



<https://gep.ui.ac.ir/?lang=fa>

Geography and Environmental Planning

E-ISSN: 2252- 0910

Document Type: Research Paper

Vol. 37, Issue 1, No.101, 2026, pp. 67- 106

Received: 18/02/2026 Accepted: 15/06/2026

Increasing Contribution of Absorbing Aerosols and Stabilization of Dust Pollution Regime in Isfahan Province Based on Remote Sensing and Markov Chain Analysis

Alireza Yousefi Kabriya

Ph.D. in Agricultural Meteorology, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
alirezau3fikrbriya@gmail.com

Mehdi Nadi  *

Associate professor, Department of Water Engineering and Agricultural Meteorology, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
m.nadi@sanru.ac.ir

Bahareh Shamgani Mashhadi

Ph.D. candidate of Agro-Meteorology, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
bsh121808@gmail.com

Abstract

This study investigated the increasing trend, persistence, and spatiotemporal evolution of air pollution and dust aerosols in Isfahan Province over the period of 2020–2025 with particular emphasis on identifying intensification patterns and shifts in aerosol regimes. The spatial and temporal variations in air pollution were examined by using Aerosol Optical Depth (AOD) data from MODIS and the Absorbing Aerosol Index (AAI) derived from Sentinel-5 satellite observations. Analytical approaches included monthly and seasonal heatmaps, time series analysis, frequency distribution assessments, Kernel Density Estimation (KDE), and a Markov chain model to evaluate the stability and daily transition probabilities of pollution classes at the monitoring station of Isfahan. The results revealed that in 2020, AOD values ranged between 0.37 and 0.56; however, in critical areas—including the desiccated Gavkhouni Wetland, Isfahan City, and Khur County—values exceeded 0.96, indicating unhealthy to very unhealthy conditions. In 2021, pollution intensity escalated further with AOD levels reaching 0.72 to over 1.1 in these regions. Although a relative decline was observed during 2022–2025, the central and eastern parts of the province continued to experience unhealthy and very unhealthy conditions. Regarding AAI, a marked increase in absorbing aerosols was recorded in 2022 with values approaching 2.0

*Corresponding Author

Yousefi Kabriya, A. , Nadi, M. and Shamgani Mashhadi, B. (2026). Increasing Contribution of Absorbing Aerosols and Stabilization of Dust Pollution Regime in Isfahan Province Based on Remote Sensing and Markov Chain Analysis. *Geography and Environmental Planning*, 37 (1), 67 - 106 .



2252-0910 © University of Isfahan

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>).



10.22108/gep.2026.148394.1775

followed by a persistent high-pollution state. Notably, more than half of the days throughout the study period were classified as unhealthy or very unhealthy, underscoring the severity and continuity of the pollution episode. Statistically, AOD exhibited a bimodal distribution, whereas AAI displayed a broader distribution concentrated within the 0.5 to 1.5 range, reflecting the structural persistence of pollution and an increased frequency of extreme events. The annual mean AOD rose from 0.245 in 2020 to 0.305 in 2025, representing a 24% increase, while AAI escalated from near-zero values to approximately 1.4 over the same period. Markov chain analysis revealed that the "Moderate" class for AOD with a persistence probability of 66% constituted the most stable state, whereas the "Unhealthy" class for AAI with a 74% persistence probability emerged as the dominant state. The transition probability from Moderate to Unhealthy and Unhealthy to Very Unhealthy were estimated at about 25% and 10–15%, respectively. Overall, only 4–24% of days were classified as clean, while more than 75% of days fell within the Moderate to Very Unhealthy categories. These findings indicated the establishment of a persistent pollution regime in Isfahan Province characterized by a rising AOD baseline, a sharp AAI shift in 2022, and sustained elevated pollution levels. The concentration of pollution sources in the central and eastern regions—specifically the Gavkhouni Wetland, Isfahan City, and Khur County—underscored the need for air quality management strategies to transition toward structural and source-oriented control measures.

Keywords: Air pollution, Pollution Persistence, AOD and AAI Indices, Time-Series Analysis, Markov Chain Modeling.

Introduction

Dust storms represent critical natural phenomena in arid and semi-arid regions, exerting severe impacts on the environment, climate, human health, and economic activities. Although remote sensing has been extensively employed to monitor these storms and identify their source areas, the majority of previous research has remained confined to descriptive analyses of spatial and temporal trends. The present study addressed this gap by focusing on Isfahan Province, a region particularly vulnerable to dust events due to its geographical setting and climatic conditions. The primary objective of this research was to analyze the temporal dynamics of dust events through an integrated approach that combined remote sensing data—specifically Aerosol Optical Depth (AOD) and Absorbing Aerosol Index (AAI)—with Markov chain modeling. This innovative methodological framework enabled the quantitative assessment of transition probabilities among different air pollution levels, thereby offering valuable insights into the stochastic, time-dependent behavior of dust phenomena. By identifying critical hotspots and modeling the evolution of pollution states over time, this study sought to establish a quantitative foundation for a more comprehensive understanding of dust dynamics, ultimately supporting effective environmental management and informed decision-making in Isfahan Province.

Materials & Methods

Isfahan Province is situated in central Iran, extending between 30°30' to 34°42' N latitude and 49°36' to 55°32' E longitude. The province exhibited considerable topographical diversity, encompassing the Central Zagros mountain ranges in the west and southwest, alongside arid lowland plains—such as Varzaneh and the margins of the Isfahan-Yazd desert—in the central and eastern portions. The region experiences an arid to semi-arid climate with mean annual temperatures ranging from 16 to 18°C and average yearly precipitation of 100–150 mm. Water resources including the Zayandeh-Rud River and groundwater aquifers have substantially diminished in recent decades due to prolonged drought and excessive extraction. Concurrently, industrial expansion and population growth compounded by reduced water availability have exacerbated air pollution and contributed to the intensification of local dust events (Arvin, 2019). This study utilized remote sensing data spanning the period from 2020 to 2025 to analyze dust dynamics across Isfahan Province. The principal datasets comprised AOD derived from the MODIS sensor and the AAI obtained from the Sentinel-5P satellite. All data were processed at daily, monthly, and annual temporal scales using Google Earth Engine (GEE), a cloud-based geospatial analysis platform.

Remote Sensing Data Processing

GEE was employed to process MODIS and Sentinel-5P data products. For AOD estimation, MODIS data—specifically the Optical_Depth_047 band—were utilized to map spatiotemporal variations in particulate

matter concentrations. Sentinel-5P data (COPERNICUS/S5P/OFFL/AER_AI) were used to derive the AAI, which served as an indicator of the intensity and spatial distribution of absorbing aerosols. MODIS, aboard the Terra and Aqua satellites, provided multispectral imagery at spatial resolutions ranging from 250 m to 1000 m (Xiong et al., 2006).

Air Pollution Indices

- **AOD (Aerosol Optical Depth):** This index quantifies the extinction of solar radiation by atmospheric aerosols. MODIS-derived AOD data were employed to generate spatial distribution maps across the study area.
- **AAI (Absorbing Aerosol Index):** This index indicates the presence of UV-absorbing aerosols, such as mineral dust. AAI data from Sentinel-5P were utilized in a comparable manner to assess aerosol characteristics.
- **AQI (Air Quality Index):** As a standardized metric ranging from 0 to 500, the AQI is used to report daily air quality levels. Lower values correspond to cleaner air, whereas higher values indicate elevated health risks (Yousefi Kebriya & Nadi, 2025). The classification criteria for AQI, AOD, and AAI are presented in Table 1. Generally, AOD values exceeding 0.3 and AAI values above 0.5 signify unhealthy or hazardous conditions, while an AQI of greater than 100 indicates air that is unhealthy for sensitive groups (Yousefi Kebriya et al., 2025).

Markov Chain Model

In this study, a Markov chain model was employed to simulate transitions between different pollution states. This discrete-time stochastic model operates on the first-order Markov property, whereby the future state depends solely on the current state, independent of the full historical sequence. The approach involves the calculation of a transition probability matrix (P_{ij}), which estimates the likelihood of moving from one air quality class (i) to another (j) over a given time step (Stoner & Economou, 2020; Morton & Finkenstädt, 2005).

Initially, Google Earth Engine was utilized to map the spatial distribution of AOD and AAI across Isfahan Province. Subsequently, the Markov chain model was applied to analyze temporal trends, assess state stability, and predict transitions among different pollution categories. The integration of satellite-derived observations with Markov chain modeling provided a robust analytical framework for spatiotemporal air pollution assessment, thereby offering a scientific foundation for the development of management strategies aimed at controlling particulate matter in Isfahan Province.

Research Findings

Large portions of Isfahan and Khur counties remained classified within the unhealthy and very unhealthy categories, underscoring the chronic persistence of air pollution in these areas. In 2025, the spatial pattern of the AOD index was largely consistent with that of 2024; however, a further reduction in the extent of polluted zones was observed. During this year, Ardestan and Kashan were predominantly free of significant pollution, with only limited areas falling within the unhealthy range for sensitive groups. Isolated parts of Nain recorded unhealthy conditions with AOD values ranging from 0.38 to 0.58. Nevertheless, the central and eastern regions of the province—particularly Khur County and Isfahan City—continued to experience unhealthy and very unhealthy conditions with AOD values predominantly ranging between 0.56 and 0.87 and exceeding 0.87 in some areas. In 2023, the AAI index exhibited a decreasing trend; nonetheless, numerous cities remained in an unhealthy state. Extensive areas across the eastern, northern, central, and southern parts of the province recorded AAI values between 0.46 and 0.68, as well as above 0.68, confirming the relative persistence of pollution in known hotspots. This declining trend continued into 2024 with unhealthy zones shrinking to more localized patches. In that year, only parts of Isfahan City and the counties of Khur, Nain, Ardestan, and Aran va Bidgol remained in the unhealthy class with values exceeding 0.55, indicating a relative reduction in both the intensity and spatial extent of pollution. In 2025, the AAI index showed a slight increase compared to the previous year; yet, the overall extent of polluted zones continued to diminish. In parts of Aran va Bidgol, Ardestan, and Nain, index values ranged between 0.45 and 0.65, while in portions of Khur and Isfahan City, values exceeding 0.65 were recorded—higher than in other areas—continuing to identify these regions as the primary aerosol hotspots. Time series analysis of the AOD index revealed an upward trend, increasing from approximately 0.245 at the beginning of 2020 to about 0.305 by the end of 2025, which was equivalent to a 24% increase in mean aerosol concentration over the 6-year period. Analysis of the daily transition probability matrix for AAI pollution classes indicated that Unhealthy days exhibited the highest stability with a 74% probability of persistence followed by Very Unhealthy and Good classes, which showed persistence probabilities of 47% and 56%, respectively.

