Geographical planning of space quarterly journal

Online ISSN: 2538-4821

Journal Homepage: gps.gu.ac.ir

Spatio-Temporal Analysis of Atmospheric Pollutants over Kerman City Using Sentinel-5P Remote Sensing Data

Alireza Rashki [1], Sajjad Taleghani [2]

1. (Corresponding Author) *Department of Arid and Desert Areas Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran*
Email: a.rashki@um.ac.ir
2. *Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran*
Email: sajjad.taleghani@alumni.um.ac.ir

ARTICLEINFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received:
26 May 2026
Received in revised form:
8 September 2026
Accepted:
6 October 2026
Available online:
14 November 2026

Keywords:
Air Pollution,
Sulfur Dioxide (SO_2),
Nitrogen Dioxide (NO_2),
Remote Sensing,
Sentinel-5.

ABSTRACT

In recent years, Sentinel-5P satellite data have proven effective for monitoring spatiotemporal air pollution. This study analyzes four major pollutants - NO_2, CO, SO_2, AAI - over Kerman, southeastern Iran during the period 2018–2024. Annual and seasonal distribution maps were generated, and satellite data validated with ground measurements. Correlations with LST, EVI, DEM, and road density were examined, and a Composite Index of Air Pollution (CIAP) was developed. The results revealed clear seasonal variability in pollutant concentrations, with higher levels generally observed during colder seasons. A noticeable decline in CO and NO_2 concentrations was detected in 2022, highly likely associated with reduced human activities during the COVID-19 pandemic. Spatial analysis indicated that urban Zone 4 exhibited the highest mean CIAP value (0.773), alongside elevated concentrations of NO_2 and CO, whereas the lowest CIAP value (0.647) was observed in Zone 3. Validation results demonstrated acceptable agreement between satellite and ground-based observations, with correlation coefficients of 0.52 for SO_2, 0.50 for CO, 0.48 for NO_2, and 0.43 for AAI. Correlation analysis further showed strong positive relationships between NO_2 and CO ($r = 0.79$) and between pollutant levels and road density (r up to 0.62), while negative correlations were observed with elevation and vegetation cover. Overall, the findings confirm the capability of Sentinel-5P data for urban air quality monitoring in arid environments and highlight the combined influence of anthropogenic and environmental factors on air pollution patterns, providing valuable insights for urban air quality management and environmental policymaking.

Citation: Rashki, A., & Taleghani, S. (2026). Spatio-Temporal Analysis of Atmospheric Pollutants over Kerman City Using Sentinel-5P Remote Sensing Data. *Geographical planning of space quarterly journal*, 16 (3), 21-42.
http://doi.org/10.30488/gps.2026.553111.3870

© The Author(s)

Publisher: Golestan University Press

Extended Abstract

Introduction

Air pollution has emerged as a major environmental challenge of the 21st century, affecting human health, ecosystem functionality, and urban environments. In developing countries, rapid urbanization, industrial growth, and increasing vehicular emissions have intensified air pollution. Among the major atmospheric pollutants, nitrogen dioxide (NO_2), sulfur dioxide (SO_2), carbon monoxide (CO), and aerosols have important environmental and health implications. Kerman, located in southeastern Iran, is particularly relevant for air-quality assessment because of its arid climate, expanding urban area, industrial activities, and limited vegetation cover.

Urban air pollution is influenced by anthropogenic and environmental factors, including population density, industrial activities, traffic intensity, land use, meteorological conditions, topography, and vegetation cover. These factors contribute to spatial and temporal variations in pollutant distributions. Although ground-based monitoring stations provide valuable air-quality data, their limited spatial coverage can restrict the assessment of pollution patterns across urban areas.

Satellite remote sensing offers a complementary approach to overcoming these limitations. The Sentinel-5P satellite, equipped with the TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI), provides observations of several atmospheric constituents, including NO_2, SO_2, CO, and aerosol-related indicators. These observations enable the investigation of pollutant distributions and their temporal variations over large areas. Previous studies have demonstrated the value of Sentinel-5P and geographic information systems (GIS) for identifying pollution patterns and hotspots. Research in Iran has also highlighted the influence of industrial activities, meteorological conditions, wind patterns, and geographical characteristics on atmospheric pollution. In addition to assessing individual pollutants, composite indicators can provide an integrated representation of pollution. The Combined Index of Air Pollution (CIAP) combines information from multiple pollutants to facilitate the identification and comparison of areas experiencing relatively high cumulative pollution pressure.

Despite advances in satellite-based air-quality assessment, a comprehensive spatial and temporal analysis of multiple pollutants in Kerman over an extended period remains necessary. Therefore, this study investigates the spatial and temporal patterns of NO_2, SO_2, CO, and the Aerosol Absorbing Index (AAI) in Kerman during 2018–2024. It also develops and applies the CIAP index, evaluates satellite observations against ground-based monitoring data, and examines the relationships between pollutants and selected environmental and anthropogenic variables. The findings aim to improve understanding of urban air pollution in Kerman and support air-quality monitoring and management in areas with limited ground-based monitoring infrastructure.

Methodology

This study investigated the spatial and temporal patterns of NO_2, CO, SO_2, and the Aerosol Absorbing Index (AAI) in Kerman during 2018–2024 using Sentinel-5P satellite observations. The analysis comprised three components: pollutant trend and spatial-distribution analysis, development and validation of the Combined Index of Air Pollution (CIAP), and assessment of relationships between pollutants and environmental and anthropogenic factors.

Pollution Trend Analysis and CIAP Index Development

Satellite observations from the TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) aboard Sentinel-5P were obtained through Google Earth Engine (GEE) for January 2018–December 2024. Annual and seasonal composites were generated to examine temporal variations and spatial distributions of NO_2, SO_2, CO, and AAI. The processed datasets were subsequently transferred to ArcGIS Pro for spatial analysis and, where necessary, resampling to establish a consistent spatial framework.

The CIAP index was developed to provide an integrated assessment of relative pollution pressure. Because satellite

observations represent atmospheric column measurements and are not directly equivalent to health-based permissible concentration standards, each pollutant was normalized using the minimum–maximum method to obtain dimensionless values between 0 and 1. The normalized variables were then aggregated through weighted averaging, with equal weights assigned to all pollutants because locally applicable information on their relative toxicity was unavailable. CIAP was interpreted as a relative composite indicator for comparing pollution intensity across the study area, rather than as a substitute for individual pollutant assessments or health-based air-quality standards.

Validation Using Ground-Based Data

Satellite observations were evaluated against daily measurements from the Moshtagh air-quality monitoring station for 2018–2022. Satellite and ground-based data were temporally matched, and only dates with valid observations from both sources were included. Satellite values were extracted from the pixel closest to the monitoring station and compared with corresponding ground-based measurements. Agreement was assessed using the Pearson correlation coefficient (R) and coefficient of determination (R^2). Given the differences between satellite-derived atmospheric column measurements and ground-level observations, the analysis focused on temporal association rather than direct numerical equivalence.

Correlation with Environmental and Anthropogenic Factors

Environmental and anthropogenic variables included elevation, land surface temperature (LST), vegetation cover, and road density. Elevation data were obtained from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) digital elevation model at 30 m resolution, LST from Landsat observations, and the Enhanced Vegetation Index (EVI) from MODIS data, using Google Earth Engine. Road density was calculated through kernel density analysis in a GIS environment.

The environmental layers, pollutant variables, and CIAP were aligned to a consistent spatial framework. A regular sampling grid was established across the study area, and values were extracted at corresponding sampling locations. Pearson correlation coefficients were calculated in RStudio to examine the direction and strength of relationships between pollutants, CIAP, and environmental and anthropogenic variables. Correlation strengths were interpreted using the Chaddock scale.

Results and Discussion

The results revealed substantial spatial, seasonal, and interannual variability in NO_2, SO_2, CO, and AAI across Kerman during 2018–2024, indicating differences in emission sources and environmental influences.

AAI varied considerably across years and seasons, with relatively high values around 2022 followed by some reduction. Higher values were frequently observed in central and peripheral areas, indicating spatial heterogeneity in aerosol-related conditions. NO_2 showed elevated values in areas associated with urban activities and transportation, with a noticeable decline in 2022. CO exhibited similar temporal variations, including a reduction around the same year, potentially associated with changes in human mobility and anthropogenic activities during the COVID-19 pandemic. These temporal patterns suggest that urban pollutant levels respond to both long-term development and short-term changes in human activity.

SO_2 displayed a distinct spatial pattern, with relatively high values in western and northwestern parts of the study area, where industrial and mining activities may contribute to emissions. Seasonal variations included relatively elevated levels during colder periods. Atmospheric stability, wind direction, and other meteorological conditions may influence the distribution and accumulation of this pollutant. Overall, areas in the western, northwestern, central, and eastern parts of Kerman frequently exhibited elevated pollutant levels. These patterns may reflect the combined effects of industrial and mining activities, traffic intensity, urban development, and atmospheric circulation.

The CIAP analysis provided an integrated assessment of relative pollution pressure across municipal areas. Zone 4 recorded the highest average CIAP value (approximately

0.773), accompanied by comparatively high NO_2 and CO values, whereas Zone 3 had the lowest average value (approximately 0.647). These differences identify areas with relatively greater and lower cumulative pollution pressure within the study area.

Validation against observations from the Moshtagh monitoring station for 2018–2022 yielded coefficients of determination (R^2) ranging from approximately 0.185 to 0.279. Among the individual pollutants, SO_2 showed the highest reported correlation ($R \approx 0.52$), whereas AAI showed the lowest ($R \approx 0.43$). These results indicate modest agreement between satellite-derived and ground-based observations. The differences may reflect the distinct measurement characteristics of the datasets: Sentinel-5P provides atmospheric column information, whereas ground stations measure air quality near the surface. Differences in spatial representativeness, atmospheric conditions, and temporal matching may also affect the observed relationships. Therefore, satellite observations are best used alongside ground-based measurements rather than as their direct substitutes.

Correlation analysis highlighted associations between atmospheric pollutants and environmental and anthropogenic factors. Road density showed positive relationships with pollutants, particularly NO_2 and SO_2, suggesting an association between transportation intensity and pollution distribution. NO_2 and CO were also strongly positively correlated ($r \approx 0.79$), indicating potentially related emission patterns. In contrast, vegetation cover and elevation generally showed negative relationships with several pollutants. Greater vegetation cover was associated with lower pollutant values, while elevation may influence pollution distribution through topographic and atmospheric processes. These associations emphasize the combined roles of transportation, industrial activities, vegetation, topography, and atmospheric circulation in shaping spatial pollution patterns across Kerman.

Overall, the findings indicate that air pollution in Kerman results from interactions among anthropogenic activities and environmental conditions. The spatial distribution of pollutants, differences in CIAP values, and observed relationships with environmental variables demonstrate the value of combining satellite observations, ground-based measurements, and GIS-based analysis for identifying relative pollution hotspots and supporting urban air-quality management.

Conclusion

This study demonstrated the value of integrating Sentinel-5P observations, ground-based measurements, GIS-based analysis, and composite indicators to assess urban air pollution in Kerman during 2018–2024. The analysis revealed substantial spatial, seasonal, and interannual variability in NO_2, SO_2, CO, and AAI. The observed reductions in NO_2 and CO around 2022 may be associated with changes in human mobility and anthropogenic activities during the COVID-19 pandemic. Spatial analysis identified areas with relatively elevated pollution levels, particularly in zones influenced by industrial and mining activities, transportation networks, and urban development. The CIAP index further distinguished areas with different levels of relative cumulative pollution pressure, with Zone 4 recording the highest average value (0.773) and Zone 3 the lowest (0.647).

Validation against ground-based observations indicated modest agreement between satellite-derived and surface measurements, highlighting the importance of interpreting satellite data in conjunction with monitoring-station records. Correlation analysis also revealed positive associations between road density and selected pollutants, as well as a strong positive relationship between NO_2 and CO ($r \approx 0.79$). Conversely, vegetation cover and elevation generally showed negative associations with several pollutants. These findings suggest that air pollution patterns in Kerman reflect the combined influence of anthropogenic activities and environmental conditions. However, the results should be interpreted as relative spatial and temporal patterns rather than direct assessments against health-based air-quality standards.

From an environmental management perspective, the findings support expanding ground-based monitoring, particularly in identified pollution hotspots, and

strengthening the management of industrial and mining emissions. Improving public transportation and developing appropriate urban green infrastructure may also contribute to reducing local pollution pressure. Future research should incorporate additional monitoring stations, detailed meteorological variables, and advanced statistical or machine-learning models to improve the interpretation and prediction of pollutant distributions. The integrated framework applied in this study can support air-quality assessment and management in Kerman and other cities with limited monitoring infrastructure.

Funding
There is no funding support.

Authors' Contribution
A. Rashki was responsible for conceptualization, designing the research methodology, formal analysis of satellite data, final editing, as well as supervision and executive management of the research.
S. Taleghani contributed to writing the original draft, data acquisition, validation of findings, data management, implementation of satellite image processing codes, and map visualization.

