار بالا است. غلظت بالای O_3 فصل بهار در جهت شمال‌شرقی و فصل تابستان در جهت

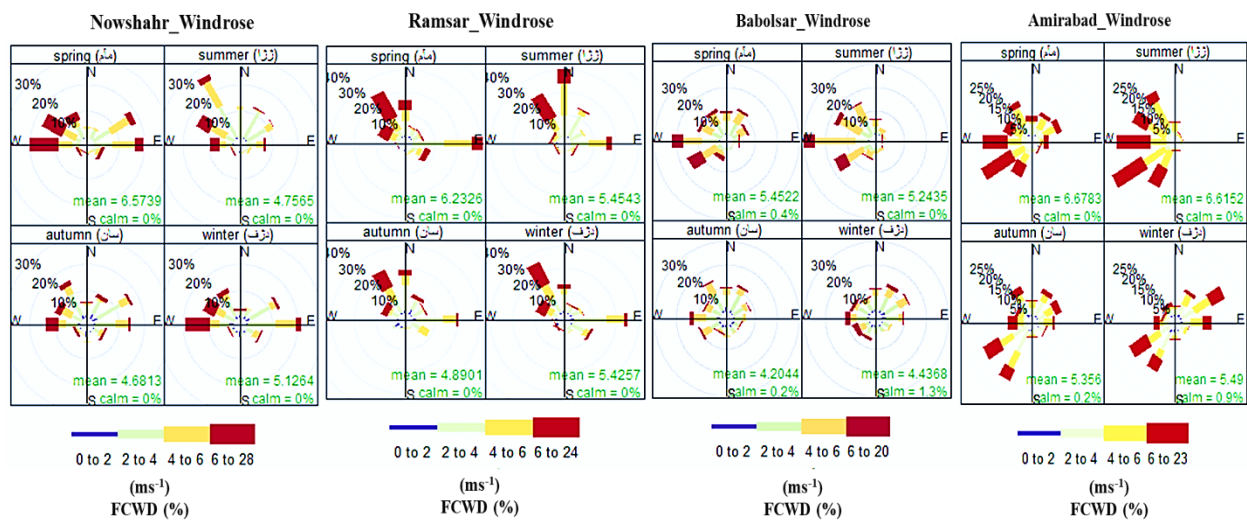
شمال‌غربی و شرقی و غرب مشاهده می‌شود اما مقدار متوسط غلظت O_3 فصل پاییز و زمستان در جهت شمال شرقی است. غلظت بالای NO_2 فصل تابستان در جهت شمال‌غربی مشاهده می‌شود.



شکل ۵. گلبرگ ایستگاه‌های امیرآباد، نوشهر، رامسر و بابلسر بر حسب ppb برای دوره ۲۰۲۲-۲۰۱۸ (منبع: یافته‌های تحقیق)

ایستگاه بابلسر غلظت بالای CO فصل تابستان در غرب، شمال‌غرب، شمال و جنوب‌غربی و فصل بهار در جهت جنوب‌غربی مشاهده شده است. غلظت بالای SO_2 فصل زمستان در جهت شمال شرقی، شمال و شمال‌غربی مشاهده می‌شود اما در فصل تابستان در هیچ جهتی غلظت SO_2 مشاهده نشد. غلظت بالای O_3 فصل تابستان و بهار عمدتاً در جهت شمال، شمال‌غربی، غرب و جنوب‌غربی مشاهده می‌شود. مقدار متوسط آن در فصل زمستان و پاییز در جهت شمال است. غلظت بالای NO_2 فصل زمستان در جهت شمال مشاهده شد. ایستگاه نوشهر غلظت بالای CO فصل تابستان در جهت شمال شرقی مشاهده می‌شود. اما SO_2 در همه فصل‌ها در هیچ جهتی مشاهده

نشد. غلظت بالای O_3 فصل زمستان در جهت شمال، شمال غربی و شرقی مشاهده شد و در فصل زمستان در جهت جنوب شرقی مشاهده شد. غلظت بالای NO_2 در فصل تابستان در جهت شمال غربی و در فصل بهار در جهت جنوب مشاهده شد. ایستگاه رامسر غلظت بالای CO فصل تابستان در جهت شمال شرقی و شرق مشاهده شد. در حالی که SO_2 همه فصلها در هیچ جهتی مشاهده نشد. غلظت بالای O_3 در فصل تابستان در جهت شمال و شمال غربی و در فصل بهار در جهت شمال مشاهده شد. غلظت بالای NO_2 در فصل بهار در جهت شمال مشاهده شد. بیشترین مقدار غلظت هر یک از آلایندهها در سرعت باد پایین اتفاق افتاده است. سرعت کمتر باد ثبت شده در فصل زمستان علاوه بر حضور وارونگیهای حرارتی، باعث راکد شدن تودههای هوا و در نتیجه افزایش غلظت SO_2 در ایستگاههای امیرآباد و بابلسر می شود. در سرعت باد کمتر، میانگین غلظت آلایندهها بالاتر است، در حالی که در سرعت باد بالاتر غلظت متوسط کمتری وجود دارد (شکل های ۶ و ۷).