Discussion of Results & Conclusion

The findings indicated that the spatiotemporal variations in air pollution across the province arose from the simultaneous interaction of an increased overall particulate matter load and changes in the physicochemical properties of aerosols. The convergence of peak values in both indices during critical years—particularly in 2022—suggested that this period witnessed not only a rise in general particulate matter concentrations, but also intensification in the contribution of absorbing aerosols, such as mineral dust and anthropogenic combustion particles. However, the observed discrepancies between the two indices implied that a portion of the AOD fluctuations might be attributed to the accumulation of non-absorbing particles, stable atmospheric conditions, and humidity effects, whereas the AAI more specifically delineated active dust sources and combustion-related emissions. Although these indices were complementary in aerosol pollution assessment, they differed considerably in terms of the informational content they provided and their spatial resolution.

The Markovian stability analysis of this long-term distribution revealed that the majority of days in Isfahan were characterized by moderate to unhealthy pollution levels, with clean air being a rare occurrence. Conversely, critical days, though infrequent, exerted severe and abrupt impacts. Overall, the daily AOD pollution system in Isfahan exhibited relative stability within the moderately polluted and polluted classes with a natural tendency toward intensification of pollution. The marked decline in the probability of reverting to clean classes underscored the narrowing window of clean air episodes and the escalating chronic pressure on both public health and the environment. This analysis demonstrates that effective air quality management must prioritize the reduction of moderately polluted and unhealthy days, while also implementing measures to prevent transitions to the Very Unhealthy and Hazardous categories.

مقاله پژوهشی

افزایش سهم آئروسول‌های جذبی و تثبیت الگوی آلودگی گردوغبار در استان اصفهان بر پایه سنجش‌ازدور و زنجیره مارکوف

علیرضا یوسفی کبریا، دکتری هواشناسی کشاورزی، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران
alirezau3fikrbriya@gmail.com

مهدی نادی * , دانشیار هواشناسی کشاورزی، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
m.nadi@sanru.ac.ir

بهاره شامگانی‌مشهدی، دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران
bsh121808@gmail.com

چکیده

این مطالعه با هدف تحلیل افزایش و پایداری آلودگی هوا و گردوغبار و تغییر الگوهای زمانی - مکانی آن در استان اصفهان طی دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵، با تأکید بر شناسایی روندهای تشدید آلودگی و تغییر رژیم آئروسول‌ها انجام شد. تغییرات و پراکنش آلودگی با استفاده از شاخص AOD (MODIS) و AAI (Sentinel-5) تحلیل شد. تحلیل‌ها شامل نقشه‌های حرارتی ماهانه و فصلی، سری‌های زمانی، توزیع فراوانی، منحنی KDE و مدل زنجیره مارکوف برای ارزیابی پایداری و انتقال روزانه کلاس‌های آلودگی در ایستگاه اصفهان بود. نتایج نشان داد در سال ۲۰۲۰ مقادیر AOD در بازه ۰.۳۷ تا ۰.۵۶ قرار داشت و در نواحی بحرانی (تالاب گاوخونی، اصفهان، خور) مقادیر بیش از ۰.۹۶ مشاهده شد. در سال ۲۰۲۱ شدت آلودگی افزایش یافت و مقادیر در این مناطق به بازه ۰.۷۲ تا بیش از ۱.۱ رسید. در دوره ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۵، پهنه‌های مرکزی و شرقی همچنان ناسالم باقی ماندند. در شاخص AAI، افزایش شدیدی در ذرات جذبی در سال ۲۰۲۲ با مقادیر نزدیک به ۲ مشاهده شد و سپس وضعیت تثبیت شد؛ به‌طوری‌که بیش از نیمی از روزها در کلاس‌های ناسالم یا بسیار ناسالم قرار داشتند. از نظر آماری، AOD دارای توزیع دووجهی و AAI دارای توزیع پهن در بازه ۰.۵ تا ۱.۵ بود. میانگین سالانه AOD از ۰.۲۴۵ در ۲۰۲۰ به ۰.۳۰۵ در ۲۰۲۵ (افزایش ۲۴٪) و AAI از نزدیک صفر به حدود ۱.۴ افزایش یافت. نتایج زنجیره مارکوف نشان داد کلاس «متوسط» در AOD با احتمال ماندگاری ۶۶٪ پایدارترین وضعیت است، درحالی‌که کلاس «ناسالم» در AAI با احتمال ماندگاری ۷۴٪ به‌عنوان حالت غالب عمل می‌کند. احتمال انتقال از متوسط به ناسالم حدود ۲۵٪ و از ناسالم به بسیار ناسالم حدود ۱۵-۱۰٪ برآورد شد. در مجموع، تنها حدود ۴٪ تا ۲۴٪ روزها هوای پاک دارند و بیش از ۷۵٪ روزها در وضعیت متوسط تا بسیار ناسالم قرار دارند. نتایج بیانگر شکل‌گیری رژیم آلودگی پایدار در استان اصفهان همراه با افزایش خط پایه AOD، جهش AAI در ۲۰۲۲ و تداوم بالای کلاس‌های ناسالم است. تمرکز کانون‌های آلودگی در مناطق مرکزی و شرقی (تالاب گاوخونی، شهر اصفهان و خور) نشان می‌دهد مدیریت آلودگی باید به سمت کنترل ساختاری و منبع‌محور تغییر یابد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی هوا، پایداری آلودگی، شاخص‌های AOD و AAI، تحلیل سری زمانی، زنجیره مارکوف

*نویسنده مسؤول

یوسفی کبریا، علیرضا، نادی، مهدی و شامگانی‌مشهدی، بهاره. (1405). افزایش سهم آئروسول‌های جذبی و تثبیت الگوی آلودگی گردوغبار در استان اصفهان بر پایه سنجش‌ازدور و زنجیره مارکوف، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، 37 (1)، 106-67.



مقدمه

طوفان‌های گردوغبار یکی از مهم‌ترین پدیده‌های طبیعی و اقلیمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شوند که پیامدهای گسترده‌ای بر محیط زیست، اقلیم، سلامت انسان و فعالیت‌های اقتصادی دارند (Yousefi, 2025, p. 56). این پدیده‌ها در اثر وزش بادهای شدید و جداشدن ذرات خاک از سطح زمین‌های خشک و فاقد پوشش گیاهی ایجاد می‌شوند و ذرات معلق را در فواصل محلی، منطقه‌ای و حتی فرامنطقه‌ای منتقل می‌کنند (یوسفی کبریا و همکاران، 1405، ص. 1). انتقال گردوغبار می‌تواند موجب کاهش کیفیت هوا، اختلال در حمل‌ونقل، کاهش دید افقی، و افزایش میزان بیماری‌های تنفسی و آلرژیک شود و در مناطق دور از منبع نیز اثرات بهداشتی درخور توجهی داشته باشد (Boroughani et al., 2020, p. 1). مطالعات گذشته نشان داده‌اند که شدت و فراوانی طوفان‌های گردوغبار در دهه‌های اخیر در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه در خاورمیانه و ایران در حال افزایش است و این افزایش تا حد زیادی ناشی از تغییرات اقلیمی، خشکسالی‌های طولانی‌مدت، کاهش پوشش گیاهی و فعالیت‌های انسانی است (Rayegani et al., 2020, p. 1). خاورمیانه به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان گردوغبار در جهان شناخته می‌شود و سهم چشمگیری از ذرات آئروسل معدنی جهانی را تولید می‌کند (Yu et al., 2018, p. 6690). ایران نیز به دلیل موقعیت جغرافیایی خود در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان، تحت تأثیر سامانه‌های محلی و فرامنطقه‌ای گردوغبار قرار دارد و مناطق مختلف آن در طول سال با رخداد‌های متعدد SDS مواجه هستند. استان اصفهان، با توجه به قرارگیری در مرکز فلات ایران و نزدیکی به منابع داخلی و فرامنطقه‌ای گردوغبار، یکی از مناطق مستعد این پدیده است و پیامدهای آن از جمله کاهش کیفیت هوا، تهدید سلامت عمومی، اختلال در فعالیت‌های اقتصادی و کاهش بهره‌وری کشاورزی قابل توجه است (پیش‌دار و همکاران، 1404، ص. 1). شناسایی الگوهای زمانی و مکانی گردوغبار در استان اصفهان، به‌ویژه برای طراحی راهکارهای مدیریتی و کاهش اثرات مخرب آن، امری ضروری محسوب می‌شود (نورائی و شکرانی، 1400، ص. 83).