Conflict of Interest
The authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments
We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

مجله آمایش جغرافیایی فضا

شاپا الکترونیکی: ۴۸۲۱-۲۵۳۸

Journal Homepage: gps.gu.ac.ir

تحلیل فضایی–زمانی آلاینده‌های جوی در شهر کرمان با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور ماهواره Sentinel-5P

علیرضا راشکی [۱]، سجاد طالقانی [۲]

۱- نویسنده مسئول، گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: a.rashki@um.ac.ir

۲- گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: sajjad.taleghani@alumni.um.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۵/۰۳/۰۵
تاریخ بازنگری:
۱۴۰۵/۰۶/۱۷
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۵/۰۷/۱۴
تاریخ چاپ:
۱۴۰۵/۰۸/۲۳

واژگان کلیدی:
آلودگی هوا
دی‌اکسید گوگرد (SO_2)
دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)
سنجش از دور
سنتینل-5P

چکیده

در سال‌های اخیر، داده‌های سنجنده TROPOMI ماهواره Sentinel-5P به‌عنوان ابزاری کارآمد برای پایش فضایی_زمانی آلودگی هوا مورد توجه قرار گرفته‌اند. هدف این پژوهش، بررسی الگوی فضایی_زمانی چهار آلاینده اصلی هوا شامل دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)، مونوکسید کربن (CO)، دی‌اکسید گوگرد (SO_2) و شاخص جذب آئروسل (AAI) در محدوده شهری کرمان طی دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ است. بدین منظور، نقشه‌های سالانه و فصلی آلاینده‌ها استخراج، داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-5P با داده‌های ایستگاه زمینی میدان مشتاق اعتبارسنجی و ارتباط آلاینده‌ها با دمای سطح زمین، پوشش گیاهی، ارتفاع و تراکم راه‌ها تحلیل شد. همچنین، به‌منظور ارزیابی فشار تجمعی آلودگی، شاخص ترکیبی آلودگی هوا (CIAP) محاسبه گردید. نتایج نشان داد که تمامی آلاینده‌ها دارای تغییرات فصلی مشخص بوده و غلظت CO و NO_2 در سال ۲۰۲۲ کاهش محسوسی را تجربه کرده است که احتمالاً با کاهش فعالیت‌های انسانی ناشی از همه‌گیری COVID-19 مرتبط است. منطقه ۴ شهر کرمان با میانگین CIAP برابر ۰٫۷۷۳ بالاترین سطح آلودگی و بیشترین مقادیر NO_2 و CO را نشان داد، در حالی‌که کمترین مقدار CIAP (۰٫۶۴۷) در منطقه ۳ مشاهده شد. اعتبارسنجی داده‌های ماهواره‌ای با داده‌های ایستگاه زمینی همبستگی قابل قبولی را نشان داد؛ به‌گونه‌ای که بیشترین ضریب همبستگی برای SO_2 (R=0.52) و کمترین آن برای AAI (R=0.43) به‌دست آمد. همچنین، همبستگی مثبت بین NO_2 و CO (r=0.79) مشاهده شد و آلاینده‌ها نیز با تراکم راه‌ها همبستگی مثبت (r=0.62) و با ارتفاع و پوشش گیاهی همبستگی منفی نشان دادند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که داده‌های Sentinel-5P، در ترکیب با تحلیل‌های آماری، ابزار مناسبی جهت پایش کیفیت هوا و حمایت از مدیریت و سیاست‌گذاری محیط‌زیستی در مناطق خشک هستند.

استناد: راشکی، علیرضا و طالقانی، سجاد. (۱۴۰۵). تحلیل فضایی–زمانی آلاینده‌های جوی در شهر کرمان با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور ماهواره Sentinel-5P. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*، ۱۶ (۳)، ۴۲-۲۱.

http://doi.org/10.30488/gps.2026.585070.3905

© نویسندگان

ناشر: انتشارات دانشگاه گلستان

مقدمه

آلودگی هوا آلودگی هوا به‌عنوان یکی از بحرانی‌ترین معضلات زیست‌محیطی قرن حاضر، پیامدهای گسترده‌ای بر سلامت انسان، اکوسیستم‌ها و تغییرات اقلیمی بر جای گذاشته و تأثیرات چندوجهی بر جنبه‌های مختلف محیط زیست دارد (Botkin & Keller,2012 ؛Manisalidis et al,2020). آثار مخرب آلاینده‌های هوا بسته به نوع آلاینده، دُز تماس و ویژگی‌های فردی متفاوت است (Grzywa-Celińska et al,2020). روند پرشتاب شهرنشینی، گسترش فعالیت‌های صنعتی و افزایش وسایل نقلیه موتوری، غلظت آلاینده‌های گازی و ذرات معلق در جو را افزایش داده است (Lelieveld et al, 2015). در شهر کرمان نیز به دلیل فعالیت‌های معدنی گسترده، رشد جمعیت و توسعه فیزیکی شهر، سطح آلاینده‌ها افزایش یافته است (حیدری و همکاران، ۱۳۹۶)؛ با توجه به محدود بودن زیرساخت پایش هوا و فعال بودن تنها دو ایستگاه در شهر، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای اهمیت زیادی دارد. ماهواره Sentinel-5P با اندازه‌گیری آلاینده‌هایی مانند NO_2، SO_2 و CO، امکان پایش مستمر آلودگی هوا را در مناطق دارای ایستگاه‌های محدود فراهم می‌کند.

تیس[۱] و همکاران (۲۰۱۷) در بررسی NO_2 و SO_2 نشان دادند که علاوه بر تراکم جمعیت، متغیرهایی همچون موقعیت جغرافیایی، شرایط هواشناسی و کاربری اراضی نیز به‌طور هم‌زمان در کنترل الگوی پراکنش آلودگی نقش دارند—یافته‌ای که بر ضرورت تحلیل یکپارچه عوامل طبیعی و انسانی تأکید می‌کند. اسدی و همکاران (۱۴۰۳) نیز نشان دادند که الگوهای گردش جو و جابه‌جایی توده‌های هوا در استان کرمان نقش تعیین‌کننده‌ای در انتقال رطوبت و مواد جوی و شکل‌گیری الگوهای مکانی پدیده‌های جوی دارند.

تحقیقات متعددی با هدف پایش و تبیین الگوهای فضایی–زمانی آلودگی هوا انجام شده‌اند که در آن‌ها داده‌های Sentinel-5P نقش برجسته‌ای داشته‌اند. غریبی و شایسته[۲](۲۰۲۱) با استفاده از Google Earth Engine و Sentinel-5P، الگوهای فضایی CO، SO_2، NO_2،O_3 و شاخص آئروسل را در مقیاس ملی تحلیل کرده و خوشه‌بندی فضایی و لکه‌های داغ آلودگی را در مناطق صنعتی و کلان‌شهری نظیر اهواز، عسلویه و تهران گزارش دادند. فولادلو و آلتان[۳](۲۰۲۲) نیز در آلمان رابطه بین تراکم جمعیت و آلاینده‌ها را بررسی کردند. در مقیاس منطقه‌ای و محلی، حسن‌زاده و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور و GIS، تغییرات SO_2 و NO_2 را در اطراف کارخانه ذوب مس خاتون‌آباد کرمان تحلیل کرده و نقش تعیین‌کننده فعالیت‌های صنعتی را نشان دادند. همچنین زینالی و همکاران (۱۴۰۲) و ناجی و همکاران (۱۴۰۴) با تمرکز بر تحلیل فضایی–زمانی آلاینده‌ها و ذرات معلق، اهمیت شرایط اقلیمی، الگوهای باد و ویژگی‌های فیزیوگرافی را در تبیین پراکنش آلودگی هوا مورد تأکید قرار دادند.

در کنار پایش تک‌آلاینده‌ای، رویکردهای نوین‌تری برای ارائه تصویری جامع‌تر از وضعیت آلودگی هوا مطرح شده‌اند. استفاده از شاخص‌های ترکیبی آلودگی هوا نظیر CIAP امکان تجمیع چند آلاینده و مقایسه شدت آلودگی در مقاطع زمانی و فضایی مختلف را فراهم می‌کند (Lelieveld et al,2015)، و این رویکرد به‌ویژه در مناطقی با منابع متنوع آلودگی می‌تواند ابزاری مؤثر برای تحلیل یکپارچه کیفیت هوا باشد.

پژوهش حاضر با هدف تحلیل فضایی و زمانی آلودگی هوا در شهر کرمان، مبتنی بر سه گام اصلی طراحی شده است: ۱) شناسایی تغییرات فضایی–زمانی آلاینده‌ها و محاسبه شاخص ترکیبی CIAP با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-5P، ۲) صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده با داده‌های ایستگاه‌های زمینی آلودگی هوا، و ۳) تحلیل ارتباط میان آلاینده‌ها و

۱ Theys
۲ Gharibi & Shayesteh
۳ Fuladlu & Altan

شاخص‌های محیطی و انسانی از طریق روش‌های آماری و فضایی. یافته‌های این تحقیق می‌تواند در طراحی راهبردهای مدیریتی و تصمیم‌گیری‌های محیط‌زیستی در سطح محلی و منطقه‌ای نقش موثری ایفا کند.

مبانی نظری

در سال‌های اخیر، ماهواره‌هایی مانند Sentinel-5P امکان پایش روزانه و جهانی آلاینده‌های جوی (NO_2، SO_2، CO و شاخص جذب آئروسل) را با دقت طیفی و تفکیک فضایی مناسب فراهم کرده‌اند (Theys et al,2017). برای تفسیر این داده‌ها، سازمان EPA از شاخص AQI بر پایه پنج آلاینده اصلی شامل CO، NO_2، SO_2، O_3 و PM استفاده می‌کند (Agency,2014). در پژوهش‌های دیگر شاخص ترکیبی CIAP معرفی شده که با بهره‌گیری از روش نرمال‌سازی مین–ماکس و تجمیع وزنی آلاینده‌ها بر اساس اثرات زیان‌بارشان، معیاری واحد و قابل‌مقایسه ارائه می‌دهد (Tabunschik et al,2023a). در تحلیل الگوهای توزیع آلودگی، چند عامل محیطی نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. دمای سطح زمین (LST) با افزایش دما هم واکنش‌های فتوشیمیایی مولد ازن و سایر آلاینده‌های ثانویه را تسریع می‌کند و هم با کاهش اختلاط عمودی جو، ماندگاری آلاینده‌ها را افزایش می‌دهد. مدل رقومی ارتفاع (DEM) نیز بر جریان‌های هوایی محلی اثر می‌گذارد؛ در ارتفاعات بالاتر به‌دلیل پایداری کمتر جو و تقویت جریان‌های باد، تجمع آلاینده‌ها کاهش می‌یابد. پوشش گیاهی (EVI) نیز با جذب تابش خورشیدی، افزایش رطوبت نسبی و تثبیت ذرات معلق، به‌عنوان یک فیلتر زیستی عمل کرده و به کاهش غلظت آلاینده‌ها کمک می‌کند (Tabunshchik et al,2024). علاوه بر این مؤلفه‌های طبیعی، تراکم شبکه راه‌ها به‌عنوان عامل انسان‌ساخت در تعیین منابع انتشار آلاینده‌های خطی و نقطه‌ای بسیار مؤثر است؛ مناطق پرترافیک معمولاً سطوح بالاتری از NO_2 و CO را نشان می‌دهند (حبیبی و همکاران، ۱۳۹۱). برای سنجش همزمان این مؤلفه‌ها و ارزیابی روابط آنها با آلاینده‌ها، از ضریب همبستگی پیرسون برای اندازه‌گیری شدت و جهت رابطه خطی و شناسایی لکه‌های داغ آلودگی استفاده می‌شود؛ این روش‌های آماری در کنار توانمندی پردازش ابری Google Earth Engine، امکان تحلیل هم‌زمان میلیون‌ها نقطه داده را با سرعت و دقت بالا فراهم می‌سازند. ترکیب مبانی نظری فوق و چارچوب روش‌شناسی فضایی، پایه‌ای قوی برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی آلودگی هوا و ارائه راهبردهای مدیریتی در مقیاس شهری به‌ویژه در مناطقی با کمبود زیرساخت‌های پایش زمینی مانند شهر کرمان به شمار می‌آید.

روش پژوهش

این پژوهش بر پایه داده‌های ماهواره‌ای، متغیرهای محیطی و انسان‌ساخت، و تحلیل‌های آماری استوار است. هدف اصلی، بررسی روند و توزیع فضایی آلاینده‌ها، محاسبه شاخص ترکیبی آلودگی هوا (CIAP) و بررسی همبستگی آن با عوامل مؤثر است (شکل ۱).

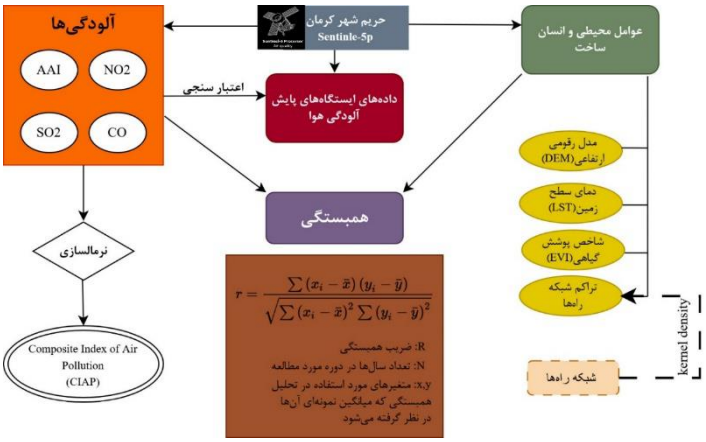
داده‌های ماهواره‌ای: پارامترهای اصلی شامل منوکسید کربن (CO)، دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)، دی‌اکسید گوگرد (SO_2) و شاخص آئروسل‌های جاذب (AAI) هستند که داده‌های ستون تروپوسفری آن‌ها از سنجنده TROPOMI روی ماهواره Sentinel-5P (وابسته به آژانس فضایی اروپا/ESA) استخراج شد. Sentinel-5P نخستین مأموریت سامانه کوپرنیک برای پایش جو زمین است، با توان تفکیک فضایی حدود ۱۱۱۳٫۲ متر و تفکیک زمانی نزدیک به یک روز (هرچند بسته به شرایط جوی ممکن است ۱ تا ۲ روز فاصله بیفتد). این سنجنده داده‌های اولیه تقریباً آنی و داده‌های پردازش‌شده آفلاین چند روز پس از تصویربرداری ارائه می‌دهد و پوشش طیفی گسترده و جهانی دارد (Vîrghileanu et al,2020; Shikwambana et al,2020; Theys et al,2017).