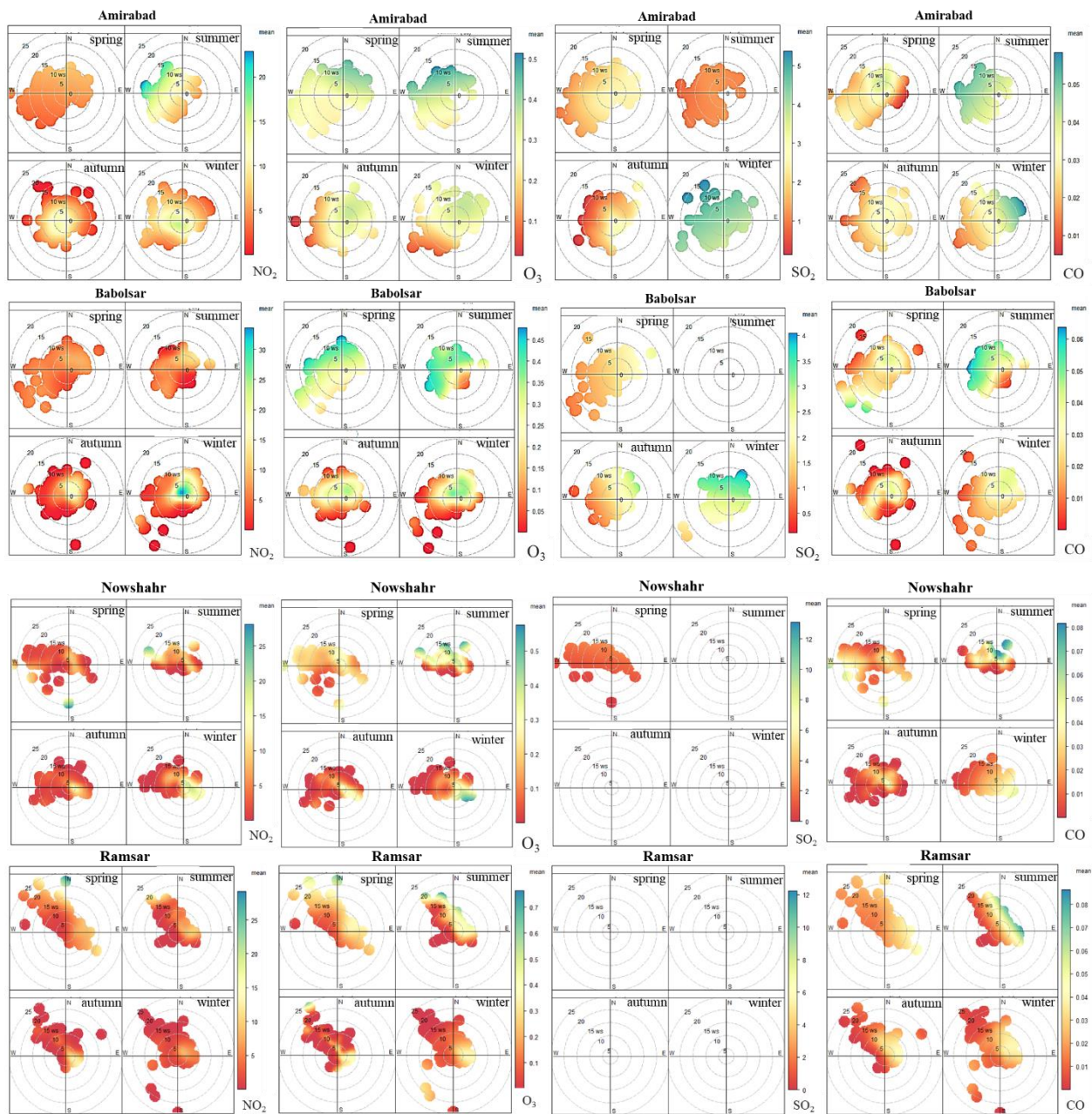


شکل ۶. گلباد فصلی سرعت باد ایستگاههای امیرآباد، نوشهر، رامسر و بابلسر برای دوره ۲۰۲۲-۲۰۱۸ (منبع: یافته‌های تحقیق)

از آنجا که این نمودار برای شناسای منابع آلودگی هوا است. منابع آلودگی هوا در ایستگاه امیرآباد نیروگاه شهید سلیمی نکا در غرب، میانکاله در شرق و جاده ساحلی از شمال (تردد وسیله نقلیه و ترافیک) است. همچنین آلاینده NO_2 در فصل تابستان که در جهت شمال غربی است نشان از آلودگی شدید بر روی منطقه نیروگاه نکا دارد، که به دلیل نیاز تولید برق در فصل تابستان و فعال بودن همه واحدهای نیروگاه است (Yousefi-Kabria & Nadi, 2022). ایستگاه بابلسر جاده ساحلی از شمال (تردد وسیله نقلیه و ترافیک) و در فصل زمستان دستگاههای گرمایشی که سوختهای فسیلی را می سوزانند، منابع آلودگی CO ، SO_2 و O_3 که جهت باد غالب شمال، شمال غربی و شرقی است. سوزاندن بقایای گیاهی در فصل بهار و پاییز که با توجه به شکل (۷) احتمالاً منبع آلودگی CO و O_3 است. در نهایت، نمودارها همچنین نشان دادند که در بقیه جهت‌های باد، غلظت آلایندهها حداقل است، که می تواند نشان دهد منبع آلودگی قابل توجهی در آن جهت‌ها وجود ندارد.