با توجه به گستردگی مکانی و پیچیدگی انتقال گردوغبار، روش‌های میدانی به‌تنهایی برای پایش و تحلیل این پدیده محدودیت دارند. در این زمینه، سنجش‌ازدور ابزاری قدرتمند و مؤثر برای شناسایی منابع گردوغبار، پایش انتشار و بررسی روندهای زمانی - مکانی آن محسوب می‌شود (Kotriker and Sridhar, 2026, p. 2). داده‌های ماهواره‌ای، با پوشش وسیع و بازه‌های زمانی طولانی، امکان تحلیل روندهای سالانه، فصلی و روزانه گردوغبار و استخراج شاخص‌های کلیدی مانند Aerosol Optical Depth (AOD) و Absorbing Aerosol Index (AAI) را فراهم می‌کنند. این شاخص‌ها می‌توانند شدت و پراکندگی گردوغبار را به‌صورت کمی نمایش دهند و برای شناسایی مناطق مستعد تولید گردوغبار، تحلیل روندها و تهیه نقشه‌های حساسیت‌پذیری به کار گرفته شوند (Li et al., 2023, p. 1). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که استفاده از شاخص‌های سنجش‌ازدور می‌تواند منابع گردوغبار، روند فصلی و اثرات تغییرات اقلیمی و انسانی را به دقت شناسایی کند و با ترکیب آنها با داده‌های زمین‌شناسی و هواشناسی، چارچوبی کامل برای تحلیل دینامیک گردوغبار ایجاد شود (Pourhashemi et al., 2025, p. 1). در کنار تحلیل‌های سنجش‌ازدور، مدل‌سازی پویایی انتقالی گردوغبار برای درک بهتر رفتار آن اهمیت دارد.

تغییر وضعیت آلودگی از یک سطح به سطح دیگر، روندی تصادفی و وابسته به زمان است و تحلیل توصیفی تنها قادر به شناسایی منابع و روندها است؛ اما توانایی کمی برای پیش‌بینی رفتار انتقالی ندارد (Hou et al., 2024, p.1). در این زمینه، مدل‌های احتمالاتی و به‌ویژه زنجیره مارکوف ابزارهایی مناسب برای تحلیل انتقال کلاس‌های آلودگی محسوب می‌شوند (Alyousifi et al., 2019, p.1521). این مدل‌ها قادرند احتمال تغییر وضعیت از یک کلاس آلودگی به کلاس دیگر را در بازه‌های زمانی روزانه یا هفتگی برآورد کنند و اطلاعات کمی ارزشمندی برای تحلیل پایداری شرایط بحرانی و رفتار دینامیک گردوغبار ارائه دهند (Alyousifi et al., 2021, p. 343). استفاده از مارکوف به همراه داده‌های سنجش‌ازدور، امکان تحلیل همزمان روندهای مکانی و زمانی و رفتار انتقالی را فراهم می‌کند و می‌تواند چارچوبی کمی برای شناسایی مناطق پرخطر و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی ایجاد کند.

پژوهش‌ها متعددی نیز در زمینه گردوغبار صورت گرفته از جمله، نورانی و شکرانی به تحلیل و سطح‌بندی مناطق کلان‌شهر اصفهان براساس توزیع فضایی آلودگی هوا پرداختند. داده‌ها با ترکیبی از روش‌های کتابخانه‌ای و میدانی جمع‌آوری و با استفاده از تحلیل فضایی، سنجش‌ازدور، روش SWARA برای وزن‌دهی و روش شکست‌های طبیعی برای سطح‌بندی تحلیل شدند. نتایج نشان داد که توزیع آلودگی هوا در اصفهان نامتوازن است و مناطق ۷، ۸، ۱۳ و ۱۴ به دلیل فعالیت‌های شهری و صنعتی، معابر پرتردد و تمرکز جمعیت، بیشترین آلودگی را دارند (نورانی و شکرانی، 1400، ص. 83). یزدانی و همکاران به بررسی غلظت و ریسک‌های بهداشتی و اکولوژیکی عناصر احتمالی سمی (مانند As, Ni, V, Zn, Cu, Co, Cr, Cd, Pb) موجود در ذرات گردوغبار ناشی از طوفان‌های گردوغبار در منطقه صحرایی دشت سجزی، بخش صنعتی کلان‌شهر اصفهان پرداختند. نتایج نشان داد که بیشترین غنی‌شدگی برای Zn، Pb و Cd مشاهده شد که Zn با مقدار 8.1 بیشترین غنی‌شدگی را داشت و منابع صنعتی به‌عنوان عامل اصلی آن تأیید شدند. همچنین تحلیل ریسک سلامت نشان داد که عناصر As, Co, Cr در تمامی فصول خطر چشمگیری برای بزرگسالان و کودکان ایجاد می‌کنند (Yazdani et al., 2024, p. 1). پاپی و همکاران با استفاده از رویکرد سنجش‌ازدور و مدل‌سازی پارامترهای محیطی به شناسایی منابع بالقوه طوفان‌های گردوغبار در مرکز ایران پرداختند. داده‌های ۲۰ ساله MODIS و TerraClimate نشان داد که حدود ۵.۳٪ از مرکز ایران به‌عنوان منابع با پتانسیل بالای SDS شناسایی شدند که منابع شنی بیشترین سهم مساحتی و فراوانی رخداد SDS (>۵۰٪) را دارند. بیشترین فراوانی فصلی SDS در بهار و تابستان (۷۶٪) مشاهده شد و بیشترین فراوانی سالانه مربوط به سال ۲۰۰۸ بود که ۱۲۰٪ بالاتر از میانگین ۲۰ ساله بود (Papi et al., 2022, p. 1). ابطیحی و عباسی به بررسی طوفان‌های گردوغبار در مناطق منبع شرقی اصفهان پرداختند و مناطق حساس به فرسایش بادی و تولید گردوغبار را شناسایی کردند. داده‌های سرعت و جهت باد از چهار ایستگاه هواشناسی تحلیل شد تا شدت و انرژی بادهای فرسایشی تعیین شود. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و نمونه‌برداری میدانی، مناطق منبع گردوغبار تأیید و واحدهای زمینی نقشه‌برداری شدند. نتایج نشان داد که انرژی بادهای فرسایشی در شرق اصفهان بالا بوده و جهت غالب بادهای شرق به غرب، از دشت سجزی به سمت شهر اصفهان است. آزمایش‌های زمین‌شناسی و تونل باد نشان داد که سرعت باد آستانه برای حرکت ذرات بین ۶.۵ تا ۱۲ m/s است و خاک‌های سطحی با مقاومت برشی پایین، مستعد فرسایش هستند (ابطیحی و عباسی، 1404، ص. 1).

آروین به پایش و تحلیل ذرات معلق کمتر از $2/5$ میکرون در شهر اصفهان پرداخت. داده‌های روزانه ۷ ایستگاه سنجش کیفیت هوا طی دوره ۱۳۹۱-۱۳۹۵ با استفاده از روش‌های آماری خودهمبستگی و آزمون دوربین واتسون تحلیل شد. نتایج نشان داد که ذرات معلق به دلیل تأثیر عوامل متعدد، همبستگی زمانی مشخصی ندارند و رفتار آنها عمدتاً تصادفی است. بررسی فراوانی روزهای آلوده نشان داد که درصد روزهای با شرایط ناسالم برای گروه‌های حساس و بسیار ناسالم در سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ کاهش یافته است؛ هرچند مناطق با آلاینده‌گی شدیدتر به سمت شرق و شمال شرق اصفهان منتقل شده‌اند (آروین، ۱۳۹۸، ص. ۱۱۱). عزتیان به پایش پدیده گرد و خاک در اصفهان طی دوره ۲۰۱۲-۲۰۱۵ میلادی پرداخت و شاخص تجربی طوفان‌های گرد و خاک مبتنی بر اندازه‌گیری میدان دید افقی را محاسبه کرد. نتایج نشان داد که بیشترین شدت گرد و خاک در شمال شرق اصفهان رخ داده و ماه‌های فروردین تا تیر بیشترین تعداد روزهای گرد و خاکی را ثبت کرده‌اند. سال ۱۳۹۲ با ۲۵۸ روز گرد و خاک بالاتر از حد مجاز به‌طور ویژه بررسی شد (عزتیان، ۱۳۹۸، ص. ۵۰). اکبری و خادمی به بررسی گردوغبار خیابانی ذرات کوچک‌تر از ۱۰۰ میکرومتر در شهرها و شهرستان‌های استان اصفهان پرداختند و تغییرات مکانی و فصلی پذیرفتاری مغناطیسی آنها را تحلیل کردند. اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین و پارامترهای مغناطیسی نشان داد که مقادیر بالای پذیرفتاری مغناطیسی در نطنز ناشی از مواد مادری و در اصفهان بیشتر ناشی از فعالیت‌های انسانی است. همچنین، پارامترهای مغناطیسی در فصل بهار بیشترین مقدار را داشتند که نشان‌دهنده افزایش غلظت کانی‌های مغناطیسی و سهم بالای فعالیت‌های انسانی در این فصل است (اکبری و خادمی، ۱۴۰۲، ص. ۲۴۷). یوسفی کبریا و همکاران با استفاده از داده‌های MODIS و شاخص‌های TDI و AOD در بازه ۲۰۱۸-۲۰۲۳ بررسی کردند که مناطق شرقی و مرزی استان سیستان و بلوچستان، به‌ویژه زلیل و زاهدان، بیش از ۱۲۰ روز در سال تحت تأثیر گردوغبار قرار دارند. مدل HYSPLIT نشان داد منشأ این گردوغبار ترکیبی از منابع داخلی و بیابان‌های افغانستان و ترکمنستان است. بیشترین شدت گردوغبار در سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۲ ثبت شد و هم‌پوشانی بالای TDI با مقادیر AOD اعتبار شاخص TDI را برای شناسایی مناطق پرخطر تأیید کرد (Yousefi Kebriya et al., 2025, p. 56). یوسفی کبریا و همکاران روند مکانی - زمانی گردوغبار در استان ایلام طی ۲۰۲۰-۲۰۲۵ را با استفاده از داده‌های PM ایستگاه‌های مهران و دهلران و شاخص‌های ماهواره‌ای AOD (MODIS)، AAI (Sentinel-5P)، NDDI و شمارش رخدادهای (DECM) تحلیل کردند. بیشترین فراوانی رخدادهای گردوغبار در سال ۲۰۲۲ با بیش از ۲۰۰ مورد ثبت شد و تمرکز رخدادهای عمدتاً در مناطق مرزی باقی ماند. مقدار AAI به بیش از ۱.۳ و AOD به بیش از ۱/۸۵ رسید که شرایط بسیار ناسالم را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی HYSPLIT منشأ گردوغبار را بیابان‌های غرب عراق و شرق سوریه و عبور ذرات از مرزها به ایلام تأیید کرد (یوسفی کبریا و همکاران، ۱۴۰۵، ص. ۱). یوسفی کبریا و نادى به بررسی رفتار انتقال احتمالاتی سطوح آلودگی هوا در تهران با استفاده از شاخص کیفیت هوا و مدل زنجیره مارکوف پرداختند. نتایج نشان داد مناطق غرب و جنوب تهران بالاترین آلودگی را داشتند، به‌طوری‌که بیش از ۴۴٪ و ۳۴٪ از داده‌ها به سطوح ناسالم تعلق داشت. ماتریس‌های احتمال انتقال حاکی از پلیداری بالای وضعیت هوای سالم و کم بودن انتقال از هوای پاک/سالم به وضعیت بسیار ناسالم/خطرناک بود. در غرب و جنوب، احتمال ادامه وضعیت ناسالم تا ۶۰٪ و احتمال ادامه هوای