برای استخراج و پردازش، از پلتفرم ابری Google Earth Engine (GEE) استفاده شد؛ داده‌های NO_2، SO_2، CO و AAI از محصولات سطح ۳ سنجنده TROPOMI شامل COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_NO2، L3_SO2 ، L3_CO و L3_AER_AI، در بازه زمانی ژانویه ۲۰۱۸ تا دسامبر ۲۰۲۴ استخراج و به‌صورت میانگین سالانه و فصلی تجمیع شدند. تفکیک فضایی اسمی داده‌ها حدود ۱۱۱۳٫۲ متر است و خروجی‌ها پس از پردازش به ArcGIS Pro منتقل و در صورت نیاز بازنمونه‌برداری شدند. مقادیر استخراج‌شده نمایانگر تراکم ستونی آلاینده‌ها (mol/m^2) هستند.

شاخص CIAP: با الهام از مطالعات پیشین (Tabunschik et al,2023b) به‌کار رفت، با این تفاوت که به‌دلیل استفاده از داده‌های ستونی ماهواره‌ای و نبود استاندارد حد مجاز متناظر، شاخص بر پایه نرمال‌سازی و تجمیع مقادیر آلاینده‌ها محاسبه شد. آلاینده‌ها با روش نرمال‌سازی حداقل–حداکثر (Min–Max) به بازه بدون‌بُعد [۰،۱] تبدیل و سپس از طریق میانگین‌گیری وزنی متغیرهای استانداردسازی‌شده ترکیب شدند؛ به‌دلیل نبود اطلاعات دقیق درباره سمیت نسبی آلاینده‌ها در مقیاس منطقه‌ای، وزن متغیرها برابر در نظر گرفته شد. شاخص CIAP نمایی پیوسته از شدت نسبی آلودگی هوا ارائه می‌دهد و امکان شناسایی نواحی با فشار تجمعی بالاتر آلودگی را فراهم می‌سازد؛ با این حال، نتایج آن باید در کنار تحلیل تک‌آلاینده‌ای تفسیر شود، زیرا بیانگر غلظت نسبی تجمعی است و جایگزین ارزیابی‌های مبتنی بر استانداردهای سلامت نیست.

اعتبارسنجی با داده‌های زمینی: به‌منظور ارزیابی تطابق داده‌های Sentinel-5P با مشاهدات زمینی، از داده‌های روزانه ایستگاه پایش کیفیت هوای «مشتاق» در بازه ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ استفاده شد. داده‌های ماهواره‌ای و زمینی از نظر زمانی هم‌پوشان‌سازی شدند و تنها روزهایی که داده معتبر در هر دو منبع موجود بود در تحلیل لحاظ گردید. مقادیر آلاینده‌ها از نزدیک‌ترین پیکسل ماهواره‌ای به محل ایستگاه استخراج و با داده‌های روزانه ایستگاه مقایسه شد؛ ارزیابی تطابق با ضریب همبستگی پیرسون (R) و ضریب تعیین (R^2) انجام گرفت. از آنجا که داده‌های ماهواره‌ای به‌صورت مقادیر ستونی ($mol \cdot m^{-2}$) و داده‌های ایستگاهی گازها به ppb و ذرات معلق به $\mu g \cdot m^{-3}$ گزارش می‌شوند، این دو منبع از نظر واحد و ماهیت فیزیکی قابل مقایسه مستقیم نیستند. بنابراین هدف تحلیل همبستگی، بررسی میزان همخوانی الگوی تغییرات زمانی بین داده‌های ماهواره‌ای و زمینی بوده، نه مقایسه مستقیم مقادیر عددی؛ استفاده از شاخص‌های همبستگی مستقل از واحد (R و R^2) رویکردی متداول و پذیرفته‌شده در مطالعات مشابه است.

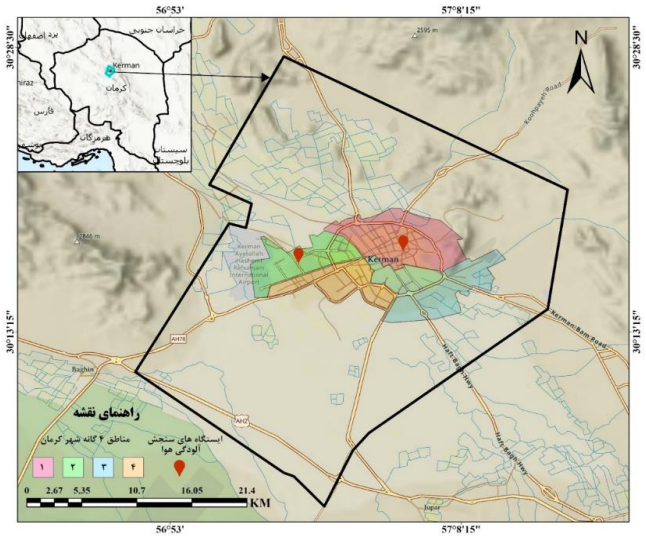
متغیرهای مؤثر بر توزیع فضایی آلودگی: ارتفاع مطلق (از مدل رقومی ارتفاع SRTM، تفکیک ۳۰ متر)؛ دمای سطح زمین LST (از داده‌های Landsat در GEE، تفکیک ۳۰ متر)؛ پوشش گیاهی EVI (به‌عنوان شاخص نماینده شرایط محیط زیستی، از داده‌های Modis)؛ و عوامل انسان‌ساخت شامل شبکه راه‌ها که با تحلیل تراکم کرنل (Kernel Density) در محیط GIS به نقشه‌های تراکم تبدیل شدند. تمامی لایه‌ها به تفکیک فضایی یکسان بازنمونه‌برداری و برای استخراج مقادیر پیکسلی آماده شدند. یک شبکه منظم از نقاط نمونه‌برداری در سطح منطقه ایجاد گردید و مقادیر CIAP و سایر متغیرها از این نقاط استخراج شد. همبستگی پیرسون بین متغیرها در محیط RStudio (با تابع cor) محاسبه و تفسیر نتایج بر اساس مقیاس چدوک (Chaddock scale) صورت گرفت.



شکل ۱. مراحل روش‌شناسی پژوهش جهت تحلیل فضایی و زمانی آلودگی هوا در شهر کرمان

محدوده مورد مطالعه

شهر کرمان به‌عنوان بزرگ‌ترین و مهم‌ترین مرکز شهری جنوب‌شرق ایران، نقش عملکردی فرامنطقه‌ای دارد (Kazeminiya, 2017). این شهر بین عرض‌های ۳۰ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۲۱ دقیقه شمالی و طول‌های ۵۶ درجه و ۵۹ دقیقه تا ۵۷ درجه و ۷ دقیقه شرقی قرار گرفته و بخشی از دشت کرمان و یک دشت رسی خشک (پلایا) را دربرمی‌گیرد (شکل ۲). جمعیت شهر بیش از ۵۰۰ هزار نفر برآورد شده و اقلیمی خشک دارد (حسن‌زاده، ۱۳۸۵). کرمان در پهنه‌ای بادخیز قرار گرفته و تحت تأثیر بادهای محلی و فرامنطقه‌ای، عمدتاً از غرب و جنوب‌غرب، است (Heidarinejad et al., 2018; Abbasnejad & Abbasnejad, 2019). گسترش کالبدی شهر طی ۳۰ سال گذشته موجب دو برابر شدن مساحت آن شده است (حسن‌زاده، ۱۳۸۵)؛ این توسعه با برهم‌زدن خاک‌های حاشیه‌ای، از منابع تولید گردوغبار بوده و نبود کمربند سبز نیز ورود گردوغبار از نواحی پیرامونی را تسهیل کرده است. همچنین فعالیت‌های ساختمانی، ترافیک و صنایع بر کیفیت هوا اثرگذارند. وجود سه ناحیه صنعتی، یک کارخانه سیمان و چندین مجتمع صنعتی در اطراف شهر نیز می‌تواند در انتشار ذرات معلق و سایر آلاینده‌ها نقش داشته باشد. بنابراین، ویژگی‌های جغرافیایی، اقلیمی و کالبدی کرمان، بررسی آلودگی هوای این شهر را ضروری می‌سازد.

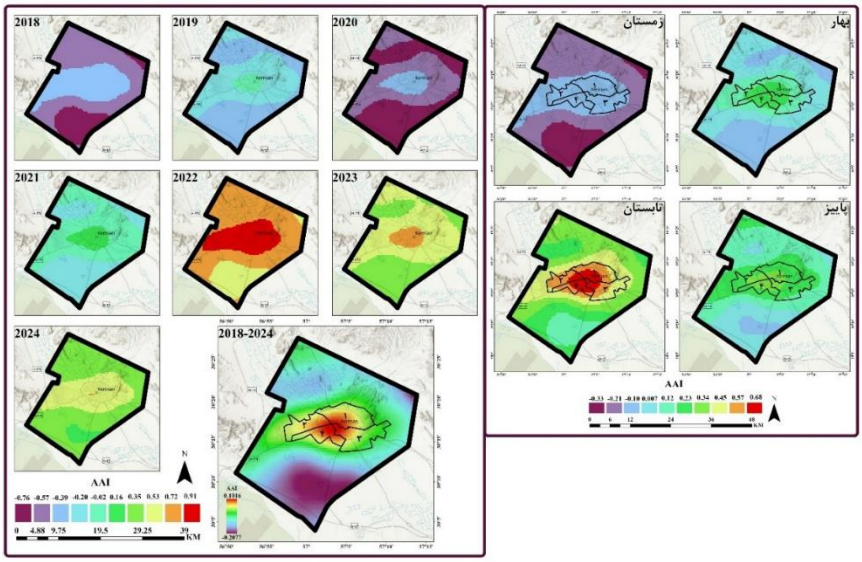


شکل ۲. حریم و تقسیمات چهارگانه شهر کرمان همراه با موقعیت ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا

یافته‌ها

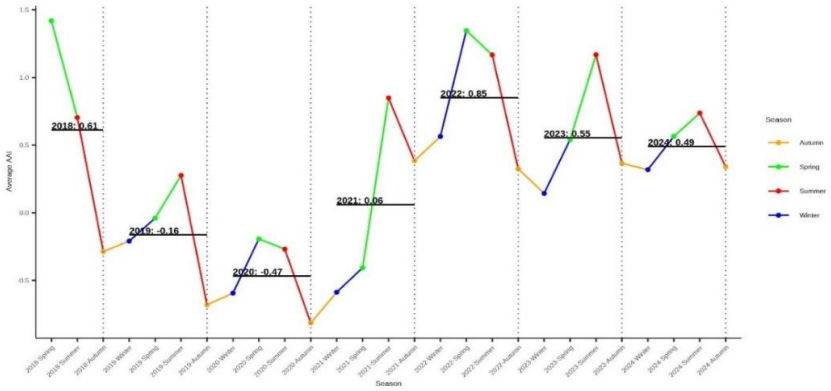
ذرات معلق

شاخص جذب آئروسل (AAI) برخلاف بسیاری از شاخص‌های کیفیت هوا، مقادیر مثبت و منفی دارد: مقادیر مثبت نشان‌دهنده آئروسل‌های جاذب پرتو فرابنفش (مانند گردوغبار معدنی، دود احتراق و کربن سیاه) است، در حالی که مقادیر نزدیک صفر یا منفی بیانگر شرایط نسبتاً پاک جوی است. این شاخص، نوع و ویژگی نوری آئروسل‌ها را نشان می‌دهد— نه غلظت مستقیم ذرات معلق— و این رویکرد در مطالعات دورسنجی آلودگی هوا رایج است (Kooreman et al,2020). بررسی روند AAI در کرمان طی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ با تصاویر Sentinel-5P نشان‌دهنده نوسانات قابل توجه در توزیع فضایی این شاخص است. بر اساس نقشه‌های AAI (شکل ۳)، مقادیر در همه مناطق یکسان نیست و نواحی با مقادیر بالاتر عمدتاً در محدوده شهری کرمان و حواشی آن قرار دارند.