از لحاظ فصلی در جدول شماره ۲ بیشترین مقدار آلایندههای SO_2 ، CO و O_3 مربوط به ایستگاه امیرآباد است. به طوری که بیشترین مقدار غلظت SO_2 مربوط به فصل زمستان و کمترین مقدار آن مربوط به فصل تابستان ایستگاه امیرآباد است (جدول ۲). با توجه به نتایج شکل ۷ منبع آلودگی نیروگاه شهید سلیمی نکا است که در غرب این ایستگاه قرار دارد در ماههای سرد سال مازوت سوزی و گازوئیل سوزی صورت می گیرد در نتیجه باعث بالا رفتن غلظت SO_2 در فصل سرد می شود. بیشترین مقدار NO_2 مربوط به زمستان و پاییز ایستگاه بابلسر است. کمترین غلظت هر یک از آلایندهها به صورت فصلی مربوط به ایستگاه رامسر است که در غرب استان مازندران قرار دارد به طوری که هر چه از سمت شرق به غرب می رود میزان آلایندهها کاهش می یابد.

بررسی کمینه و بیشینه فصلی غلظت آلاینده‌های CO ، O_3 ، SO_2 و NO_2 در ایستگاه‌های امیرآباد، بابلسر، رامسر و نوشهر نشان می‌دهد که در مجموع، غلظت CO و O_3 در فصل تابستان و بهار به بیشترین مقدار خود می‌رسد، در حالی که غلظت SO_2 و NO_2 در فصول پاییز و زمستان به اوج خود می‌رسد. این الگوی فصلی می‌تواند به دلیل تغییرات شرایط هواشناسی، سرعت و جهت باد و منابع انتشار آلاینده‌ها در طول سال باشد که بر روی پراکندگی و تجمع آلاینده‌ها در این مناطق تاثیرگذار است.



شکل ۷. نمودارهای قطبی دو متغیره از غلظت آلاینده‌ها، سرعت باد، و جهت باد به صورت فصلی ایستگاه‌های امیرآباد، نوشهر، رامسر و بابلسر برای دوره ۲۰۱۸-۲۰۲۲ (منبع: یافته‌های تحقیق)

در خصوص غلظت CO ، بیشترین مقادیر در ایستگاه امیرآباد و کمترین مقادیر در ایستگاه رامسر دیده می‌شود. غلظت O_3 نیز در ایستگاه امیرآباد بیشترین و در ایستگاه رامسر کمترین مقادیر را نشان می‌دهد. برای SO_2 ، بیشترین غلظت در ایستگاه امیرآباد و کمترین

در ایستگاه نوشهر مشاهده می‌شود. همچنین، غلظت NO_2 در ایستگاه بابلسر بیشترین و در ایستگاه رامسر کمترین مقادیر را دارد. این تفاوت‌ها در غلظت آلاینده‌ها بین ایستگاه‌های مختلف می‌تواند به دلیل تفاوت در منابع انتشار، شرایط هواشناسی و موقعیت جغرافیایی هر ایستگاه باشد. بنابراین تفاوت در منابع اصلی انتشار آلاینده‌ها (صنعتی، ترافیکی، سوزاندن زباله و...) در اطراف هر ایستگاه می‌تواند باعث تفاوت در غلظت آلاینده‌ها شود. پارامترهایی مانند دما، رطوبت، سرعت و جهت باد در هر منطقه می‌تواند بر روی تجمع و پراکندگی آلاینده‌ها تاثیر بگذارد. از طرفی موقعیت جغرافیایی و قرارگیری ایستگاه‌ها در مناطق ساحلی، کوهستانی یا شهری می‌تواند بر روی روند انتشار و تجمع آلاینده‌ها تاثیرگذار باشد. در نهایت شرایط محلی، وجود موانع طبیعی یا مصنوعی در محیط اطراف هر ایستگاه می‌تواند بر الگوی جریان باد و پراکندگی آلاینده‌ها تاثیر بگذارد. فعالیت‌های انسانی نیز تفاوت در میزان فعالیت‌های صنعتی، ترافیکی و سایر منابع انتشار در اطراف هر ایستگاه می‌تواند بر روی غلظت آلاینده‌ها تاثیر داشته باشد.