پاک در غرب کمتر از ۳۰٪ بود، درحالی که شمال تهران بیش از ۵۰٪ پایداری برای هوای پاک و سالم داشت (Yousefi & Nadi, 2024, p. 201). ژائو و همکاران پژوهشی در کمربند شمالی گردوغبار چین (NSbelt) روند PM10 را طی سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ بررسی کردند. منطقه به چهار زیرمنطقه شرق، مرکز، شمال غرب و جنوب غرب تقسیم شد و روند PM10 با آزمون Mann-Kendall و شیب Sen تحلیل شد. روزهای گردوغبار از روزهای بدون گردوغبار تفکیک شد و سهم پوشش گیاهی کسری (FVC)، بارش (Pre)، سرعت باد (Wind) و دما (T) در فعالیت گردوغبار مشخص شد. نتایج نشان داد که مرکز بیشترین بهبود PM10 را داشته است (Sen's slope = -1.83)، جنوب غرب با ۲۴۸۷ روز تحت تأثیر شدیدترین منطقه و شرق با بیش از ۳۴۵ روز بدون گردوغبار کمترین تأثیر را تجربه کرده است (Zhao et al., 2026, p. 1).

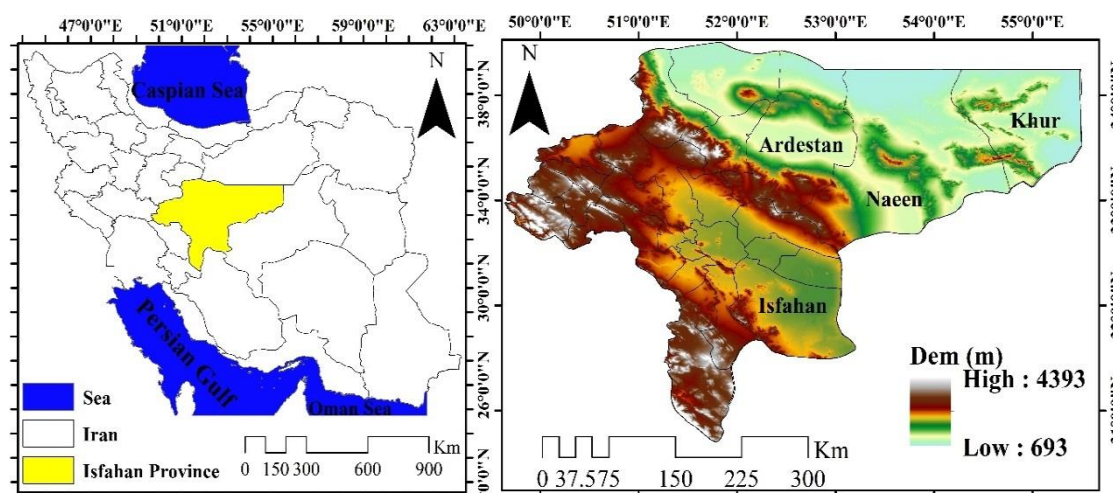
با وجود پیشرفت های گسترده در تحلیل های سنجش از دور، بخش عمده پژوهش های پیشین عمدتاً به شناسایی منابع گردوغبار یا تحلیل توصیفی روندها محدود بوده اند و به طور محدود به بررسی رفتار انتقالی گردوغبار میان سطوح مختلف آلودگی پرداخته اند. مدل های احتمالاتی و زنجیره های مارکوف ابزارهایی مناسب برای تحلیل فرآیندهای تصادفی وابسته به زمان و بررسی احتمال انتقال کلاس های آلودگی هستند. این مدل ها می توانند احتمال تغییر وضعیت آلودگی از یک سطح به سطح دیگر را در بازه های زمانی روزانه یا هفتگی برآورد کنند و اطلاعات کمی ارزشمندی برای مدیریت خطر و پیش بینی رفتار آینده گردوغبار ارائه دهند. اهداف اصلی این پژوهش به صورت چندمرحله ای و به منظور تحلیل جامع پویایی گردوغبار در استان اصفهان طی دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ تعریف شده است. هدف اول، پایش و شناسایی فضایی - زمانی گردوغبار با استفاده از داده های سنجش از دور شامل شاخص های AOD از سنجنده MODIS و AAI از ماهواره Sentinel-5P و تعیین مناطق دارای بیشترین شدت آلودگی و کانون های فعال گردوغبار در سطح استان است. هدف دوم، بررسی الگوهای تغییرات ماهانه و فصلی گردوغبار از طریق تحلیل نقشه های مکانی، استخراج روندهای زمانی، و تحلیل های آماری شامل توزیع فراوانی، بررسی چگالی احتمال (KDE) و تحلیل سری های زمانی به منظور شناسایی رفتار بلندمدت و تغییرات تدریجی شاخص های آئروسل است. هدف سوم، بررسی پویایی روزانه و سنجش پایداری کلاس های آلودگی با استفاده از مدل زنجیره مارکوف و برآورد ماتریس های انتقال بین طبقات مختلف کیفیت هوا برای کمی سازی احتمال گذار بین وضعیت های مختلف آلودگی و ارزیابی رفتار انتقالی سیستم است. درنهایت، این اهداف در راستای ارائه یک چارچوب تحلیلی یکپارچه برای درک بهتر ساختار فضایی - زمانی گردوغبار و حمایت از مدیریت محیط زیست و کنترل آلودگی هوا در استان اصفهان دنبال شده است.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

استان اصفهان در عرض های جغرافیایی ۳۰° ۴۲' تا ۳۴° ۳۰' شمالی و طول های جغرافیایی ۴۹° ۳۶' تا ۵۵° ۳۲' شرقی قرار دارد و در بخش مرکزی فلات ایران واقع شده است. استان اصفهان از نظر توپوگرافی دارای تنوع چشمگیری است؛ نواحی غربی و جنوب غربی آن شامل رشته کوه های زاگرس مرکزی با ارتفاعات قابل توجه است؛ در

حالی که مناطق مرکزی و شرقی استان عمدتاً دشت‌های خشک و نیمه‌خشک مانند دشت ورزنه و حاشیه کویر اصفهان - یزد را در بر می‌گیرند که در شکل 1 قابل مشاهده است. آب‌وهوای استان خشک تا نیمه‌خشک با تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد و نسبتاً بارانی است؛ متوسط دمای سالانه ۱۶-۱۸ °C و بارش سالانه ۱۰۰-۱۵۰ میلی‌متر است. منابع آبی شامل زاینده‌رود، چشمه‌ها و سفره‌های زیرزمینی طی دو دهه اخیر به دلیل خشکسالی و برداشت بی‌رویه کاهش یافته‌اند. فعالیت‌های صنعتی گسترده و رشد جمعیت شهری، همراه با کاهش منابع آبی، موجب افزایش آلودگی هوا و گردوغبار محلی شده است (آروین، 1398، ص. 111).



شکل 1: نقشه توپوگرافی استان اصفهان

Fig 1: Topographic map of Isfahan Province

داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش از داده‌های سنجنش‌ازدور برای تحلیل پویایی گردوغبار در استان اصفهان استفاده شد. داده‌های اصلی شامل شاخص AOD از سنجنده MODIS و شاخص AAI از ماهواره Sentinel-5 در بازه زمانی 2020 تا 2025 است. این بازه زمانی به دلیل شدت بالای رخداد‌های گردوغبار و آلودگی هوا در سال‌های اخیر و همچنین در دسترس بودن داده‌های پیوسته، معتبر و با کیفیت سنجنده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده انتخاب شد؛ به‌طوری‌که امکان تحلیل منسجم روندهای مکانی - زمانی و ارزیابی تغییرات اخیر آلودگی در مقیاس‌های روزانه تا سالانه فراهم شود. داده‌ها به‌صورت روزانه، ماهانه و سالانه پردازش شدند و با استفاده از کدنویسی در محیط Google Earth Engine (GEE) استخراج شدند که امکان پردازش سریع و تحلیل گسترده داده‌های ماهواره‌ای با تفکیک مکانی و زمانی بالا را فراهم می‌کند.

شاخص‌های آلودگی گردوغبار

شاخص کیفیت هوا (AQI (Air Quality Index)) به‌صورت روزانه و حتی ساعتی محاسبه شده و غلظت هر آلاینده موجود در جو را ارزیابی می‌کند. هر آلاینده پس از اندازه‌گیری، با استفاده از مقیاس استاندارد به عددی بین صفر تا ۵۰۰ تبدیل می‌شود و مقدار نهایی AQI به‌صورت نسبی کیفیت هوا را نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که مقادیر پایین‌تر نمایانگر هوای پاک‌تر

و خطر کمتر برای سلامت انسان و مقادیر بالاتر نشان‌دهنده آلودگی شدید و افزایش ریسک‌های سلامتی است و براساس مرجع استاندارد مقادیر AQI بالاتر از 100 نشان‌دهنده هوای آلوده و شرایط ناسالم برای گروه‌های حساس است (Yousefi & Kebriya, 2024, p. 1). در این پژوهش از دو شاخص AOD و AAI برای بررسی گردوغبار استفاده شد و براساس کلاس‌های شاخص کیفیت هوا طبقه بندی شد، که در جدول 1 نشان داده شده است.