شکل ۳. توزیع فضایی سالانه و فصلی شاخص جذب آئروسل (AAI) در حریم شهر کرمان در طی سالهای ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ (لازم به ذکر است که به دلیل آغاز ارائه داده‌های AAI از نیمه دوم سال ۲۰۱۸، تحلیل سال ۲۰۱۸ مبتنی بر داده‌های موجود از ژوئیه تا دسامبر این سال انجام شده است)

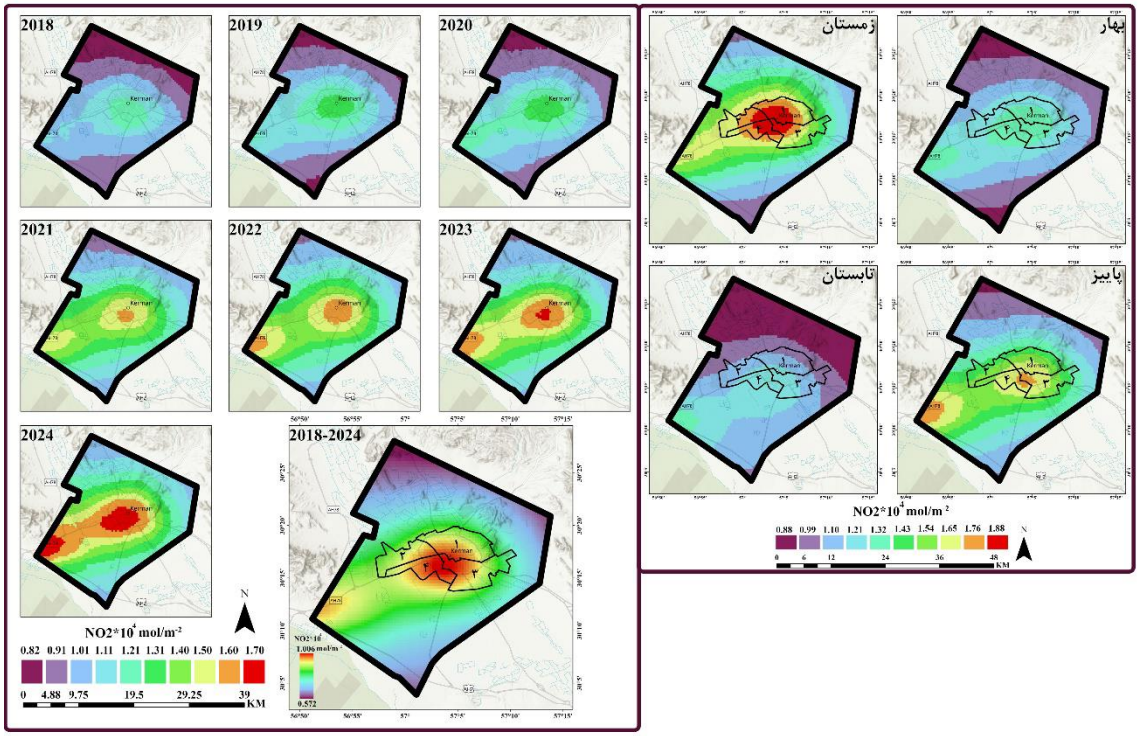
بررسی میانگین سالانه AAI (شکل ۳) نشان داد که در سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰، مقادیر این شاخص در بیشتر نواحی شهر پایین بوده است. از سال ۲۰۲۱ افزایش قابل‌توجهی، به‌ویژه در نواحی مرکزی و جنوبی، مشاهده شد و در سال ۲۰۲۲ ناحیه‌ای با مقادیر بالای AAI در مرکز شهر شکل گرفت. اگرچه در سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ شدت AAI نسبت به ۲۰۲۲ کاهش یافت، مقادیر آن همچنان از سه سال ابتدایی دوره مطالعه بیشتر بود. از نظر فصلی، بیشترین مقادیر AAI عمدتاً در بهار و تابستان، به‌ویژه در مرکز شهر، و کمترین مقادیر در پاییز و زمستان مشاهده شد. همچنین، نقشه میانگین هفت‌ساله (۲۰۱۸–۲۰۲۴) بیانگر توزیع غیریکنواخت AAI و تمرکز بیشتر آن در بخش مرکزی و حاشیه‌ای شهر است.



شکل۴. تغییرات فصلی و میانگین سالانه شاخص جذب آئروسل

دی اکسید نیتروژن(NO_2)

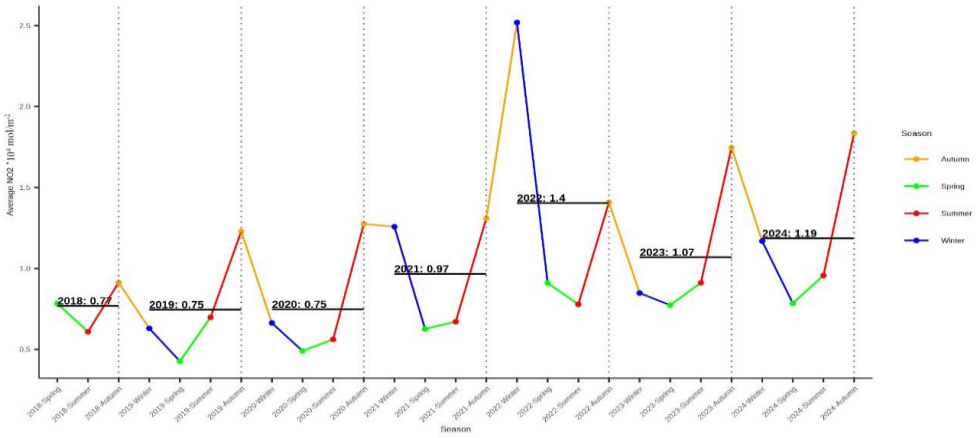
بررسی توزیع فضایی-زمانی NO_2 در شهر کرمان طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴، بر اساس داده‌های TROPOMI ماهواره Sentinel-5P، روند افزایشی و تمرکز بیشتر آلاینده در نواحی مرکزی شهر نسبت به مناطق پیرامونی را نشان می‌دهد (شکل ۵). در سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰، مقادیر NO_2 نسبتاً پایین و توزیع آن در بیشتر مناطق یکنواخت بود؛ لازم به ذکر است که تحلیل سال ۲۰۱۸ به‌دلیل آغاز ارائه داده‌های AAI از نیمه دوم سال، بر پایه داده‌های ژوئیه تا دسامبر انجام شده است. از سال ۲۰۲۱ به بعد، افزایش قابل‌توجه NO_2 مشاهده شد و این روند در سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۴، با تمرکز مقادیر بالاتر در نواحی مرکزی شهر، بارزتر بود (شکل ۶).



شکل ۵. تغییرات فضایی و فصلی تغییرات نیتروژن دی‌اکسید (NO2) در حریم شهر کرمان

نقشه‌های فصلی NO_2 نیز توزیع نابرابر و وابسته به زمان این آلاینده را نشان می‌دهند. در بهار و تابستان، مقادیر NO_2

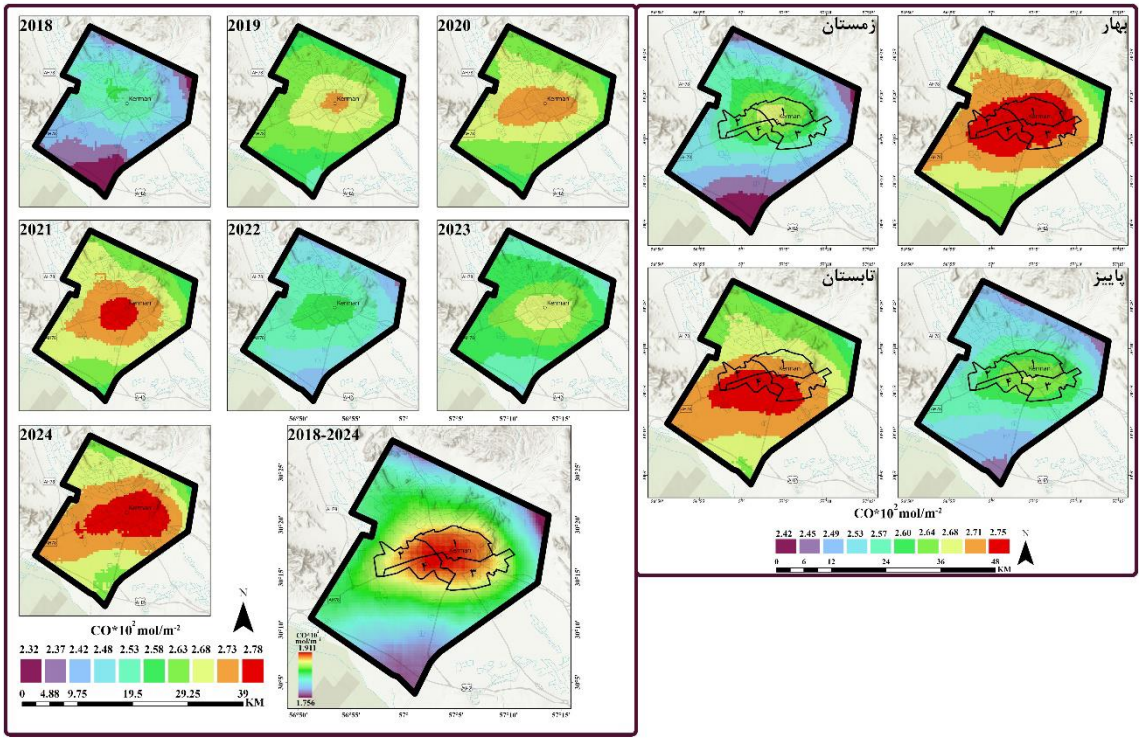
نسبت به متوسط سالانه و سایر فصول کمتر است؛ به‌طوری‌که بیشترین مقادیر در بهار در غرب و جنوب‌غرب و در تابستان در جنوب شهر مشاهده می‌شود. در مقابل، پاییز و زمستان مقادیر بالاتری دارند. در زمستان، بیشترین تمرکز NO_2 در مرکز و نیمه شمالی شهر بوده و دامنه آن تا خارج از محدوده شهری و مناطق پیرامونی گسترش می‌یابد. در پاییز نیز مقادیر بالاتر از متوسط تا باغین، اختیارآباد و بخش‌هایی از شمال‌شرق شهر امتداد دارد. نقشه تجمیعی هفت‌ساله، الگوی پایدار تمرکز NO_2را در مرکز شهر، با گرایش به غرب و جنوب‌غرب و تا نزدیکی باغین، نشان می‌دهد.



شکل۶. تغییرات فصلی و میانگین سالانه نیتروژن دی‌اکسید (mol/m2)

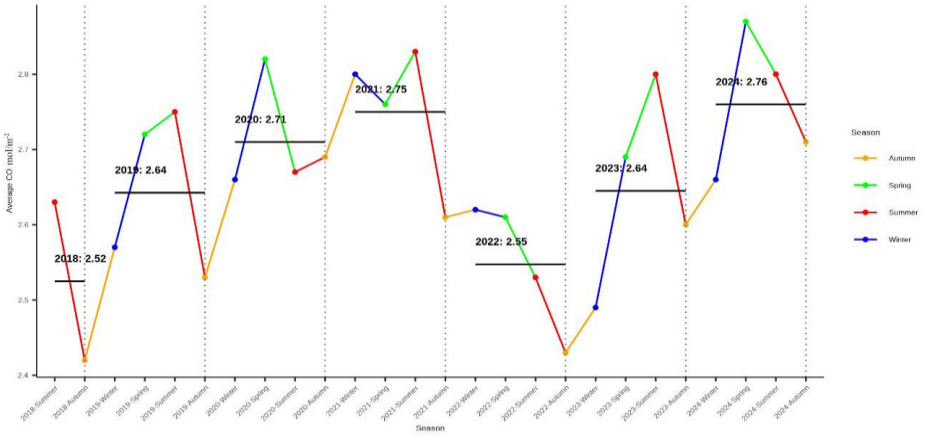
مونوکسیدکربن(CO)

روند تغییرات گاز مونوکسید کربن (CO) در محدوده شهری کرمان طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴، بر اساس داده‌های Sentinel-5P، افزایش تدریجی، نوسانات دوره‌ای و تمرکز بیشتر در نواحی مرکزی شهر را نشان می‌دهد (شکل ۷). در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹، مقادیر CO در بیشتر مناطق نسبتاً پایین و پراکنده بود، اما از ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۱ افزایش محسوسی، به‌ویژه در نواحی مرکزی و جنوبی شهر، مشاهده شد. در سال ۲۰۲۲ کاهش ناگهانی و چشمگیری در مقادیر CO رخ داد و بخش عمده شهر مقادیر پایین‌تری را نشان داد (شکل ۸). با این حال، از سال ۲۰۲۳ روند افزایشی مجدداً آغاز شد و در سال ۲۰۲۴ به اوج رسید؛ به‌طوری‌که نواحی وسیعی از مرکز و غرب شهر دارای بالاترین مقادیر CO بودند.



شکل ۷. تغییرات فضایی و فصلی مونوکسید کربن در حریم شهر کرمان

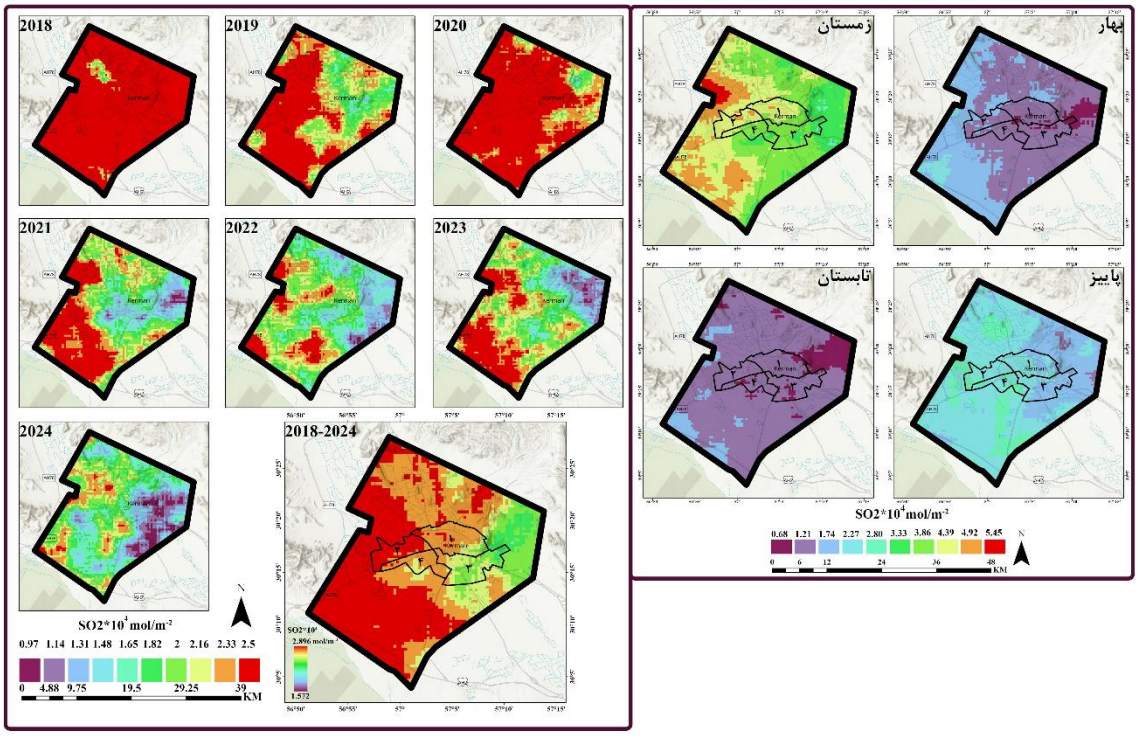
تحلیل فصلی داده‌ها نیز نشان می‌دهد که بیشترین مقادیر CO در فصل‌های بهار و تابستان مشاهده می‌شود. در فصل بهار، میانگین CO نسبت به میانگین سالانه بیشتر بوده و بیشترین مقادیر در بخش‌های شمال‌غربی و غرب شهر مشاهده می‌شود. در فصل تابستان نیز مقادیر CO همچنان بالاتر از میانگین سالانه بوده و بیشترین تمرکز آن در بخش‌های جنوبی، جنوب‌غربی و غرب شهر دیده می‌شود. در مقابل، در فصل‌های پاییز و زمستان مقادیر CO نسبت به فصل‌های گرم کاهش می‌یابد؛ در فصل پاییز، بیشترین مقادیر این آلاینده در بخش مرکزی شهر مشاهده می‌شود، و در فصل زمستان نیز اگرچه میزان CO نسبت به پاییز اندکی بیشتر است، اما تمرکز اصلی آن در بخش شمالی شهر قرار دارد. در نهایت، نقشه میانگین تجمیعی دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴، تمرکز بلندمدت CO را در مرکز شهر کرمان، به‌ویژه در محدوده میدان آزادی تا میدان شهدا، نشان می‌دهد(شکل ۸).