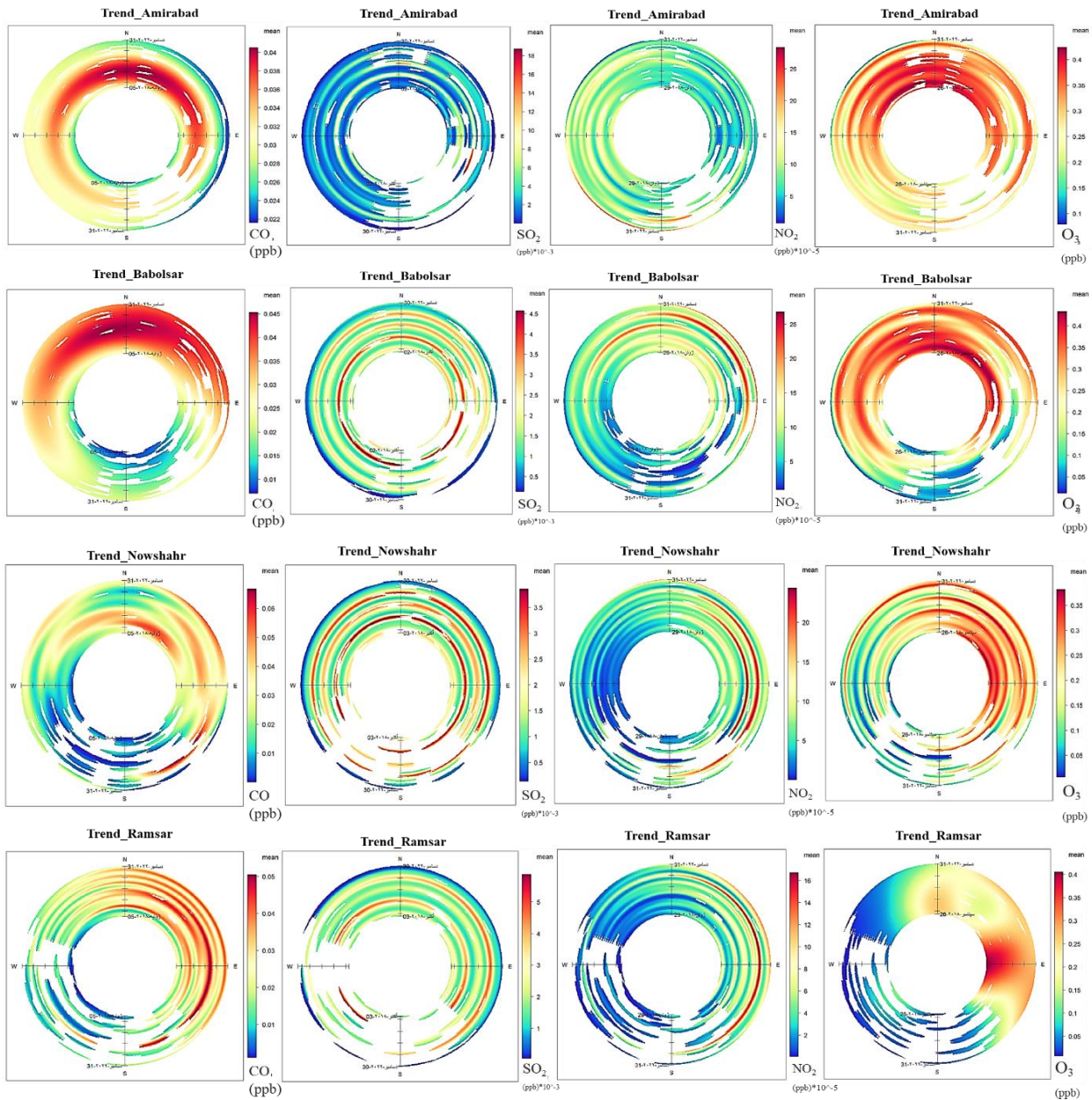
جدول ۲. غلظت آلاینده‌های CO ، O_3 ، SO_2 و NO_2 بر حسب ppb به صورت فصلی برای ایستگاه‌های مورد مطالعه (منبع: یافته‌های تحقیق)

ایستگاه	متغیر	زمستان	بهار	تابستان	پاییز
امیرآباد	CO	۰/۰۴۱	۰/۰۴۵	۰/۰۴۳	۰/۰۳۵
	O_3	۰/۳۵۰	۰/۳۷۳	۰/۳۴۰	۰/۳۱۲
	SO_2	۴/۷۰۴	۱/۸۱۰	۱/۲۸۷	۳/۰۸۳
	NO_2	۱۱/۳۷۷	۹/۳۱۲	۱۲/۱۶۴	۱۲/۵۰۹
بابلسر	CO	۰/۰۳۹	۰/۰۴۳	۰/۰۴۳	۰/۰۳۴
	O_3	۰/۳۲۶	۰/۳۶۶	۰/۳۲۴	۰/۲۸۸
	SO_2	۳/۵۴۰	۱/۲۸۷	۱/۱۷۹	۲/۱۳۴
	NO_2	۱۲/۰۸۴	۷/۶۷۶	۷/۵۳۵	۱۶/۹۲
رامسر	CO	۰/۰۲۸	۰/۰۳۶	۰/۰۳۸	۰/۰۲۹
	O_3	۰/۲۳۶	۰/۲۹۶	۰/۲۶۲	۰/۲۲
	SO_2	۳/۵۰۹	۱/۸۱۶	۱/۲۶۲	۲/۳۹۴
	NO_2	۴/۹۳۰	۵/۹۳۴	۵/۰۱۲	۹/۴۹۷
نوشهر	CO	۰/۰۳۵	۰/۰۴۰	۰/۰۴۰	۰/۰۳۱
	O_3	۰/۲۷۰	۰/۳۲۰	۰/۲۶۷	۰/۲۲۶
	SO_2	۳/۱۱۰	۱/۳۷۶	۱/۰۸۵	۲/۳۸۳
	NO_2	۱۲/۹۹۶	۶/۹۷۷	۵/۹۳۵	۱۲/۰۵۴

تجزیه و تحلیل‌ها برای نمودار روند آلاینده‌ها در شکل ۸ نشان می‌دهد که در ایستگاه امیرآباد و بابلسر، اوج غلظت O_3 و CO در جهت‌های شمال، شمال‌غربی و شرقی است. این الگوی پراکندگی می‌تواند نشان‌دهنده وجود منابع انتشار این آلاینده‌ها در این جهت‌ها باشد. در ایستگاه نوشهر و رامسر نیز اوج غلظت O_3 و CO در جهت‌های شمال‌شرقی و شرق است که این جهت‌ها می‌تواند بیانگر وجود منابع آلودگی هوا در این مناطق باشد.