شاخص AOD: معیاری کلیدی برای سنجش پراکندگی و جذب نور توسط ذرات معلق (آئروسول‌ها) در جو است و به‌طور گسترده برای پایش آلودگی هوا ناشی از گردوغبار به‌کار می‌رود. در این پژوهش، داده‌های AOD از سنجنده MODIS مجموعه داده‌های MODIS/061/MOD09GA استخراج شدند و برای محاسبه آن از باند Optical_Depth_047، مرتبط با عمق اپتیکی آئروسول در طول موج 0/47 میکرومتر، استفاده شد. تصاویر ماهواره‌ای ابتدا براساس محدوده زمانی و مکانی مطالعه، فیلتر و سپس میانگین‌گیری مکانی انجام شد تا نقشه پراکندگی AOD در سطح استان تهیه شود. شاخص AOD مقادیر بالای 0/3 وضعیت ناسالم را نشان می‌دهد (Yousefi Kebriya et al., 2025, p. 56).

شاخص AAI: بیانگر وجود و غلظت ذرات آئروسول جذب‌کننده نور در جو است و به‌طور عمده با گردوغبار و آلاینده‌های آلی مرتبط است. در این پژوهش، داده‌های AAI از ماهواره Sentinel-5P و مجموعه داده‌های absorbing_aerosol_index به‌دست آمدند. برای محاسبه شاخص، مقدار absorbing_aerosol_index در بازه زمانی و محدوده جغرافیایی مطالعه، فیلتر و سپس میانگین‌گیری مکانی بر روی تصاویر اعمال شد. شاخص AAI مقادیر بالای 0/5 بیانگر افزایش آلودگی و شرایط خطرناک هوا است (Yousefi Kebriya et al., 2026, p. 1).

جدول 1: دسته‌بندی‌های شاخص کیفیت هوا (AQI)، به همراه مقادیر AOD و AAI و سطوح مرتبط نگرانی آلودگی

Table 1: AQI categories, along with AOD and AAI values, and their corresponding pollution levels of concern

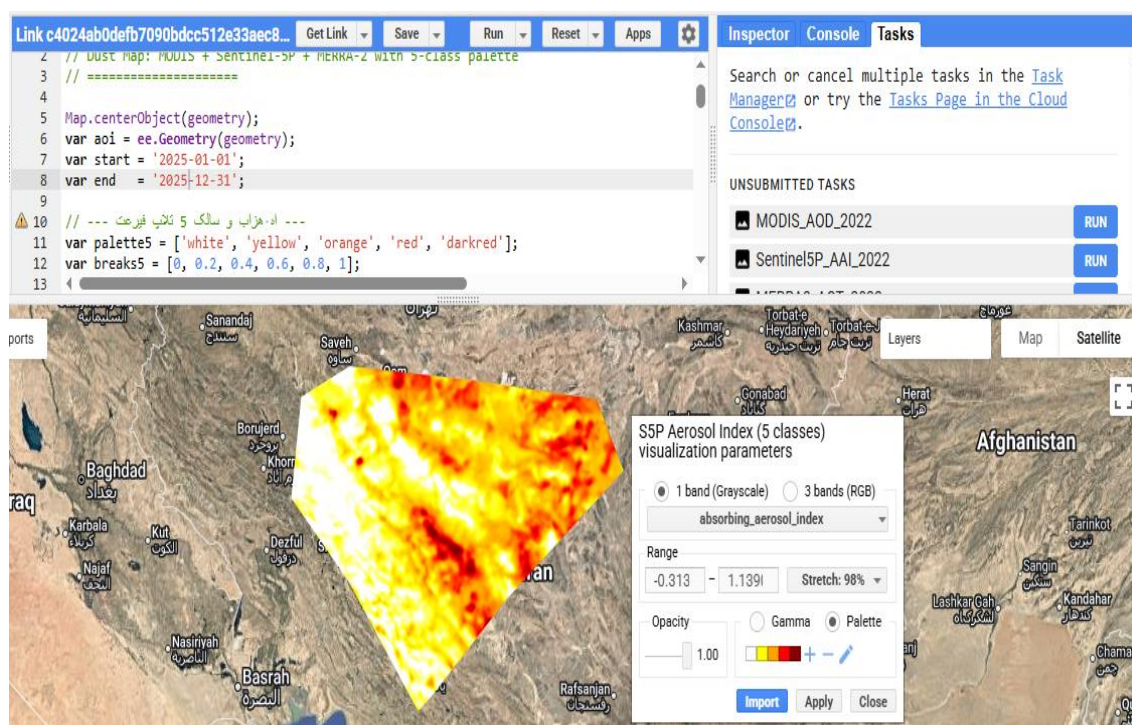
مقدار AQI	مقدار شاخص AOD	مقدار شاخص AAI	سطوح نگرانی
0-50	0/1<	1<	خوب
51-100	0/1 – 0/3	0-0/5	متوسط
101-200	0/0-3/5	0/5 – 2	ناسالم
201-300	1 – 0/5	2-5	بسیار ناسالم
300<	> 1	> 5	خطرناک

پردازش داده‌های ماهواره‌ای در سامانه GEE

سامانه GEE یک پلتفرم ابری پیشرفته است که گوگل توسعه داده و امکان پردازش سریع و دقیق داده‌های سنجنش‌ازدور و تصاویر ماهواره‌ای را فراهم کرده است. در این پژوهش، برای پایش، داده‌های ماهواره‌ای MODIS و Sentinel-5P استفاده شد تا تغییرات مکانی و زمانی ذرات معلق در سطح استان مشخص شود (شکل 2).

سنجنده MODIS: یکی از سنجنده‌های مهم سنجنش‌ازدور است که روی ماهواره‌های Terra (از سال 1999) و Aqua (از سال 2002) نصب شده است. این سنجنده قادر به ثبت داده‌های چندطیفی در طول موج‌های مختلف است و تصاویر با وضوح مکانی 250 تا 1000 متر تولید می‌کند. داده‌های MODIS شامل اطلاعاتی درباره پوشش سطح زمین، ابرها، دما، رطوبت خاک و سایر پارامترهای محیطی است (Xiong et al., 2006, p. 1).

ماهواره Sentinel-5P: یکی از ماهواره‌های برنامه Copernicus اروپا است که از سال 2017 فعالیت می‌کند و مجهز به سنجنده TROPOMI است. این ماهواره داده‌های متنوعی درباره جو، شامل ترکیبات گازی، تراکم ذرات معلق، پوشش ابری و وضعیت کلان‌تر آلودگی هوا ارائه می‌دهد. داده‌های Sentinel-5P با وضوح مکانی حدود 3.5×7 کیلومتر و تکرار زمانی روزانه، امکان رصد شرایط جوی و بررسی تغییرات محیطی در مقیاس منطقه‌ای را فراهم می‌کند (Lindqvist et al., 2024, p.1).



شکل 2: مراحل استخراج شاخص‌های سنجش از دور در محیط GEE
Fig 2: Steps for extracting remote sensing indices in the GEE environment

آنالیز آماری

تحلیل آماری توزیع فراوانی

به منظور بررسی ویژگی‌های آماری و نحوه پراکنش داده‌ها، تحلیل توزیع فراوانی انجام شد. در این روش، داده‌ها براساس بازه‌های مشخص، طبقه‌بندی و تعداد وقوع هر کلاس محاسبه شد. توزیع فراوانی امکان ارزیابی رفتار آماری داده‌ها شامل تمرکز، پراکندگی، چولگی و الگوهای غالب تغییرات را فراهم می‌کند. فراوانی نسبی هر کلاس از رابطه 1 محاسبه می‌شود که در آن P_i فراوانی نسبی کلاس i ، f_i تعداد داده‌های قرارگرفته در آن کلاس و N تعداد کل مشاهدات است (Rahaman et al., 2026, p. 1).

$$P_i = \frac{f_i}{N} \quad (1)$$

تحلیل هیستوگرام

برای نمایش گرافیکی توزیع داده‌ها و بررسی الگوی تغییرات، از هیستوگرام استفاده می‌شود. در این روش، داده‌ها در بازه‌های مشخص، دسته‌بندی و فراوانی وقوع هر بازه به‌صورت نمودار ستونی نمایش داده می‌شود. تحلیل هیستوگرام امکان شناسایی توزیع‌های نرمال، چندوجهی، چولگی داده‌ها و تراکم مقادیر در کلاس‌های مختلف را فراهم می‌سازد. ارتفاع هر ستون در هیستوگرام بیانگر تعداد داده‌های قرارگرفته در بازه مربوطه است و به‌صورت رابطه 2 تعریف می‌شود که در آن $H(x_i)$ فراوانی داده‌ها در بازه i و f_i تعداد رخدادها در آن کلاس است (Liu et al., 2024, p. 1).

$$H(x_i) = f_i \quad (2)$$

منحنی چگالی احتمال (KDE)

به‌منظور برآورد پیوسته توزیع داده‌ها و کاهش نوسانات ناشی از دسته‌بندی هیستوگرام، از روش تخمین چگالی هسته‌ای یا Kernel Density Estimation (KDE) استفاده می‌شود. این روش یک تابع هموار از توزیع احتمال داده‌ها ارائه می‌دهد و امکان شناسایی دقیق‌تر قله‌ها، تراکم داده‌ها و الگوهای پنهان آماری را فراهم می‌کند. تابع KDE به‌صورت رابطه 3 محاسبه می‌شود که در آن $\hat{f}(x)$ تابع چگالی برآورد شده، n تعداد داده‌ها، h پهنای بلند (Bandwidth)، x_i مقادیر مشاهده‌شده و K تابع هسته‌ای است. در این پژوهش، از تابع هسته گاوسی (Gaussian Kernel) برای برآورد چگالی احتمال استفاده شد (Moreo et al., 2025, p. 1).