شکل۸. تغییرات فصلی و میانگین سالانه مونوکسید کربن

دی اکسید گوگرد (SO_2)

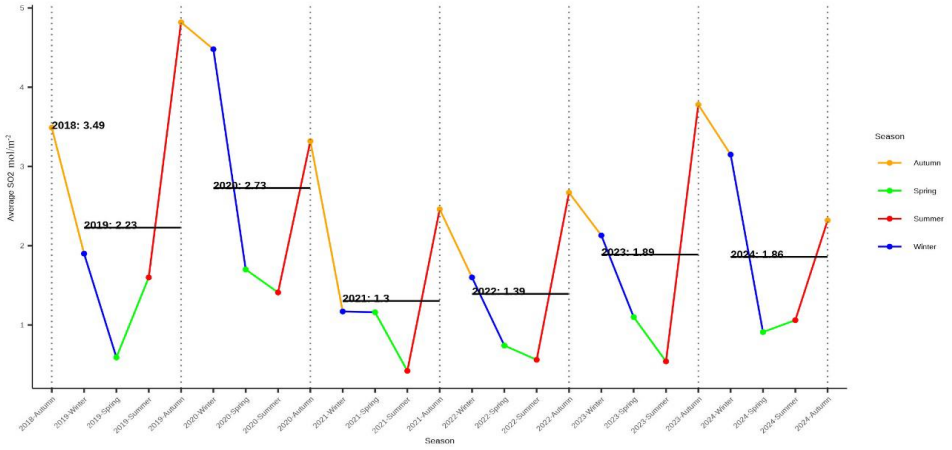
بررسی روند تغییرات تراکم ستون عمودی دی‌اکسید گوگرد (SO_2) در محدوده شهری کرمان طی بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴، بر اساس داده‌های سنجش‌ازدور ماهواره Sentinel-5P، نشان‌دهنده نوسانات قابل توجهی در توزیع فضایی و میزان این آلاینده است و روند معناداری از تغییرات سالانه و فصلی آن را نمایان می‌سازد (شکل ۹).



شکل۹. تغییرات فضایی و فصلی دی اکسید گوگرد در حریم شهر کرمان

بر اساس داده‌های Sentinel-5P، میانگین سالانه SO_2 در سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰ نسبتاً بالا بوده و گستره وسیعی از نواحی شهر را دربرگرفته است. از سال ۲۰۲۱، به‌ویژه در ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳، کاهش محسوسی در شدت و گستره SO_2 مشاهده شد؛ بااین‌حال، در ۲۰۲۴ مجدداً مقادیر بالاتر این آلاینده در بخش‌های غربی و شمال‌غربی شهر ظاهر شد. میانگین دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ نیز تمرکز بلندمدت SO_2 را عمدتاً در نواحی غربی، مرکزی و جنوبی نشان می‌دهد. محدوده سرچشمه در تمام سال‌ها، ماه‌ها و فصل‌ها بیشترین مقادیر SO_2 را داشته است و داده‌های TROPOMI نیز وجود مقادیر بالای این آلاینده را در حوالی سرچشمه و جنوب‌غرب استان کرمان تأیید می‌کند.

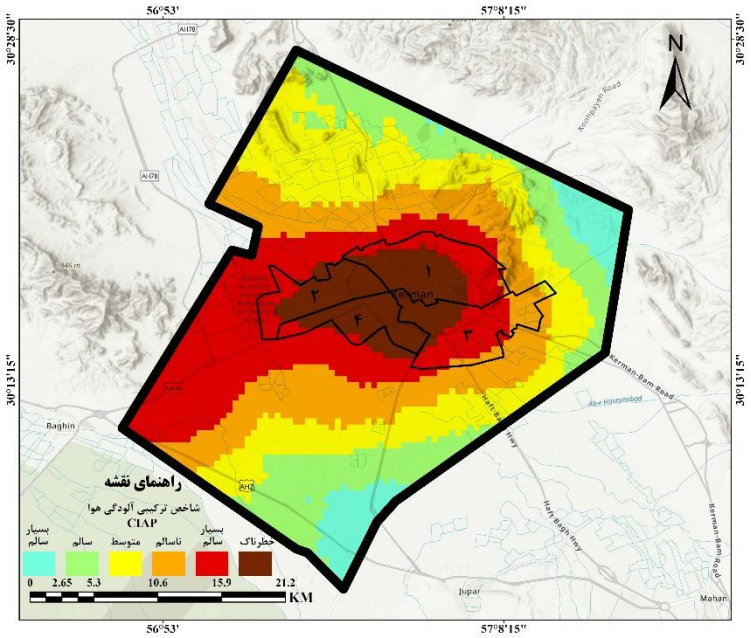
از نظر فصلی، بیشترین مقادیر SO_2 در زمستان و عمدتاً در مناطق مرکزی، غربی و شمال‌غربی شهر مشاهده شد؛ در حالی که در بهار و تابستان، میزان و گستره پراکنش آن کاهش یافت (شکل ۱۰). مقادیر بالاتر در غرب و شمال‌غرب در بیشتر دوره مطالعه مشاهده می‌شود، هرچند این الگو در تابستان ضعیف‌تر و در پاییز، به‌ویژه زمستان، بارزتر است. همچنین، تمرکز SO_2 در نواحی مرکزی شهر طی زمستان به‌وضوح افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰. تغییرات فصلی و میانگین سالانه دی اکسید گوگرد

شاخص ترکیبی آلودگی هوا (CIAP)

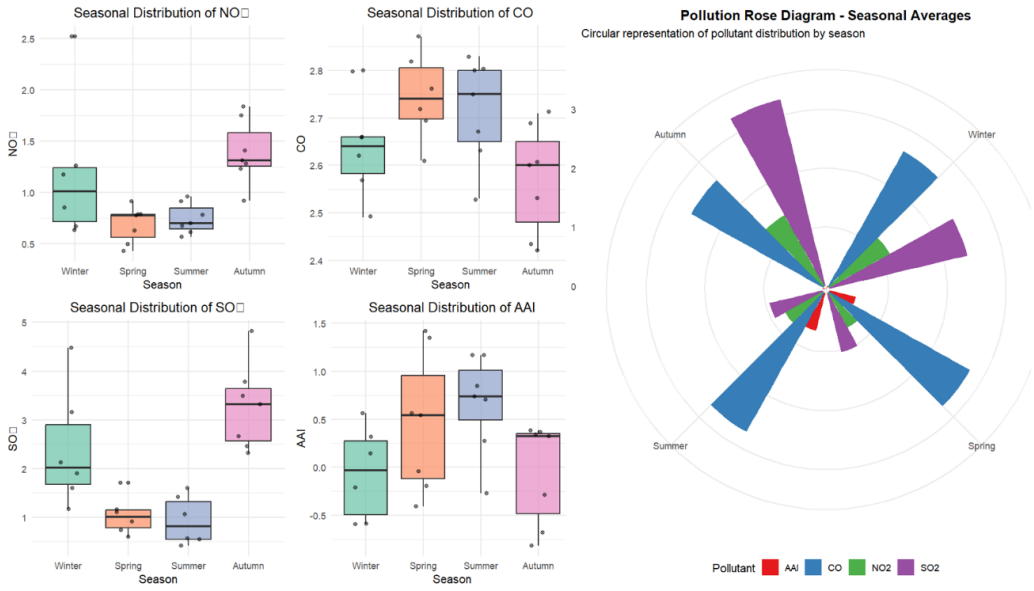
نقشه شاخص ترکیبی آلودگی هوا (CIAP) در محدوده شهر کرمان که بر پایه تجمیع چهار آلاینده شاخص شامل شاخص جذب آئروسل (AAI)، دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)، مونوکسید کربن (CO) و دی‌اکسید گوگرد (SO_2) ساخته شده، تصویری از وضعیت کلی کیفیت هوا در بازه زمانی میانگین ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ ارائه می‌دهد (شکل ۱۱). تحلیل فضایی این شاخص نشان‌دهنده تمرکز مقادیر بالاتر CIAP در نواحی مرکزی و شرقی شهر کرمان است که در نقشه به‌صورت طیف قرمز و نارنجی مشاهده می‌شود.



شکل ۱۱. شاخص ترکیبی آلودگی هوا در حریم شهر کرمان

ترکیب چهار آلاینده فوق، نمایی جامع از فشارهای زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های شهری، صنعتی و اقلیمی ارائه می‌دهد. با توجه به توزیع فضایی CIAP، بیشترین مقادیر این شاخص در مرکز شهر و کمترین مقادیر در حاشیه‌های شمال‌غربی و جنوب‌شرقی مشاهده می‌شود. داده‌های آماری شامل پنج شاخص NO_2، SO_2، CO، AAI (شکل ۱۲) و CIAP برای چهار منطقه شهری، با میانگین، حداقل، حداکثر و انحراف معیار (SD) در جدول ۱ گزارش شده‌اند. نتایج

نشان می‌دهد آلودگی هوا در مناطق مختلف شهر متفاوت است: بیشترین میانگین آلاینده‌ها عمدتاً در منطقه ۴ و کمترین مقادیر در منطقه ۳ مشاهده می‌شود. NO_2 و SO_2 نسبت به سایر آلاینده‌ها پراکندگی بیشتری دارند، در حالی که CO کمترین انحراف معیار و توزیع یکنواخت‌تری میان مناطق نشان می‌دهد. بررسی شاخص CIAP نیز تأیید می‌کند که منطقه ۴ بیشترین و منطقه ۳ کمترین مقدار این شاخص را دارد.



شکل۱۲. دیاگرام توزیع میانگین فصلی آلاینده ها برای شهر کرمان (2018-2024)

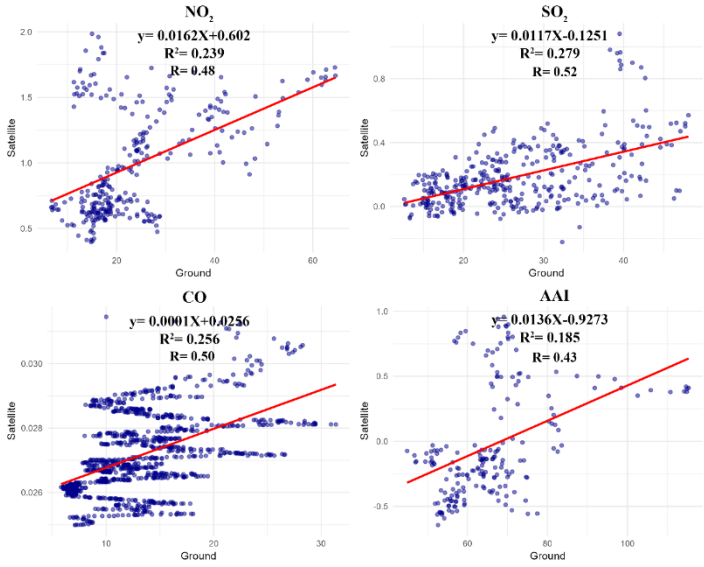
جدول ۱. تحلیل آماری آلاینده‌های جوی و شاخص ترکیبی آلودگی هوا (CIAP) در مناطق چهارگانه شهر کرمان بر اساس میانگین ۶ ساله طی دوره ۲۰۱۸–۲۰۲۴ (به تفکیک میانگین، انحراف معیار و حدود تغییرات)

آلاینده‌ها	مناطق	Mean	SD	Min	Max
NO2	۱	۱/۳۰۹	۰/۰۶۴	۱/۱۷۳	۱/۴۳۱
	۲	۱/۲۸۶	۰/۰۵۲	۱/۱۶۱	۱/۴۰۹
	۳	۱/۳۱۰	۰/۰۹۲	۱/۰۹۱	۱/۴۴۸
	۴	۱/۳۸۵	۰/۰۴۸	۱/۲۷۷	۱/۴۴۸
SO2	۱	۲/۰۸۴	۰/۱۱۲	۱/۷۵۸	۲/۳۲۴
	۲	۲/۳۰۳	۰/۰۷۹	۲/۰۸۸	۲/۵۷۰
	۳	۱/۸۷۶	۰/۱۱۶	۱/۵۷۳	۲/۱۴۳
	۴	۲/۱۰۳	۰/۰۸۱	۱/۸۷۹	۲/۲۷۲
AAI	۱	۰/۱۵۰	۰/۰۴۲	۰/۰۷۳	۰/۲۳۵
	۲	۰/۱۵۷	۰/۰۳۱	۰/۰۸۷	۰/۲۳۳
	۳	۰/۱۱۶	۰/۰۵۶	۰/۰۳۱	۰/۲۴۲
	۴	۰/۱۸۴	۰/۰۳۸	۰/۰۹۳	۰/۲۴۱
CO	۱	۲/۶۵۱	۰/۰۰۹	۲/۶۲۹	۲/۶۶۸
	۲	۲/۶۴۰	۰/۰۱۷	۲/۶۰۶	۲/۶۶۷
	۳	۲/۶۳۹	۰/۰۱۷	۲/۵۹۵	۲/۶۶۹
	۴	۲/۶۵۵	۰/۰۱۱	۲/۶۲۴	۲/۶۷۰