در ایستگاه بابلسر، اوج غلظت NO_2 و SO_2 در جهت‌های شمال‌غربی و شرقی است. این الگوی پراکندگی نشان می‌دهد که منابع انتشار این دو آلاینده احتمالاً در این جهت‌ها قرار دارند. همچنین در ایستگاه نوشهر، اوج غلظت NO_2 در جهت شرق قرار دارد و اوج غلظت SO_2 در جهت‌های شمال، شمال‌غربی و شرقی است. این الگوی پراکندگی نیز می‌تواند بیانگر وجود منابع آلودگی هوا در این جهت‌ها باشد. در مجموع، نتایج حاصل از تحلیل جهت‌های اوج غلظت آلاینده‌ها در نقاط مختلف، می‌تواند به شناسایی و مکان‌یابی منابع

انتشار آلاینده‌ها کمک کند. این اطلاعات می‌توانند در برنامه‌ریزی و اجرای اقدامات کنترلی و مدیریتی آلودگی هوا مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۸. روند تغییرات روزانه غلظت O_3 ، NO_2 ، SO_2 و CO در ایستگاه‌های مورد مطالعه برای دوره ۲۰۲۲-۲۰۱۸ (منبع: یافته‌های تحقیق)

۵. بحث

مطالعاتی متعددی از جمله (Shrestha 2022; Jegathesan et al. 2022; Xiong, 2023; Yan, 2021) نشان دادند غلظت آلاینده‌ها تحت تاثیر سرعت و جهت باد است. نتایج تحقیق جاری نیز نشان داد بین آلودگی هوا، سرعت و جهت باد ارتباط وجود دارد که همسو با نتایج تحقیقات فوق‌الذکر است. در این میان Yan (2021) دریافت که سرعت باد بالاتر با پراکندگی موثر تر آلاینده‌های هوا مرتبط است و

منجر به غلظت‌های پایین‌تر می‌شود. همچنین در تحقیق دیگری (Xiong, 2023) در چین دریافت که غلظت آلاینده‌های هوا با سرعت و جهت باد تغییر می‌کند. این نتایج همسو با نتایج تحقیق جاری است که در نتایج این تحقیق به وضوح قابل مشاهده است. برای بررسی آلودگی هوا، مطالعه (Mao, & Talbot, 2004; Lai, 2011) می‌توان اشاره کرد که در امریکا و نیوانگلند انجام گرفت. نشان دادند O_3 در فصل زمستان و بهار بیشتر است. مطالعه Shariepour (2010) & Bidokhti که در تهران ایران صورت گرفت نشان دادند CO در فصل تابستان بیشتر است. این نتایج همسو با نتایج تحقیق جاری است. مطالعه دیگری که (Ahmadi et al. 2015) در سنج صورت گرفت نشان داد بیشترین غلظت آلاینده (SO_2) در روزهای سرد سال (دی تا بهمن) و O_3 در فصل بهار مشاهده شد همسو با نتایج تحقیق جاری است. اما بر خلاف نتایج تحقیق جاری اذعان داشتند که بیشترین غلظت NO_2 در تابستان و کمترین غلظت در فصول سرد سال مشاهده شد این می‌تواند به دلیل شرایط متفاوت اقلیمی هر دو منطقه باشد. استفاده از نمودارهای گلباد، گلغبار و قطبی دو متغیره در تحقیقات آلودگی هوا در چندین مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. مانند مطالعه (Grange 2016) در لندن، (Demirarslan 2021) در ترکیه و (Al-Harbi., 2020) در عربستان، هر سه مطالعه از این نمودارها برای شناسایی و توصیف منابع آلاینده‌ها استفاده کردند. گزارش کردند که این نمودارها امکان شناسایی منبع آلودگی هوا را فراهم می‌کند که همسو با نتایج تحقیق جاری است.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