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (3)$$

مدل زنجیره مارکوف

از مدل‌های زنجیر مارکف می‌توان برای شبیه‌سازی سری‌های زمانی گسسته استفاده کرد. اصول این روش بر پایه همبستگی زمانی بین داده‌های یک متغیر است؛ یعنی وقوع یک متغیر تصادفی خاص متأثر از داده‌های گام یا گام‌های زمانی قبلی است. هر مدل زنجیر مارکف با تعداد حالات متغیر مورد نظر و مرتبه زمانی آن مشخص می‌شود (Stoner & Economou, 2020, p. 1)؛ برای مثال، در تحلیل آلودگی با زنجیره مارکف می‌توان تعداد حالات مدل را برابر تعداد طبقات آلودگی در نظر گرفت. مرتبه مدل یعنی اینکه حالت یک متغیر در زمان فعلی از چند گام زمانی بلافاصله قبل از آن تبعیت می‌کند که می‌تواند 1 یا 2 یا ... گام باشد. فرم معادله یک زنجیر مارکف مرتبه 1 به‌صورت رابطه 4 است.

$$\Pr\{X_t | X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, X_1\} = \Pr\{X_t | X_{t-1}\} \quad (4)$$

معادلات فوق بیان می‌کنند که احتمال وقوع یک متغیر مانند X در زمان t صرفاً به زمان‌های $t-1$ (مرتبه یک) یا $t-1$ و $t-2$ (مرتبه دو) بستگی دارد نه به مسیری که سری زمانی به متغیر X در t رسیده است. در ادامه برخی ویژگی‌های

زنجیر مارکف مرتبه نخست شامل ماتریس احتمالات انتقال و محاسبه احتمالات ایستای آن پرداخته می‌شود (Morton & Finkenstädt, 2005, p. 575).

هر عنصر ماتریس احتمال انتقال مدل زنجیر مارکف مرتبه یک با P_{ij} شناخته می‌شود که احتمال انتقال از حالت i به حالت j را نشان می‌دهد و از رابطه 5 به دست می‌آید.

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_{j=1}^S n_{ij}} \quad (5)$$

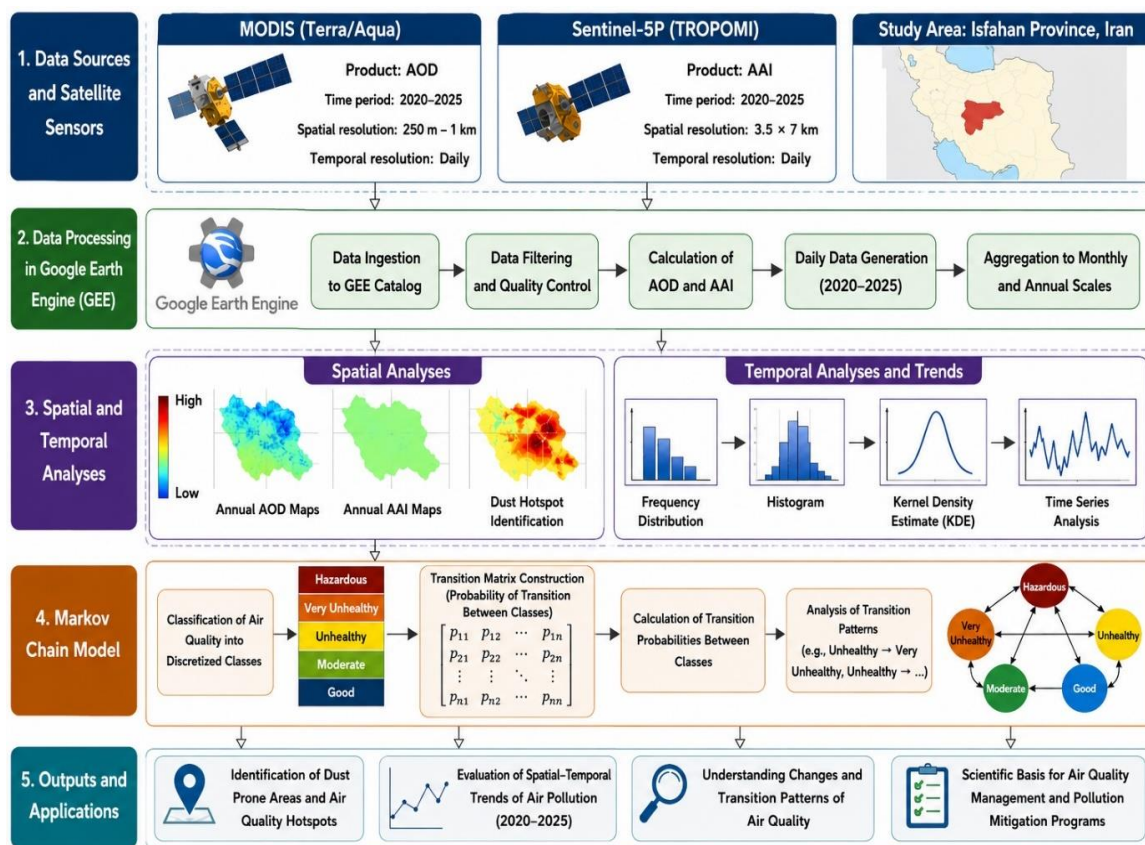
که در آن، n_{ij} : تعداد حالاتی که در سری زمانی بعد از وقوع حالت i ، حالت j رخ داده است و S : تعداد کل حالات متغیر یا عناصر فضای نمونه است. در این مطالعه، 5 حالت (معادل 5 طبقه شدت آلودگی) برای i و j انتخاب شد که در جدول 1 ارائه شده است. فرم ماتریس احتمال انتقال یک زنجیر مارکف مرتبه نخست 5 حالت به صورت رابطه 6 است.

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} & P_{35} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} & P_{45} \\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54} & P_{55} \end{bmatrix} \quad (6)$$

که در آن، برای مثال، P_{14} احتمال آن است که پس از یک هوای پاک، طبقه بسیار ناسالم اتفاق افتد. در ماتریس فوق، مجموع احتمالات هر سطر برابر 1 است (Wu et al., 2025, p. 1).

در این مطالعه، وضعیت آلودگی هوا و پویایی گردوغبار در استان اصفهان با رویکردی کمی و مکانی - زمانی ارزیابی شد. در مرحله نخست، داده‌های سنسور از دور شامل شاخص AOD و شاخص AAI پردازش و تحلیل شدند. این داده‌ها برای تولید نقشه‌های مکانی سالانه و ماهانه به کار گرفته شدند تا الگوی پراکنش فضایی ذرات معلق، روند تغییرات آلودگی و کانون‌های دارای بیشترین شدت آلودگی در سطح استان شناسایی شود. در ادامه، به منظور بررسی رفتار دینامیکی آلودگی هوا، تحلیل‌های آماری شامل توزیع فراوانی، هیستوگرام، تابع چگالی احتمال و تحلیل سری‌های زمانی انجام شد تا ویژگی‌های آماری، الگوهای تغییرپذیری و روندهای زمانی شاخص‌های آئروسول در مقیاس‌های مختلف ارزیابی شود. در مرحله بعد، برای تحلیل پایداری و انتقال وضعیت‌های آلودگی، از مدل زنجیره مارکوف استفاده شد. این مدل امکان محاسبه احتمال گذار بین کلاس‌های مختلف کیفیت هوا را فراهم می‌کند و قادر است رفتار انتقالی سیستم آلودگی را در مقیاس روزانه تحلیل کند. به عبارت دیگر، احتمال تغییر وضعیت از یک کلاس آلودگی به کلاس دیگر، مانند انتقال از شرایط بسیار ناسالم به ناسالم یا از شرایط نیمه‌آلوده به پاک، با استفاده از ماتریس‌های انتقال مارکوف برآورد شد. استفاده از این مدل علاوه بر ارزیابی میزان ماندگاری کلاس‌های آلودگی، درک دقیق‌تری از وابستگی زمانی و روند تداوم آلودگی در منطقه مورد مطالعه فراهم می‌سازد. در مجموع، تلفیق داده‌های

ماهواره ای با تحلیل های آماری و مدل زنجیره مارکوف، چارچوبی جامع برای تحلیل ساختار مکانی - زمانی آلودگی هوا در استان اصفهان فراهم می کند و مبنای علمی مناسبی برای مدیریت آلودگی، شناسایی مناطق بحرانی و پشتیبانی از برنامه ریزی های زیست محیطی ارائه می دهد. مراحل مختلف پژوهش در شکل 3 قابل مشاهده است.