CIAP	۱	۰/۷۲۰	۰/۰۶۵	۰/۵۶۷	۰/۸۴۲
	۲	۰/۷۴۱	۰/۰۴۷	۰/۶۵۲	۰/۸۴۵
	۳	۰/۶۴۷	۰/۰۹۹	۰/۴۳۵	۰/۸۴۷
	۴	۰/۷۷۳	۰/۰۵۱	۰/۶۵۳	۰/۸۵۱

اعتبارسنجی داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-5P

با توجه به ماهیت پژوهش، تحلیل‌های اصلی مستقل از نتایج اعتبارسنجی و بر اساس داده‌های Sentinel-5P انجام شد و اعتبارسنجی صرفاً برای ارزیابی همخوانی نسبی داده‌های ماهواره‌ای با مشاهدات زمینی به‌کار رفت. شکل ۱۳ روابط همبستگی NO_2، SO_2، CO و AAI را بین داده‌های ماهواره‌ای و مشاهدات زمینی، به‌صورت نمودارهای پراکنش و رگرسیون خطی، نشان می‌دهد. داده‌های زمینی از ایستگاه میدان مشتاق کرمان و وب‌سایت AQICN استخراج شدند و برای هر پارامتر، معادله خط، R و R^2 گزارش شده است. بیشترین همبستگی مربوط به SO_2 با $R = 0.52$، پس از آن CO با $R = 0.50$ و NO_2 با $R = 0.48$ بود؛ کمترین همبستگی نیز برای AAI با $R = 0.43$ به‌دست آمد.

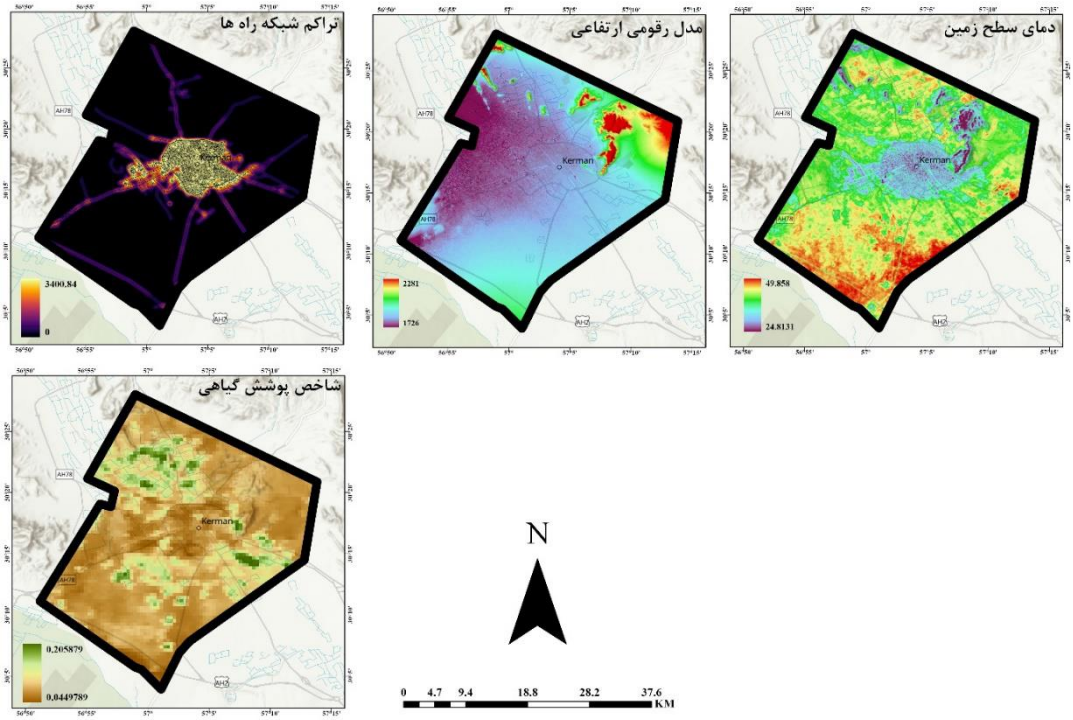


شکل ۱۳. روابط همبستگی بین داده‌های آلاینده‌های NO_2، SO_2، CO و AAI حاصل از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-5P با داده‌های زمینی ایستگاه میدان مشتاق کرمان (۲۰۱۸-۲۰۲۴)

ارتباط آلاینده‌ها با عوامل محیطی و انسان ساخت

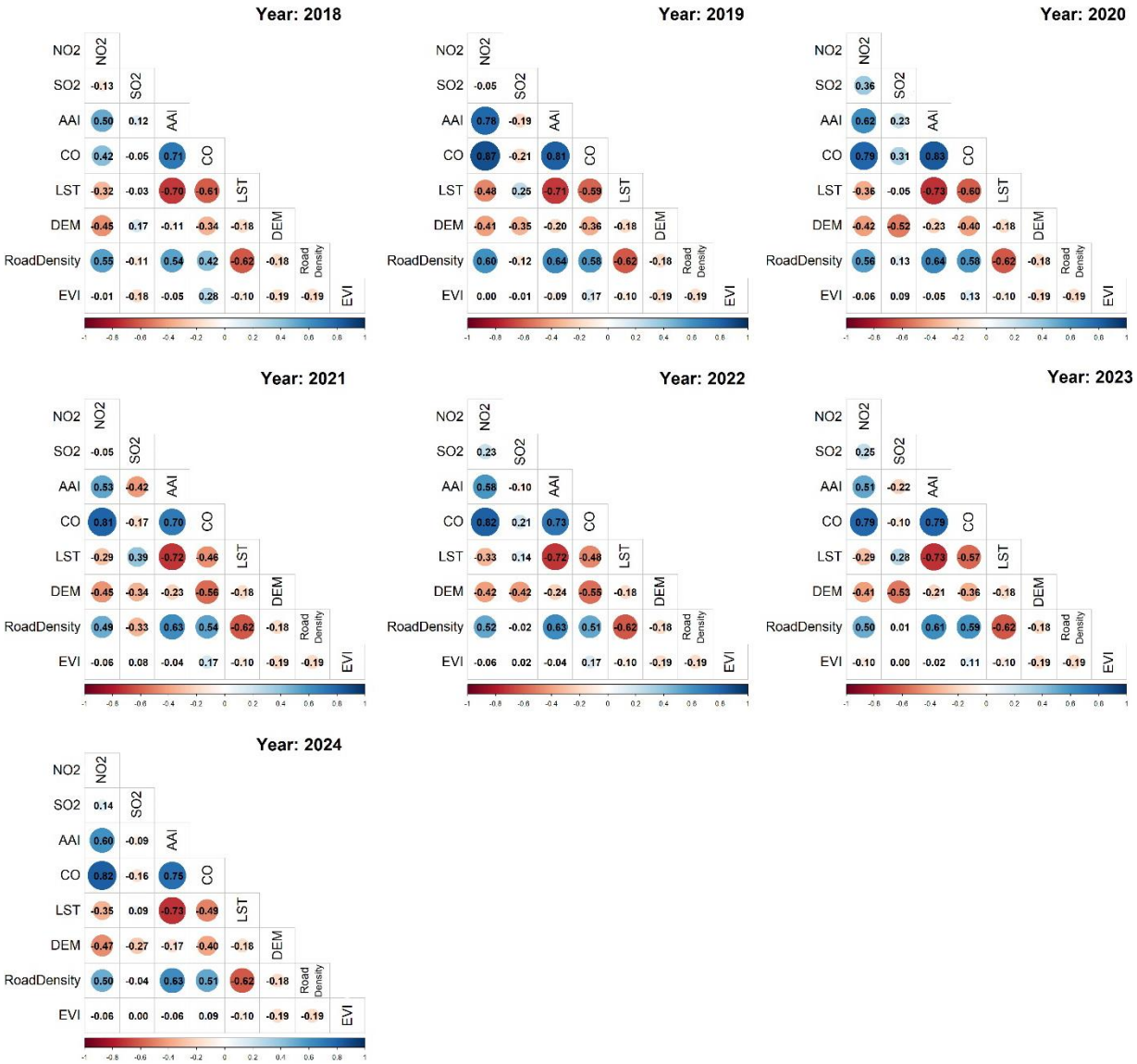
پراکنش و شدت آلاینده‌های جوی، حاصل تعامل پیچیده‌ای میان شرایط محیطی طبیعی و عوامل انسان‌ساخت است. مطالعات سنجش از دور با هدف شناسایی و تحلیل الگوهای فضایی و زمانی آلودگی هوا، امکان بررسی هم‌زمان این عوامل را فراهم می‌سازند. برای نمونه، ارتباط میان آلودگی هوا و دمای هوا که خود نیز از داده‌های سنجش از دور قابل استخراج است، مورد توجه قرار دارد (Fuladlu & Altan, 2021)؛ همچنین ارتفاع (Kaplan & Yigit Avdan, 2020) و حرکت توده‌های هوایی (Maurya et al., 2022) نیز از دیگر عوامل مؤثر هستند. در میان عوامل انسان‌ساخت، چگالی جمعیت و روشنایی مصنوعی شبانه (که هر دو از طریق داده‌های سنجش از دور قابل اندازه‌گیری‌اند) معمولاً مطرح می‌شوند، همچنین عواملی نظیر تولید ناخالص داخلی (GDP)، تولید ناخالص صنعتی و سهم آن، سطح شهرنشینی، میزان مصرف برق، مصرف کل انرژی، تعداد وسایل نقلیه و موارد مشابه (Zheng et al., 2019). به همین جهت در این مطالعه متغیرهایی نظیر دمای

سطح زمین (LST)، پوشش گیاهی (EVI)، ارتفاع از سطح دریا (DEM)، تراکم شبکه راه‌ها و سکونتگاه‌ها (با استفاده از روش تراکم کرنل) به عنوان شاخص‌های تأثیرگذار انتخاب شدند (شکل ۱۴).



شکل ۱۴. متغیرهای دمای سطح زمین (LST)، پوشش گیاهی (EVI)، ارتفاع از سطح دریا (DEM)، تراکم شبکه راه‌ها و سکونتگاه‌ها جهت بررسی ارتباط این عوامل با آلاینده‌های هوا

بررسی ماتریس‌های همبستگی سالانه آلاینده‌های جوی و متغیرهای محیطی و انسان‌ساخت طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴، ثبات نسبی الگوهای ارتباطی همراه با نوساناتی در شدت همبستگی‌ها را نشان می‌دهد (شکل ۱۵). ارتفاع (DEM) در اغلب سال‌ها رابطه‌ای منفی با غلظت آلاینده‌ها داشته است، در حالی که تراکم راه‌ها (Road Density) همبستگی مثبت نسبتاً پایداری با NO_2، CO و AAI، به‌ویژه در سال‌های ۲۰۱۹، ۲۰۲۱ و ۲۰۲۴، نشان داده است. LST نیز در بیشتر سال‌ها با CO و AAI همبستگی منفی و با SO_2 رابطه مثبت داشته است. شاخص پوشش گیاهی (EVI) نیز در اکثر سال‌ها همبستگی منفی ضعیفی با آلاینده‌هایی مانند CO، SO_2 و AAI نشان می‌دهد.



شکل ۱۵. نمودارهای همبستگی بین شاخص های آلودگی و عوامل طبیعی و انسان ساخت در حریم کرمان

جدول ۲ میزان همبستگی چهار آلاینده NO_2، SO_2، CO و AAI با یکدیگر و متغیرهای محیطی–انسانی طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ را نشان می‌دهد. بین آلاینده‌ها، بیشترین همبستگی مربوط به CO و AAI (۰٫۸۱) و پس از آن CO و NO_2 (۰٫۷۹) و NO_2 و AAI (۰٫۶۰) است. LST با تمامی آلاینده‌ها رابطه منفی دارد و این رابطه برای AAI (−۰٫۷۲) و CO (−۰٫۵۸) قوی‌تر است. همچنین DEM با همه آلاینده‌ها همبستگی منفی، به‌ویژه با CO (−۰٫۴۵) و NO_2 (−۰٫۴۴)، نشان می‌دهد. در میان عوامل انسانی، تراکم راه‌ها بیشترین همبستگی مثبت را با AAI (۰٫۶۲)، CO (۰٫۵۶) و NO_2 (۰٫۵۳) دارد. شاخص EVI نیز با بیشتر آلاینده‌ها رابطه ضعیف تا متوسط و عمدتاً منفی دارد؛ هرچند با CO همبستگی مثبت ضعیف (۰٫۱۸) مشاهده شد.