تحقیق جاری در راستای بررسی الگوی تحلیلی گلباد و گلغبار آلودگی هوا به صورت روزانه فصلی و سالانه بر پایه داده‌های ماهواره‌ای و بررسی ارتباط آن با متغیرهای هواشناختی انجام گرفت. در این راستا چهار متغیر آلودگی هوا از جمله CO ، NO_2 ، SO_2 و O_3 مورد بررسی قرار گرفتند. به طور کلی در اکثر ایستگاه‌ها بیشترین مقدار SO_2 ، CO و NO_2 مربوط به سال ۲۰۲۱ است. بیشترین مقدار O_3 هم مربوط به سال ۲۰۱۹ است. طبق این نتایج می‌توان گفت حتی حین کووید-۱۹ و قرنطینه میزان غلظت آلاینده‌ها در نوار ساحلی مازندران افزایشی بوده است. نمودار گلباد و گلغبار سالانه جهت باد غالب سرعت باد و غلظت آلاینده‌ها در ایستگاه امیرآباد و بابلسر همسو بود. ولی بر خلاف این ایستگاه‌ها دو ایستگاه رامسر و نوشهر جهت سرعت باد با جهت غلظت آلاینده‌ها متفاوت است. بنابراین رابطه بین سرعت باد و آلودگی هوا پیچیده است و بسته به مکان، فصل و نوع آلاینده متفاوت است. به طوری که گلباد و نمودار قطبی دو متغیره فصلی جهت سرعت باد و آلاینده با هم متفاوت هستند که بیشترین مقدار غلظت هر یک از آلاینده‌ها در سرعت باد پایین اتفاق افتاده است. بر اساس نمودار قطبی دو متغیره می‌توان نتیجه گرفت مناطقی که در شرق نوار ساحلی مازندران هستند به دلیل شرایط آب و هوای متفاوت، صنایع بیشتر، تردد وسایل نقلیه، نیروگاه شهید سلیمی، میانکاله و سوزاندن بقایای گیاهی دارای آلودگی هوای بیشتر نسبت به غرب منطقه مورد مطالعه هستند. متغیرهای هواشناختی مانند میانگین سرعت باد و جهت باد نقش مهمی در تعیین کیفیت هوا دارند. تغییرات در این متغیرها می‌تواند بر پراکندگی و غلظت آلاینده‌ها در جو تاثیر بگذارد. تحقیق حاضر نتایج مهمی در مورد بررسی الگوی قطبی آلودگی هوا بر اساس عوامل هواشناختی در نوار ساحلی استان مازندران به ویژه تاثیر سرعت باد در ارتفاعات مختلف بر آلودگی هوا ارائه داده است. لازم به ذکر است برخی از محدودیت‌های مطالعه در استان مازندران شامل مواردی نظیر داده‌های محدود و ناکافی، تفاوت‌های جغرافیایی و توپوگرافی، تاثیر عوامل انسانی، تغییرات فصلی و اقلیمی، محدودیت‌های زمانی و تاثیرات خارجی است. بنابراین سایر عوامل خارج از کنترل، مانند شرایط جوی غیرمنتظره یا حوادث طبیعی، می‌توانند بر نتایج مطالعه تاثیر بگذارند. در نهایت با تاسیس ایستگاه‌های آلودگی‌سنجی جدید و رفع برخی از این محدودیت‌ها در آینده شاهد تحلیل‌های دقیق‌تری خواهیم بود. با توجه به اهمیت این موضوع، پیشنهادهای زیر برای تحقیقات آتی ارائه می‌شود تا بتوان درک عمیق‌تری از این موضوع به دست آورد. به محققین آتی در این زمینه پیشنهاد می‌شود که اثر سرعت باد متعلق به ارتفاعات مختلف (پروفیل عمودی باد) بر آلودگی هوا را مورد ارزیابی قرار دهند، تا بتوان موثرترین ارتفاع باد بر روی آلودگی هوا را شناسایی کرد. تحقیق جاری در شمال ایران انجام شده است که با توجه به نتایج به دست آمده، مطالعه آن برای اقلیم‌های متفاوت نیز ارزش تحقیقاتی داشته و به محققین پیشنهاد می‌شود. در این تحقیق از نمودارهای گلباد،

گلبار و قطبی استفاده شده است. پیشنهاد می‌شود از نمودارهای پیشرفته‌تر استفاده شود که سایر متغیرهای جوی و توپوگرافی را در خود جای دهد، تا امکان توصیف دقیق‌تر تغییرات زمانی و تاثیر این متغیرها بر پراکندگی آلاینده فراهم شود. همچنین پیشنهاد می‌شود که تاثیر سایر عوامل محیطی و جوی بر پراکندگی آلاینده‌ها مورد بررسی قرار گیرد تا درک جامع‌تری از این پدیده به دست آید. در زمینه نوآوری نیز پیشنهاد می‌شود که از حسگرهای هوشمند و شبکه‌های سنسور آلودگی هوا در ارتفاعات مختلف استفاده شود تا بتوان داده‌های دقیق‌تری از پروفیل عمودی باد و آلودگی هوا به دست آورد. این رویکرد نسبت به روش‌های سنتی، اطلاعات جامع‌تری را در اختیار محققان قرار خواهد داد. همچنین پیشنهاد می‌شود که از مدل‌های پیشرفته شبیه‌سازی جریان هوا و پراکندگی آلاینده‌ها استفاده شود. با ترکیب این مدل‌ها با داده‌های میدانی، می‌توان به درک عمیق‌تری از فرآیندهای فیزیکی حاکم بر این پدیده دست یافت. به منظور بررسی تاثیر متغیرهای محیطی و جوی بر پراکندگی آلاینده‌ها، پیشنهاد می‌شود که از رویکردهای هوش مصنوعی و یادگیری ماشین استفاده شود. این رویکردها می‌توانند الگوهای پیچیده و غیرخطی موجود در این فرآیندها را شناسایی و مدل‌سازی کنند. در نهایت، پیشنهاد می‌شود که نتایج این تحقیقات در قالب یک سامانه هشدار زودهنگام آلودگی هوا ادغام شود. این سامانه می‌تواند به مدیریت و کنترل آلودگی هوا در مناطق مختلف کمک کند.

۶. تشکر و قدردانی

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 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.