شکل 3: روند گام به گام روش شناسی پژوهش

Fig 3: Step-by-step workflow of the research methodology

نتایج و بحث

پایش گردوغبار با استفاده از شاخص های AOD و AAI

براساس بررسی روند تغییرات شاخص AOD طی پنج سال اخیر که در شکل 4 ارائه شده است، الگوی زمانی - مکانی آلودگی هوا نشان دهنده تمرکز پایدار مقادیر بالای AOD در نواحی مرکزی و شرقی استان، به ویژه در محدوده های شهری و کانون های مستعد تولید گردوغبار است. در سال 2020، مقادیر شاخص AOD در مناطق مرکزی، جنوبی، شرقی و بخش هایی از شمال استان عموماً بیش از 0/37 ثبت شده و بخش عمده ای از پهنه استان در بازه 0/37-0/56 قرار داشته است که بیانگر شرایط ناسالم کیفیت هوا است. افزون بر این، گستره های وسیعی از نواحی مرکزی و جنوبی و قسمت هایی از شرق استان در کلاس 0/56-0/96 (بسیار ناسالم) قرار گرفته و در بخش هایی از شهرستان خور، مناطق خشک تالاب گاوخونی و محدوده شهری اصفهان مقادیر بیش از 0/96 مشاهده

شده که نشان‌دهنده شرایط خطرناک آلودگی هوا است. در سال 2021 شدت آلودگی افزایش یافته و جابه‌جایی شاخص به سمت کلاس‌های بالاتر به‌وضوح قابل مشاهده است. در این سال، بخش اعظم مناطق مرکزی، جنوبی و شرقی و قسمت‌هایی از شمال استان در کلاس ناسالم تا خطرناک قرار گرفته‌اند. نواحی شمال اردستان، شرق نائین، مناطق مرزی آران و بیدگل و کاشان، همچنین بخش‌های وسیعی از شهرستان خور، مناطق خشک تالاب گاوخونی و شهر اصفهان بیشترین تمرکز آلودگی را نشان می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که در خور و اصفهان مقادیر AOD عمدتاً در بازه 1/1-0/72 و حتی بیش از 1/1 ثبت شده که بیانگر تشدید قابل توجه شرایط بحرانی کیفیت هوا است. در سال 2022 اگرچه کاهش نسبی در شاخص AOD مشاهده می‌شود، همچنان پهنه‌های گسترده‌ای از استان در کلاس ناسالم باقی مانده‌اند. مناطق مرزی آران و بیدگل و کاشان، بخش زیادی از خور، جنوب شرق نائین، نواحی مرکزی استان و شهر اصفهان در محدوده ناسالم تا خطرناک قرار داشته‌اند. به‌طور خاص، در خور و اصفهان مقادیر AOD عمدتاً در بازه 1-0/58 و بیش از 1 بوده است که استمرار کانون‌های اصلی آلودگی را نشان می‌دهد. در سال 2023 روند کاهشی شاخص AOD آشکارتر شده و هیچ ناحیه‌ای در کلاس خطرناک قرار نگرفته است؛ با این حال، مناطق دارای سابقه آلودگی همچنان درگیر شرایط ناسالم و بسیار ناسالم بوده‌اند. بیشترین مقادیر همچنان در شهرستان خور و شهر اصفهان ثبت شده که بیانگر پایداری نسبی منابع تولید ذرات معلق در این نواحی است. این روند کاهشی در سال 2024 نیز ادامه یافته است. اگرچه کلاس خطرناک مشابه سال قبل مشاهده نمی‌شود، الگوی مکانی آلودگی نشان می‌دهد شهرهایی که در سال‌های پیش کانون آلودگی بوده‌اند همچنان درگیر آلودگی هستند؛ هرچند شدت آن کاهش یافته است. در اردستان، آران و بیدگل و کاشان وسعت پهنه‌های آلوده کاهش یافته است و تنها لکه‌های محدودی در کلاس ناسالم برای گروه‌های حساس تا ناسالم برای همه گروه‌ها دیده می‌شود. با وجود این، بخش‌های وسیعی از اصفهان و خور همچنان در کلاس ناسالم و بسیار ناسالم قرار دارند که نشان‌دهنده تداوم مزمن آلودگی هوا در این مناطق است. در سال 2025 الگوی شاخص AOD تا حد زیادی مشابه سال 2024 بوده است؛ اما کاهش بیشتری در وسعت پهنه‌های آلوده مشاهده می‌شود. در این سال، اردستان و کاشان عمدتاً فاقد آلودگی قابل توجه بوده است و تنها بخش‌های کوچکی در محدوده ناسالم برای گروه‌های حساس قرار دارند. قسمت‌های محدودی از نائین در کلاس ناسالم با مقادیر 0/38-0/58 ثبت شده است؛ با این حال، مناطق مرکزی و شرقی استان، به‌ویژه شهرستان خور و شهر اصفهان، همچنان در کلاس ناسالم و بسیار ناسالم باقی مانده‌اند؛ به‌طوری‌که مقادیر AOD در این نواحی عمدتاً در بازه 0/56-0/87 و بیش از 0/87 قرار دارد. در مجموع، تحلیل پنج‌ساله شاخص AOD نشان می‌دهد که الگوی آلودگی هوا در استان اصفهان از یک ساختار صرفاً متغیر زمانی به یک الگوی پایدار فضایی - زمانی با سه رفتار متمایز تبدیل شده است. این الگو بیانگر آن است که تغییرات مشاهده‌شده در سطح استان تصادفی یا یکنواخت نبوده است؛ بلکه ناشی از تفاوت در ماهیت منابع انتشار، ویژگی‌های زمین‌ساختی و نقش اقلیم محلی است. بر این اساس، می‌توان سه رفتار اکولوژیکی - آلودگی مجزا را شناسایی کرد.

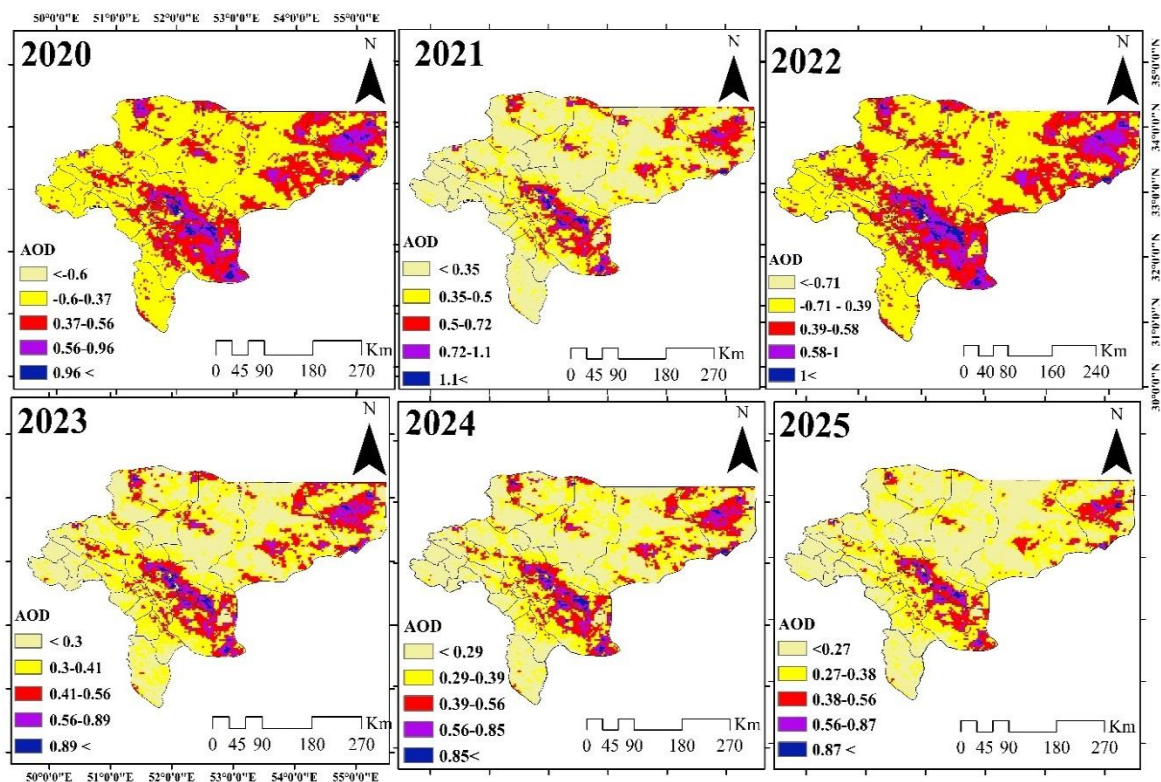
نخست، پهنه مزمن و پایدار آلودگی شامل خور، مناطق خشک‌شده تالاب گاوخونی و شهر اصفهان است که با میانگین سالانه AOD عمدتاً بالاتر از 0/7 و تداوم زمانی بالا مشخص می‌شود. پایداری این مقادیر در طول کل دوره

مطالعه نشان می‌دهد که این نواحی تحت تأثیر منابع دائمی و ساختاری تولید آئروسول‌ها قرار دارند و در نتیجه، آلودگی در این مناطق ماهیت مزمن، مقاوم و کم‌پاسخ به نوسانات سالانه دارد. این ویژگی باعث شده است که حتی در سال‌های با کاهش نسبی، این پهنه همچنان در کلاس‌های ناسالم و بسیار ناسالم باقی بماند.

دوم، پهنه ناپایدار شامل کاشان، آران و بیدگل، اردستان و بخش‌هایی از نائین است که میانگین AOD در آنها در بازه حدود 0/3 تا 0/6 نوسان دارد و در عین حال روند کلی کاهشی در سال‌های پایانی مشاهده می‌شود. این رفتار نشان‌دهنده ماهیت گذرا و وابسته به شرایط اقلیمی و انتقال گردوغبار در این نواحی است؛ به گونه‌ای که شدت آلودگی در این پهنه بیشتر تابع شرایط سالانه و حمل ریزگردها از کانون‌های بیرونی است.

سوم، پهنه نسبتاً پاک در مناطق غربی و کوهستانی استان با مقادیر پایدار کمتر از 0/3 مشخص می‌شود که نشان‌دهنده نقش مؤثر توپوگرافی ارتفاعی و پوشش طبیعی زمین در کاهش غلظت آئروسول‌ها و محدودسازی انتشار و انتقال آنها است. ثبات زمانی پایین بودن AOD در این مناطق بیانگر آن است که این پهنه از نظر کیفیت هوا کمترین حساسیت را نسبت به نوسانات سالانه آلودگی دارد.

بنابراین، الگوی فضایی - زمانی مشاهده شده نشان می‌دهد که آلودگی هوا در استان اصفهان دارای ساختار سه‌لایه‌ای پایدار (مزمن - ناپایدار - پاک) است و کنترل مؤثر آن نیازمند تمرکز هدفمند بر کانون‌های مزمن به‌ویژه در خور و اصفهان است؛ زیرا این نواحی نقش غالب در تعیین سطح پس‌زمینه آلودگی در کل استان دارند.