جدول ۲. ضرایب همبستگی پیرسون بین آلاینده‌های جوی و شاخص‌های محیطی و انسانی در حریم شهر کرمان (میانگین سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴)

	NO2	SO2	AAI	CO	LST	DEM	Road Density	EVI
NO2	۱	۰/۱۴	۰/۶	۰/۷۹	-۰/۳۵	-۰/۴۴	۰/۵۳	-۰/۰۶
SO2		۱	-۰/۱۸	-۰/۰۸	۰/۲۴	-۰/۴۶	-۰/۱۳	-۰/۰۳
AAI			۱	۰/۸۱	-۰/۷۲	-۰/۲	۰/۶۲	-۰/۰۵
CO				۱	-۰/۵۸	-۰/۴۵	۰/۵۶	۰/۱۸
LST					۱	-۰/۱۸	-۰/۶۲	-۰/۱
DEM						۱	-۰/۱۸	-۰/۱۹
Road Density							۱	-۰/۱۹
EVI								۱

بحث

نتایج نشان داد مقادیر پایین AAI در سال‌های ابتدایی مطالعه احتمالاً ناشی از شرایط اقلیمی پایدار، بارندگی مناسب و منابع محدود آئروسل بوده است، درحالی‌که افزایش آن در سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ می‌تواند با افزایش فعالیت‌های انسانی، رشد جمعیت، ترافیک و گردوغبار مرتبط باشد. بیشترین AAI در بهار و تابستان و کمترین مقادیر در پاییز و زمستان مشاهده شد. تمرکز آن در مرکز و حاشیه شهر نیز با فعالیت‌های شهری همخوانی داشت. بااین‌حال، AAI شاخصی کیفی است و غلظت مستقیم ذرات معلق را نشان نمی‌دهد. غلظت NO_2 طی سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۴ افزایش یافت که می‌تواند با رشد جمعیت، تردد خودروها، توسعه صنعتی و مصرف سوخت‌های فسیلی مرتبط باشد. شرایطی مانند سکون هوا و کم‌بارشی نیز موجب ماندگاری آلاینده‌ها می‌شوند. کاهش NO_2 در بهار و تابستان احتمالاً با افزایش دما و اختلاط جوی و افزایش آن در پاییز و زمستان با وارونگی دما و کاهش تهویه مرتبط است. تمرکز NO_2 در مرکز، غرب و جنوب‌غرب شهر نیز با شبکه حمل‌ونقل و فعالیت‌های انسانی ارتباط دارد (زمانی و همکاران، ۱۳۹۸). افزایش CO در سال‌های ۲۰۲۱–۲۰۲۰ با افزایش فعالیت‌های شهری و تردد خودروها و کاهش آن در ۲۰۲۲ احتمالاً با کاهش فعالیت‌ها در دوره کووید–۱۹ مرتبط بوده است (Bauwens et al., 2020; Ghahremanloo et al., 2021). افزایش مجدد CO در سال‌های ۲۰۲۴–۲۰۲۳ با بازگشت فعالیت‌های شهری همزمان شد. الگوی فضایی و فصلی CO تحت تأثیر گردش جوی، انتقال دوربرد و ویژگی‌های سطح بیابانی قرار دارد (Landgraf et al., 2016; Seinfeld & Pandis, 2016; Veefkind et al., 2012; Buchwitz et al., 2005). بنابراین، افزایش CO الزاماً به معنای افزایش انتشار محلی نیست. مقادیر بالای SO_2 در سال‌های ۲۰۲۰–۲۰۱۸ احتمالاً با فعالیت‌های صنعتی، ترافیک و شرایط جوی مرتبط بوده و افزایش نسبی آن در ۲۰۲۴ نیز می‌تواند ناشی از تغییر شرایط جوی یا افزایش فعالیت‌های صنعتی و گرمایشی باشد. مجتمع مس سرچشمه، در حدود ۵۰ کیلومتری جنوب‌غرب کرمان، از منابع مهم منطقه‌ای SO_2 محسوب می‌شود (امیرتیموری، ۱۳۹۲؛ کرمی و دهقانی، ۱۳۹۸). بادهای غالب پاییز و زمستان می‌توانند در انتقال این آلاینده به سمت کرمان نقش داشته باشند (زمانی و همکاران، ۱۳۹۸). با توجه به اجرا نشدن مدل انتقال جو، تعیین سهم دقیق منابع نیازمند مطالعات تکمیلی است.

ترکیب AAI، NO_2، CO و SO_2 در شاخص CIAP امکان ارزیابی یکپارچه‌تر آلودگی را فراهم کرد. بیشترین تمرکز CIAP در مناطق مرکزی شهر با تراکم ترافیک، مصرف سوخت فسیلی، ساخت‌وساز و محدودیت تهویه مرتبط بود. منطقه ۴ بیشترین و منطقه ۳ کمترین فشار تجمعی را نشان دادند. پراکندگی بیشتر NO_2 و SO_2 نسبت به CO بیانگر تأثیر بیشتر منابع موضعی بر این آلاینده‌ها و یکنواختی نسبی CO نشان‌دهنده نقش منابع گسترده‌تر مانند حمل‌ونقل است. مدیریت کیفیت هوا نیازمند توجه هم‌زمان به منابع صنعتی، حمل‌ونقل و عوامل مدیریتی است (تقی‌زاده دیوا و همکاران، ۱۴۰۳).

داده‌های Sentinel-5P برای همه آلاینده‌ها همبستگی مثبت با داده‌های زمینی نشان دادند. بیشترین همبستگی مربوط به SO_2 و همبستگی CO و NO_2 در حد متوسط بود. همبستگی پایین‌تر AAI نیز به ماهیت کیفی این شاخص مربوط می‌شود. ضرایب همبستگی ۰,۴۳ تا ۰,۵۲ نشان دادند که داده‌های Sentinel-5P برای بررسی روندهای منطقه‌ای و زمانی مناسب‌اند، اما برای برآورد دقیق محلی باید با داده‌های زمینی و هواشناسی تلفیق شوند. بررسی LST نشان داد این متغیر با شهرنشینی و فعالیت‌های انسان‌ساخت ارتباط دارد و می‌تواند از طریق تأثیر بر پایداری و اختلاط جوی بر آلودگی اثر بگذارد (Grimm et al., 2008; Fuladlu & Altan, 2021; Taha et al., 1992; Bala et al., 2024; Voogt & Oke, 2003). رابطه منفی ارتفاع با آلاینده‌ها بیانگر تهویه بهتر در مناطق مرتفع و همبستگی مثبت تراکم راه‌ها با NO_2، CO و AAI نشان‌دهنده نقش حمل‌ونقل است. رابطه منفی پوشش گیاهی با اغلب آلاینده‌ها نیز نقش تعدیل‌کننده آن را تأیید کرد. همبستگی بالای CO با NO_2 و AAI احتمال وجود منابع مشترک انتشار، به‌ویژه ترافیک و احتراق، را نشان می‌دهد.

در مجموع، نتایج بیانگر تشدید و گسترش آلودگی هوا در کرمان تحت تأثیر هم‌زمان خشکی، پوشش گیاهی کم، باد، فعالیت‌های صنعتی و معدنی و حمل‌ونقل است (حیدری و همکاران، ۱۳۹۶؛ تهرودی و همکاران، ۱۳۸۹). تمرکز بیشتر آلاینده‌ها در مناطق مرکزی، شمال‌غربی و شرقی شهر با نتایج حسن پور[1] و همکاران (۲۰۱۹) همخوانی دارد. همچنین ارتباط مثبت NO_2، CO و SO_2 با تراکم راه‌ها و رابطه معکوس آن‌ها با پوشش گیاهی با مطالعات یوسف پور[2] و همکاران (۲۰۲۴) و منصوری[3] و همکاران (۲۰۱۳) و یافته‌های تقی‌زاده دیوا و همکاران (۱۴۰۳) سازگار است. اعتبارسنجی نشان داد مدل‌های خطی توان محدودی در تبیین تغییرات آلاینده‌ها دارند (R^2=0.185–0.279) که با محدودیت‌های تفکیک فضایی و زمانی سنجش از دور گزارش‌شده توسط ورهولست[4] و همکاران (۲۰۲۱) همخوانی دارد. بنابراین، استفاده از مدل‌های غیرخطی و روش‌های یادگیری ماشین می‌تواند دقت تحلیل و برآورد آلودگی را افزایش دهد.

نتیجه‌گیری

تحلیل داده‌های فصلی آلودگی هوای کرمان طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ نشان داد که بیشتر آلاینده‌ها الگوهای فصلی معنی‌داری دارند. پاییز و زمستان بالاترین سطوح آلودگی را نشان دادند که احتمالاً ناشی از وارونگی دما، کاهش اختلاط جوی و افزایش مصرف انرژی است. شاخص جذب آئروسل (AAI) نیز همبستگی قوی با SO_2 و NO_2 داشت که بیانگر نقش این آلاینده‌های گازی در تشکیل ذرات ثانویه و ضرورت کنترل هم‌زمان انتشار آن‌هاست. سال ۲۰۲۲ بالاترین سطح کلی آلودگی را ثبت کرد که احتمالاً با شرایط نامطلوب هواشناسی یا افزایش مصرف انرژی مرتبط بوده و نیازمند بررسی بیشتر است. همچنین، CO در فصول گرم، به‌ویژه تابستان، افزایش یافت که می‌تواند ناشی از افزایش ارتفاع لایه مرزی، انتقال دوربرد آلاینده‌ها و حساسیت داده‌های Sentinel-5P به سطوح روشن و گردوغبار بیابانی باشد و لزوماً بیانگر افزایش منابع محلی نیست.

شاخص آلودگی ترکیبی (CIAP) با وجود نوسانات فصلی، روند افزایشی داشت که با رشد جمعیت، شهرنشینی، گسترش صنعتی و تغییرات اقلیمی مرتبط است. در مجموع، آلودگی هوای کرمان حاصل برهم‌کنش عوامل طبیعی، اقلیمی، صنعتی و انسانی است و شرایط اقلیمی، گسترش شهری، تراکم زیرساخت‌ها و کاهش پوشش گیاهی در افزایش آن نقش دارند.

1 Hassanpour
2 Yousofpour
3 Mansouri
4 Verhoelst

محدودیت مدل‌های خطی نیز ضرورت استفاده از روش‌های داده‌محور و مدل‌سازی پیشرفته‌تر را نشان می‌دهد. بنابراین، مدیریت آلودگی هوا در کرمان نیازمند رویکردی جامع و میان‌رشته‌ای، شامل توسعه حمل‌ونقل پاک، کنترل انتشار صنایع، احیای پوشش گیاهی و بازنگری در الگوهای توسعه شهری است. روند کلی افزایش آلودگی، ضرورت اقدامات هماهنگ برای مدیریت انتشار آلاینده‌ها، آسیب‌پذیری‌های فصلی و روندهای بلندمدت را نشان می‌دهد.

حامی مالی

این اثر حامی مالی ندارد.

سهم نویسندگان در پژوهش

ع. راشکی ایده‌پردازی، طراحی روش‌شناسی، تحلیل داده‌های ماهواره‌ای، ویرایش نهایی و نظارت بر اجرای پژوهش را بر عهده داشتند.

س. طالقانی نگارش پیش‌نویس مقاله، دریافت و مدیریت داده‌ها، اعتبارسنجی یافته‌ها، پیاده‌سازی کدهای پردازش تصاویر ماهواره‌ای و تهیه نقشه‌ها را بر عهده داشتند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه‌کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به‌ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقالات را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

اسدی، مهدی؛ حاجی محمدی، حسن و کرمی، مختار . (۱۴۰۳). کاربرد شاخص‌های ناپایداری در پایش طوفان‌های تندری در استان کرمان. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*، ۱۴(۲)، ۴۷-۶۰. doi: 10.30488/gps.2021.143529.2855

امیرتیموری، سمیه. (۱۳۹۲). *بررسی تأثیر آلودگی هوا ناشی از فعالیت مجتمع مس سرچشمه بر بخش کشاورزی منطقه و برآورد میزان بهینه اجتماعی آن*. پایان نامه دکتری تخصصی مهندسی کشاورزی، به راهنمایی صادق خلیلیان و مشاوره حمید امیرنژاد و علی محبی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

تقی‌زاده دیوا، سیدعلی؛ سلمان ماهینی، عبدالرسول و فلاح لاجیمی، حمیدرضا . (۱۴۰۳). مدل‌سازی پیشران‌های ایجادکننده آلودگی هوا در شهر تهران. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*، ۱۴(۱)، ۱۵۱-۱۶۳. doi: 10.30488/gps.2023.406594.3662

حبیبی، معصومه؛ ارشادی، طراوت و امیرسلیمانی، مینو. (۱۳۹۱). راهبرد مدیریت تراکم شهری و نقش آن در کاهش آلودگی هوای شهر. *همایش ملی جریان و آلودگی هوا، تهران*.

حسن‌زاده، رضا. (۱۳۸۵). *بررسی شرایط و مسائل زمین شناسی شهری کرمان با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)*. پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی، به راهنمایی احمد عباس‌نژاد، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

حسن‌زاده، نازنین؛ حسن زاده، رضا؛ حسینجانی زاده، مهدیه و هنرمند، مهدی. (۱۴۰۲). بررسی میزان تغییرات غلظت گازهای دی اکسید سولفور و دی اکسید نیتروژن موجود در هوای مناطق صنعتی با استفاده از سنجش ازدور و GIS- مطالعه موردی: کارخانه ذوب مس خاتون آباد، استان کرمان. *فصلنامه اطلاعات جغرافیایی «سپهر»*، ۳۲(۱۲۵)، ۷-۲۷. doi: 10.22131/sepehr.2023.559597.2896

حیدری، محسن؛ حیدری نژاد، ضحی؛ علیپور، ولی؛ دیندارلو، کاووس؛ رحمانیان، امید؛ گودرزی، بابک و موسی پور، حسن. (۱۳۹۶). ارزیابی کیفیت هوا بر اساس شاخص کیفیت هوا در شهر کرمان در سال ۱۳۹۴. *پژوهش در بهداشت محیط*، ۳(۳)، ۲۰۸-۲۱۸.