۷. تعارض منافع

در این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

۸. منابع

- Agustine, I., Yulinawati, H., Suswantoro, E., & Gunawan, D. (2017). Application of open air model (R Package) to analyze air pollution data. *Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology*, 1(1), 94–109. <https://doi.org/10.25105/urbanenvirotech.v1i1.2430>
- Al-Harbi, M., Al-Majed, A., & Abahussain, A. (2020). Spatiotemporal variations and source apportionment of NO_x, SO₂, and O₃ emissions around heavily industrial locality. *Environmental Engineering Research*, 25(2), 147-162.
- Ali-Taleshi, M. S., Moeinaddini, M., Bakhtiari, A. R., Feiznia, S., Squizzato, S., & Bourliva, A. (2021). A one-year monitoring of spatiotemporal variations of PM_{2.5}-bound PAHs in Tehran, Iran: source apportionment, local and regional sources origins and source-specific cancer risk assessment. *Environmental Pollution*, 274, 115883. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115883>.
- Althuwaynee, O. F., Balogun, A. L., & Al Madhoun, W. (2020). Air pollution hazard assessment using decision tree algorithms and bivariate probability cluster polar function: Evaluating inter-correlation clusters of PM 10 and other air pollutants. *Giscience & Remote Sensing*, 57(2), 207–226. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1712064>
- Bidokhti, A., & Shariépour, Z. (2010). Meteorological conditions of acute air pollution episodes for Tehran. *Journal of Environmental Studies*, 35(52), 1-14. (InPersian).
- Carslaw, D. C., & Ropkins, K. (2012). Openair—an R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software*, 27–28, 52–61. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.008>
- Carslaw, D.C. (2021). Package “openair”. Tools for the Analysis of Air Pollution Data. Retrieved October 2, 2021, from <https://cran.r-project.org/web/packages/openair/openair.pdf>
- De Simone, F., Gencarelli, C. N., Hedgecock, I. M., & Pirrone, N. (2014). Global atmospheric cycle of mercury: A model study on the impact of oxidation mechanisms. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(6), 4110–4123. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2451-x>
- Demirarslan, K. O., & Zeybek, M. (2021). Conventional air pollutant source determination using bivariate polar plot in Black Sea, Turkey. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01553-3>

- Demirarslan, K. O., & Zeybek, M. (2022). Conventional air pollutant source determination using bivariate polar plot in Black Sea, Turkey. *Environment, Development and Sustainability*, 24(2), 2736-2766.
- Espinoza-Guillen, J. A., Alderete-Malpartida, M. B., Cañari-Cancho, J. H., Pando-Huerta, D. L., Vargas-La Rosa, D. F., & Bernabé-Meza, S. J. (2023). Immission levels and identification of sulfur dioxide sources in La Oroya city, Peruvian Andes. *Environment, Development and Sustainability*, 25(11), 12843-12872.
- Eunhwa, J., Woogon, D., Geehyeong, P., Minkyong, K., & Eunchul, Y. (2016). Spatial and temporal variation of urban air pollutants and their concentrations in relation to meteorological conditions at four sites in Busan, South Korea. *Atmospheric Pollution Research*, 8, 89–100. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.07.009>
- Ghanbari, N. Shujaei, 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. (InPersian).
- 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. *Geography and Environmental Sustainability*, 10(4), 17-37, DOI: <https://doi.org/10.22126/ges.2021.5677.2285>. (InPersian).
- Grange, S. K., Lewis, A. C., & Carslaw, D. C. (2016). Source apportionment advances using polar plots of bivariate correlation and regression statistics. *Atmospheric Environment*, 145, 128-134.
- Hama, S. M., Kumar, P., Harrison, R. M., Bloss, W. J., Khare, M., Mishra, S., Namdeo, A., Sokhi, R., Goodman, P., & Sharma, C. (2020). Four-year assessment of ambient particulate matter and trace gases in the Delhi-NCR region of India. *Sustainable Cities and Society*, 54, 102003. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.102003>
- Hopke, P. K. (2016). Review of receptor modeling methods for source apportionment. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 66(3), 237–259. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1140693>
- Hui, L., Ma, T., Gao, Z., Gao, J., Wang, Z., Xue, L., Liu, H., & Liu, J. (2021). Characteristics and sources of volatile organic compounds during high ozone episodes: A case study at a site in the eastern Guanzhong Plain. *China Chemosphere*, 265, 129072. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129072>
- Jandacka, D., Durcanska, D., Nicolanska, M., & Holubcik, M. (2024). Impact of Seasonal Heating on PM10 and PM2.5 Concentrations in Sučany, Slovakia: A Temporal and Spatial Analysis. *Fire*, 7(4), 150.
- Jorquera, H., & Villalobos, A. M. (2020). Combining cluster analysis of air pollution and meteorological data with receptor model results for ambient PM_{2.5} and PM₁₀. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(22), 8455
- Khan, M. B., Masiol, M., Formenton, G., Di Gilio, A., de Gennaro, G., Agostinelli, C., & Pavoni, B. (2016). Carbonaceous PM_{2.5} and secondary organic aerosol across the Veneto region (NE Italy). *Science of the Total Environment*, 542, 172–181. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.103>
- Khebri, Z., Danehkar, A., Nejadkoorki, F., & Sadeghian, F. (2024). Exploring Air Quality and Industrial Pollution Sources in Bandar Abbas City: A Three-Year Analysis (2020-2023). *Journal of Natural Environment*. (InPersian).
- Lai, T. L. (2011). Occurrence of major ozone episodes and their time-series trends over the past decade in New England.
- Lang, J., Zhou, Y., Cheng, S., Zhang, Y., Dong, M., Li, S., Wang, G., & Zhang, Y. (2016). Unregulated pollutant emissions from on-road vehicles in China, 1999–2014. *Science of the Total Environment*, 573, 974–984. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.171>
- Lee, M., Brauer, M., Wong, P., Tang, R., Tsui, T. H., Choi, C., ... & Barratt, B. (2017). Land use regression modelling of air pollution in high density high rise cities: A case study in Hong Kong. *Science of the Total Environment*, 592, 306-315.
- 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. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(1), 409-427, DOI: <https://doi.org/10.5194/amt-11-409-2018>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: a review. *Frontiers in public health*, 8, 505570.
- Mansurian, Z., & Nejadkoorki, F. (2023). Analysis of the sensitivity of air pollution emissions of a steel factory to the prevailing wind direction. *Human & Environment*, 21(2), 31-53. (InPersian).
- Mao, H., & Talbot, R. (2004). Relationship of surface O₃ to large- scale circulation patterns during two recent winters. *Geophysical research letters*, 31(6).
- Nguyen, T. N. T., Vuong, Q. T., Lee, S. J., Xiao, H., & Choi, S. D. (2022). Identification of source areas of polycyclic aromatic hydrocarbons in Ulsan, South Korea, using hybrid receptor models and the conditional bivariate