زمانی، سمیرا؛ محمودآبادی، مجید؛ یزدان پناه، نجمه و فرپور، محمدهادی. (۱۳۹۸). تحلیل فرسایندگی بادهای ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمان با استفاده از گل‌باد، گل‌طوفان و گل‌ماسه. *مجله مدیریت خاک و تولید پایدار*، ۹(۲)، ۲۳-۴۳. doi: 10.22069/ejsms.2019.14813.1810

زینالی، بتول؛ ملانوری، الهام و صفری، شیوا. (۱۴۰۲). تحلیل زمانی و فضایی آلایندهای هوا در استان آذربایجان شرقی. *جغرافیای طبیعی*، ۱۵(۶۲)، ۸۹-۱۰۴.

کرمی، محمد و دهقانی، محسن. (۱۳۹۸). ارزیابی اثرات زیست محیطی مجتمع مس سرچشمه با استفاده از روش ارزیابی پیامد با رویکرد ریسک. *پنجمین همایش بین المللی مهندسی کشاورزی و محیط زیست با رویکرد توسعه پایدار، شیراز.*

محمدی تهرودی، مژده؛ افشار پور، مهدی؛ کاظمی تبار، سید محسن و نظری، نجمه. (۱۳۸۹). بررسی آلاینده های اصلی هوای ناشی از فعالیت صنایع مختلف در استان کرمان. *سیزدهمین همایش ملی بهداشت محیط کرمان.*

ناجی، محمد؛ عزیزی، قاسم و کریمی، مصطفی. (۱۴۰۴). تغییرات زمانی و پراکنش فضایی شاخص ذرات معلق در دامنه جنوبی البرز مرکزی بر پایه داده‌های ماهواره‌ای. *پژوهش های جغرافیای طبیعی*، ۵۷(۲)، ۱-۱۸. doi: 10.22059/jphgr.2024.383803.1007845

References

Abbasnejad, A., & Abbasnejad, B. (2019). Distribution, sources and pollution status of Pb in indoor and outdoor dusts of Kerman City, SE Iran. *Environmental Forensics, 20*(1), 106–119. https://doi.org/10.1080/15275922.2019.1566289

Amirteimouri, S. (2013). *Investigation of the impact of air pollution caused by the Sarcheshmeh Copper Complex on the agricultural sector of the region and estimation of its socially optimal level* [Master's thesis, Tarbiat Modares University]. [In Persian]

Asadi, M., Hajimohammadi, H., & Karami, M. (2024). Application of instability indices in monitoring thunderstorm events in Kerman Province. *Journal of Spatial Planning Geography, 14*(2), 47–60. https://doi.org/10.30488/gps.2021.143529.2855 [In Persian]

Bala, R., Yadav, V. P., Kumar, D. N., & Prasad, R. (2024). Exploring the relationship of land surface parameters and air pollutants with land surface temperature in different cities using satellite data. *Advances in Space Research, 74*(7), 2958–2975. https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.06.031

Bauwens, M., Compernolle, S., Stavrakou, T., Müller, J. F., van Gent, J., Eskes, H., Levelt, P. F., van der A, R., Veefkind, J. P., Vlietinck, J., Yu, H., & Zehner, C. (2020). Impact of coronavirus outbreak on NO_2 pollution assessed using TROPOMI and OMI observations. *Geophysical Research Letters, 47*(11), e2020GL087978. https://doi.org/10.1029/2020GL087978

Botkin, D. B., & Keller, E. A. (2012). *Environmental science*. Wiley.

Buchwitz, M., De Beek, R., Noël, S., Burrows, J. P., Bovensmann, H., Bremer, H., Heimann, M., et al. (2005). Carbon monoxide, methane and carbon dioxide columns retrieved from SCIAMACHY by WFM-DOAS: Year 2003 initial data set. *Atmospheric Chemistry and Physics, 5*(12), 3313–3329. https://doi.org/10.5194/acp-5-3313-2005

Fuladlu, K., & Altan, H. (2021). Examining land surface temperature and relations with the major air pollutants: A remote sensing research in case of Tehran. *Urban Climate, 39*, 100958. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100958

Fuladlu, K., & Altan, H. (2022). Examination of the population density impact on major air pollutants: A study in the case of Germany. In *Innovating strategies and solutions for urban performance and regeneration*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-98187-7_16

Ghahremanloo, M., Lops, Y., Choi, Y., & Mousavinezhad, S. (2021). Impact of the COVID-19 outbreak on air pollution levels in East Asia. *Science of the Total Environment, 754*, 142226. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142226

Gharibi, S., & Shayesteh, K. (2021). Application of Sentinel-5 satellite imagery in identifying air pollutant hotspots in Iran. *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards, 8*(3), 123. https://doi.org/10.52547/jsaeh.8.3.123 [In Persian]

Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. M. (2008). Global change and the ecology of cities. *Science, 319*(5864), 756–760. https://doi.org/10.1126/science.1150195

Grzywa-Celińska, A., Krusiński, A., & Milanowski, J. (2020). "Smoging kills": Effects of air pollution on the human respiratory system. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine, 27*(1), 1–5. https://doi.org/10.26444/aaem/110477

Habibi, M., Arshadi, T., & Amirsoleimani, M. (2012). Urban density management strategy and its role in reducing urban air pollution. *Proceedings of the National Conference on Air Flow and Air Pollution*, Tehran, Iran. [In Persian]

Hassanpour Matikolaei, S. A. H., Jamshidi, H., & Samimi, A. (2019). Characterizing the effect of traffic density on ambient CO, NO_2, and $PM_{2.5}$ in Tehran, Iran: An hourly land-use regression model. *Transportation Letters, 11*(8), 436–446. https://doi.org/10.1080/19427867.2017.1385201

Hassanzadeh, N., Hassanzadeh, R., Hosseinjani Zadeh, M., & Honarmand, M. (2023). Investigation of sulfur dioxide and nitrogen dioxide concentration changes in industrial areas using remote sensing and GIS: A case study of the Khatunabad Copper Smelter, Kerman Province. *Sepehr, 32*(125), 7–27. https://doi.org/10.22131/sepehr.2023.559597.2896 [In Persian]

Hassanzadeh, R. (2006). *Investigation of urban geological conditions and issues in Kerman using a geographic information system (GIS)* [Master's thesis, Shahid Bahonar University of Kerman]. [In Persian]

Heidari, M., Heidarinejad, Z., Alipour, V., Dindarloo, K., Rahmanian, O., Goodarzi, B., & Mousapour, H. (2017). Evaluation of air quality based on the Air Quality Index in Kerman City in 2015. *Journal of Research in Environmental Health, 3*(3), 208–218. https://doi.org/10.22038/jreh.2018.26051.1173 [In Persian]

Heidarinejad, Z., Kavosi, A., Mousapour, H., Daryabor, M. R., Radfard, M., & Abdolshahi, A. (2018). Data on evaluation of AQI for different season in Kerman, Iran, 2015. *Data in Brief, 20*, 1917–1923. https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.08.216

Kaplan, G., & Yigit Avdan, Z. (2020). Space-borne air pollution observation from Sentinel-5P TROPOMI: Relationship between pollutants, geographical and demographic data. *International Journal of Engineering and Geosciences, 5*(3), 130–137. https://doi.org/10.26833/ijeg.644089

Karami, M., & Dehghani, M. (2019). Environmental impact assessment of the Sarcheshmeh Copper Complex using the impact assessment method with a risk approach. *Proceedings of the Fifth International Conference on Agricultural Engineering and Environment with a Sustainable Development Approach*, Shiraz, Iran. [In Persian]

Kazeminiya, A. (2017). Zoning of vulnerability of Kerman City buildings against earthquakes using GIS. *Geospatial Engineering Journal, 8*(3), 31–47. [In Persian]

Kooreman, M. L., de Graaf, M., Stammes, P., et al. (2020). Effects of clouds on the UV absorbing aerosol index from TROPOMI. *Atmospheric Measurement Techniques, 13*, 6407–6422. https://doi.org/10.5194/amt-13-6407-2020

Landgraf, J., aan de Brugh, J., Scheepmaker, R., Borsdorff, T., Hu, H., Houweling, S., ... & Hasekamp, O. (2016). Carbon monoxide total column retrievals from TROPOMI shortwave infrared measurements. *Atmospheric Measurement Techniques, 9*(10), 4955–4975. https://doi.org/10.5194/amt-9-4955-2016

Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D., & Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature, 525*(7569), 367–371. https://doi.org/10.1038/nature15371

Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: A review. *Frontiers in Public Health, 8*, 14. https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014

Mansouri, B., & Hamidian, A. H. (2013). Assessment of the air quality of Isfahan City, Iran, using selected air quality parameters. *Iranian Journal of Toxicology, 7*(21), 842–848.

Maurya, N. K., Pandey, P. C., Sarkar, S., Kumar, R., & Srivastava, P. K. (2022). Spatio-temporal monitoring of atmospheric pollutants using Earth observation Sentinel-5P TROPOMI data: Impact of stubble burning—A case study. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 11*(5), 301. https://doi.org/10.3390/ijgi11050301

Mohammadi Tehrudi, M., Afshar Pour, M., Kazemi Tabar, S. M., & Nazari, N. (2010).

Investigation of major air pollutants emitted from various industries in Kerman Province. *Proceedings of the 13th National Conference on Environmental Health*, Kerman, Iran. [In Persian]

Naji, M., Azizi, Q., & Karimi, M. (2025). Temporal changes and spatial distribution of the particulate matter index on the southern slopes of the Central Alborz based on satellite data. *Physical Geography Research, 57*(2), 1–18. https://doi.org/10.22059/jphgr.2024.383803.1007845 [In Persian]

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Shikwambana, L., Mhangara, P., & Mbatha, N. (2020). Trend analysis and first-time observations of sulfur dioxide and nitrogen dioxide in South Africa using TROPOMI/Sentinel-5P data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 91*, 102130. https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102130

Tabunschik, V., Gorbunov, R., & Gorbunova, T. (2023). Unveiling air pollution in Crimean mountain rivers: Analysis of Sentinel-5 satellite images using Google Earth Engine (GEE). *Remote Sensing, 15*(13), 3364. https://doi.org/10.3390/rs15133364

Tabunschik, V., Gorbunov, R., Bratanov, N., Gorbunova, T., Mirzoeva, N., & Voytsekhovskaya, V. (2023). Fatala River Basin (Republic of Guinea, Africa): Analysis of current state, air pollution, and anthropogenic impact using geoinformatics methods and remote sensing data. *Sustainability, 15*(22), 15798. https://doi.org/10.3390/su152215798

Tabunshchik, V., Nikiforova, A., Lineva, N., Drygval, P., Gorbunov, R., Gorbunova, T., Kerimov, I., Pham, C. N., Bratanov, N., & Kiseleva, M. (2024). The dynamics of air pollution in the southwestern part of the Caspian Sea Basin (based on the analysis of Sentinel-5 satellite data utilizing the Google Earth Engine cloud-computing platform). *Atmosphere, 15*(11), 1371. https://doi.org/10.3390/atmos15111371

Taghizadeh Diva, S. A., Salmanmahiny, A., & Fallah Lajimi, H. (2024). Modeling the driving forces of air pollution in Tehran. *Journal of Spatial Planning Geography, 14*(1), 151–163. https://doi.org/10.30488/gps.2023.406594.3662 [In Persian]

Taha, H., Sailor, D. J., & Akbari, H. (1992). *High-albedo materials for reducing building cooling energy use*.

Theys, N., De Smedt, I., Yu, H., Danckaert, T., van Gent, J., Hörmann, C., Wagner, T., Hedelt, P., Bauer, H., & Romahn, F. (2017). Sulfur dioxide retrievals from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor: Algorithm theoretical basis. *Atmospheric Measurement Techniques, 10*(1), 119–153. https://doi.org/10.5194/amt-10-119-2017

U.S. Environmental Protection Agency. (2014). *Air Quality Index (AQI): A guide to air quality and your health*. https://www.airnow.gov

Veefkind, J. P., Aben, I., McMullan, K., Förster, H., De Vries, J., Otter, G., et al. (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. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027

Verhoelst, T., Compernolle, S., Pinardi, G., Lambert, J. C., Eskes, H. J., Eichmann, K. U., ... Zehner, C. (2021). Ground-based validation of the Copernicus Sentinel-5P Tropomi NO_2 measurements with the Ndacc Zsl-Doas, Max-Doas and Pandonia global networks. *Atmospheric Measurement Techniques, 14*(1), 481–510. https://doi.org/10.5194/amt-14-481-2021

Vîrghileanu, M., Săvulescu, I., Mihai, B. A., Nistor, C., & Dobre, R. (2020). Nitrogen dioxide (NO_2) pollution monitoring with Sentinel-5P satellite imagery over Europe during the coronavirus pandemic outbreak. *Remote Sensing, 12*(21), 3575. https://doi.org/10.3390/rs12213575

Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment, 86*(3), 370–384. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8

Yousofpour, Y., Abolhassani, L., Hirabayashi, S., Burgess, D., Sabouni, M. S., & Daneshvarkakhki, M. (2024). Ecosystem services and economic values provided by urban park trees in the air polluted city of Mashhad. *Sustainable Cities and Society, 101*, 105110. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105110

Zamani, S., Mahmoudabadi, M., Yazdanpanah, N., & Farpour, M. (2019). Analysis of wind

erosivity at synoptic stations in Kerman Province using wind rose, storm rose, and sand rose. *Journal of Soil Management and Sustainable Production, 9*(2), 23–43. https://doi.org/10.22069/ejsms.2019.14813.181 [In Persian]

Zeinali, B., Mollanouri, E., & Safari, S. (2023). Spatial and temporal analysis of air pollutants in East Azerbaijan Province. *Physical Geography, 15*(62), 89–104. [In Persian]

Zheng, Z., Yang, Z., Wu, Z., & Marinello, F. (2019). Spatial variation of NO_2 and its impact factors in China: An application of Sentinel-5P products. *Remote Sensing, 11*(16), 1939. https://doi.org/10.3390/rs11161939