- probability function. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 24, 140–151. <https://doi.org/10.1039/D1EM00320H>
- Prabhu, V., Soni, A., Madhwal, S., Gupta, A., Sundriyal, S., Shridhar, V., Sreekanth, V., & Mahapatra, P. S. (2020). Black carbon and biomass burning associated high pollution episodes observed at Doon valley in the foothills of the Himalayas. *Atmospheric Research*, 243, 105001. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105001>
- Rojano, R. E., Arregoces, H. A., Angulo, L. C., & Restrepo, G. M. (2018). Análisis y Origen de las Concentraciones de TSP y PM10 en Minería de Carbón a Cielo Abierto usando Gráficos Polares. *Información Tecnológica*, 29(6), 131–142. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000600131>
- Safarrad, T., & Yousefi, Y. (2022). Investigation of Air Pollution in Tehran According Wind and Precipitation Conditions. *Journal of Environmental Studies*, 48(3), 387-402. (InPersian).
- Saw, G. K., Dey, S., Kaushal, H., & Lal, K. (2021). Tracking NO₂ emission from thermal power plants in North India using TROPOMI data. *Atmospheric Environment*, 259, 118514, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118514>
- Sheng, N., & Tang, U. W. (2013). Risk assessment of traffic-related air pollution in a world heritage city. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10, 11-18.
- Sheng, N., & Tang, U. W. (2013). Risk assessment of traffic-related air pollution in a world heritage city. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10, 11-18.
- Sung, L. Y., Shie, R. H., & Lu, C. J. (2014). Locating sources of hazardous gas emissions using dual pollution rose plots and open path Fourier transform infrared spectroscopy. *Journal of hazardous materials*, 265, 30-40.
- Temiz, C. (2024). Analyzing Air Pollution Trends in Eastern Türkiye Over the Last Decade Using a Multivariate Statistical Approach. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3987349/v1>
- Tsai, C. W., & Chen, C. K. (2024). River dust-induced air pollution in a changing climate: A study of Taiwan's Choshui and Kaoping Rivers. *Environmental Pollution*, 360, 124398.
- Tudor, C. (2022). Ozone pollution in London and Edinburgh: spatiotemporal characteristics, trends, transport and the impact of COVID-19 control measures. *Heliyon*, 8(11).
- Uria-Tellaetxe, I., & Carslaw, D. C. (2014). Conditional bivariate probability function for source identification. *Environmental Modelling & Software*, 59, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.05.002>
- Veefkind, J. P., Aben, I., McMullan, K., Förster, H., De Vries, J., Otter, G., ... & 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 sensing of environment*, 120, 70-83, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027>
- Wei, C., Wang, M. H., Fu, Q. Y., Dai, C., Huang, R., & Bao, Q. (2020). Temporal characteristics and potential sources of black carbon in megacity Shanghai, China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(9), e2019JD031827. <https://doi.org/10.1029/2019JD031827>
- World Health Organization (WHO). (2021). WHO Global Guidelines on Air Quality: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. *World Health Organization*. Retrieved October 13, 2021, from <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>
- Xiong, J., Li, J., Gao, F., & Zhang, Y. (2023). City wind impact on air pollution control for urban planning with different time-scale considerations: A case study in Chengdu, China. *Atmosphere*, 14(7), 1068.
- Yan, L., Hu, W., & Yin, M. Q. (2021). An Investigation of the Correlation between Pollutant Dispersion and Wind Environment: Evaluation of Static Wind Speed. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(5).
- Yang, J., Shi, B., Shi, Y., Marvin, S., Zheng, Y., & Xia, G. (2020). Air pollution dispersal in high density urban areas: Research on the triadic relation of wind, air pollution, and urban form. *Sustainable Cities and Society*, 54, 101941.
- Yang, X., Wang, S., Zhang, W., Zhan, D., & Li, J. (2016). The impact of anthropogenic emissions and meteorological conditions on the spatial variation of ambient SO₂ concentrations: A panel study of 113 Chinese cities. *Science of the Total Environment*, 584–585, 318–328. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.145>
- Yeganeh, B., Khuzestani, R. B., Taheri, A., & Schauer, J. J. (2021). Temporal trends in the spatial-scale contributions to black carbon in a Middle Eastern megacity. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148364>
- Yousefi-Kabria, A., & Nadi, M. (2022). spatio-temporal analysis of air pollution in Mazandaran province using remote sensing. 3rd National Conference on Environmental Changes (Coastal Water Resources Management). <https://civilica.com/doc/1927265>. (InPersian).