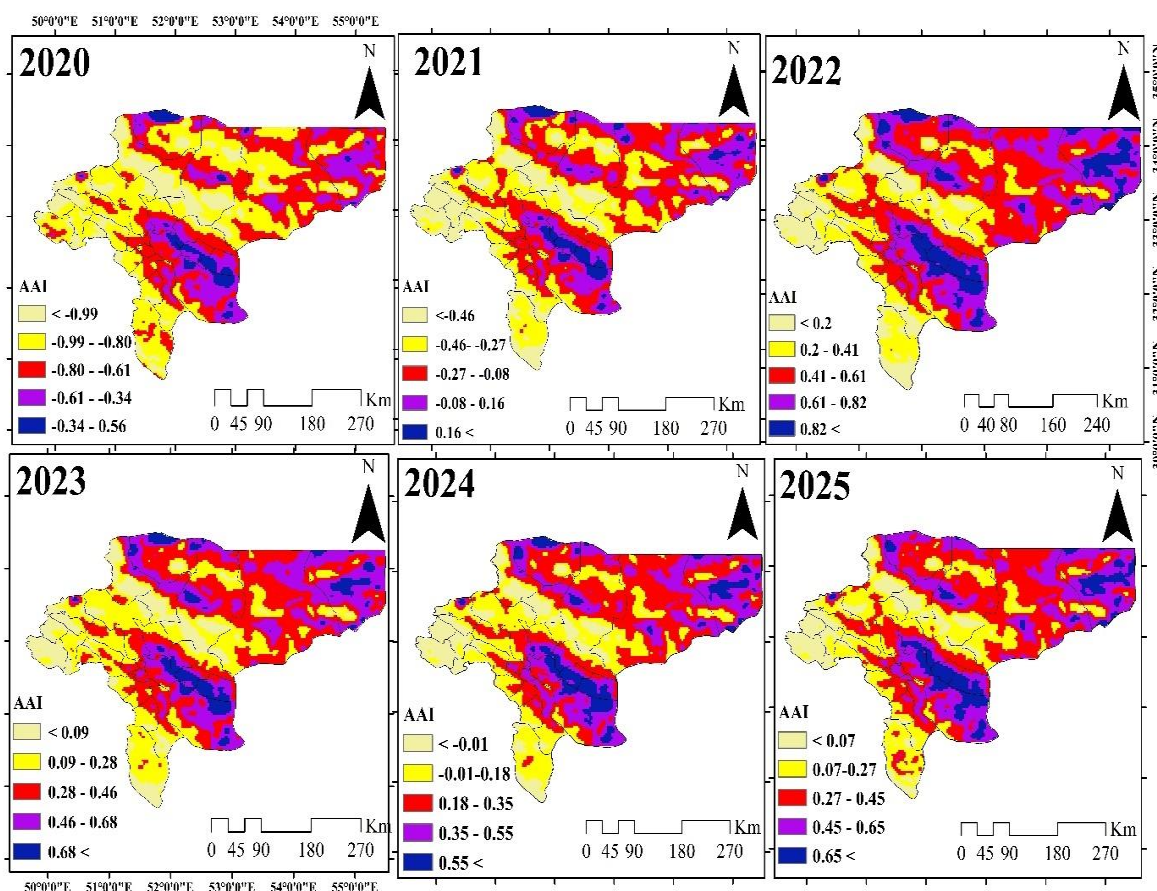
شکل 4: نقشه شاخص AOD سنجنده MODIS استان اصفهان

Fig 4: Map of the AOD index from the MODIS sensor for Isfahan province

براساس تحلیل نقشه‌های شاخص AAI ارائه‌شده در شکل 5، روند زمانی - مکانی این شاخص بیانگر نوسانات قابل توجه در شدت آلودگی آئروسل و تمرکز آن در نواحی مرکزی و شرقی استان، به‌ویژه مناطق خشک شده تالاب گاوخونی و پیرامون شهر اصفهان است. در سال 2020، شرایط غالب استان در محدوده نرمال قرار داشته است و تنها بخش‌هایی از نواحی مرکزی در وضعیت ناسالم برای گروه‌های حساس مشاهده می‌شود که این وضعیت عمدتاً در محدوده شهری اصفهان تمرکز داشته است. در سال 2021 مقدار شاخص AAI افزایش نسبی نشان می‌دهد هرچند وضعیت کلی استان همچنان در محدوده نرمال باقی مانده است، بخش‌هایی از نواحی مرکزی و شرقی استان شرایط نامطلوب‌تری نسبت به سایر مناطق داشته‌اند که بیانگر شکل‌گیری تدریجی کانون‌های فعال‌تر آئروسل در این پهنه‌ها است. سال 2022 نقطه اوج افزایش شاخص AAI در دوره مورد بررسی محسوب می‌شود. در این سال تنها نواحی مرتفع استان در وضعیت پاک قرار داشته است و سایر مناطق در شرایط سالم تا ناسالم ثبت شده‌اند. گستره وسیعی از نواحی شمالی، شرقی، مرکزی و جنوبی استان در کلاس ناسالم قرار گرفته‌اند. بیشترین مقادیر AAI در شهرستان‌های خور، نائین، اردستان، آران و بیدگل، کاشان و نواحی مرکزی، به‌ویژه شهر اصفهان، مشاهده شده و عمدتاً در بازه 0/41-0/61 بوده است. همچنین، در بخش‌هایی از این مناطق مقادیر 0/61-0/82 ثبت شده است و در پهنه‌های چشمگیری از تالاب خشک‌شده گاوخونی، شهر اصفهان و خور مقادیر بیش از 0/82 مشاهده می‌شود که بیانگر تمرکز شدید آئروسل و تشدید شرایط ناسالم است. در سال 2023 شاخص AAI روند کاهشی نشان می‌دهد؛ اما همچنان بسیاری از شهرها در وضعیت ناسالم باقی مانده‌اند. بخش‌های گسترده‌ای از نواحی شرقی، شمالی، مرکزی و جنوبی استان دارای مقادیر 0/46-0/68 و بیش از 0/68 بوده‌اند که استمرار نسبی آلودگی در کانون‌های شناخته‌شده را تأیید می‌کند. این روند کاهشی در سال 2024 نیز ادامه یافته و محدوده‌های ناسالم به لکه‌های محدودتری کاهش یافته‌اند. در این سال تنها بخش‌هایی از شهر اصفهان و شهرستان‌های خور، نائین، اردستان و آران و بیدگل در کلاس ناسالم با مقادیر بیش از 0/55 قرار داشته‌اند که نشان‌دهنده کاهش نسبی شدت و وسعت آلودگی است. در سال 2025 شاخص AAI نسبت به سال قبل افزایش خفیفی را نشان می‌دهد؛ اما همزمان وسعت پهنه‌های آلوده کاهش یافته است. در بخش‌هایی از آران و بیدگل، اردستان و نائین مقادیر شاخص در بازه 0/45-0/65 ثبت شده است؛ درحالی‌که در قسمت‌هایی از تالاب خشک‌شده گاوخونی، شهرستان خور و شهر اصفهان مقادیر بیش از 0/65 مشاهده می‌شود که نسبت به سایر مناطق بالاتر است و همچنان این نواحی را به‌عنوان کانون‌های اصلی تمرکز آئروسل معرفی می‌کند. براساس رفتار فضایی - زمانی شاخص AAI، الگوی آلودگی استان را می‌توان به چهار پهنه عملکردی متمایز تقسیم کرد: 1) پهنه مزمن و کانونی آئروسل (خور و اصفهان + حوضه گاوخونی)، این پهنه با مقادیر پایدار بالا (عمدتاً $0/65 <$ و در برخی سال‌ها $0/82 <$) و تداوم زمانی بالا مشخص می‌شود. وجود شهر اصفهان به‌عنوان کانون شهری - صنعتی و شهرستان خور به‌عنوان ناحیه بیابانی فعال، همراه با تأثیر مستقیم تالاب خشک‌شده گاوخونی، این منطقه را به هسته اصلی تولید و بازپخش آئروسل در مقیاس استانی تبدیل کرده است. این پهنه دارای رفتار کاملاً مزمن و ساختاری است. 2) پهنه فعال ناپایدار (نائین، اردستان، آران و بیدگل و کاشان)، این نواحی دارای نوسانات شدید سالانه و مقادیر متغیر در بازه حدود 0/45 تا 0/65 هستند. این پهنه به‌طور مستقیم تحت تأثیر انتقال گردوغبار از کانون‌های

مرکزی و همچنین شرایط بادهای غالب قرار دارد و ماهیت آن انتقالی - واکنشی (transient reactive zone) است. (3) پهنه گذار (شمال و جنوب استان)، این نواحی دارای شرایط بینابینی بوده و در سال های اوج آلودگی (به ویژه 2022) وارد کلاس ناسالم شده اند؛ اما در سایر سال ها عمدتاً در محدوده نرمال تا سالم قرار دارند. این پهنه نقش واکنش پذیر و وابسته به شرایط سینوپتیکی دارد. (4) پهنه نسبتاً پایدار پاک (ارتفاعات غربی و نواحی کوهستانی)، در این مناطق مقادیر AAI غالباً پایین تر از 0/3 بوده است و در کل دوره زمانی تغییرات حداقلی مشاهده می شود. این رفتار نشان دهنده نقش مؤثر توپوگرافی و پوشش طبیعی در کنترل آتروسول است.

در مجموع، تحلیل چندساله شاخص AAI نشان می دهد که اگرچه استان اصفهان در مقیاس میانگین سالانه وارد کلاس بسیار ناسالم یا خطرناک نشده است، از سال 2022 به بعد به طور مکرر در کلاس ناسالم قرار داشته است. بیشترین مقادیر شاخص به صورت پایدار در شهر اصفهان و شهرستان خور و بیابانک ثبت شده که بیانگر نقش این نواحی به عنوان کانون های اصلی تجمع آتروسول است. همچنین، بررسی الگوی فضایی - زمانی نشان می دهد که تالاب خشک شده گاوخونی در تمامی سال های مطالعه به صورت یک منبع فعال و پایدار گردوغبار عمل کرده و نقش آن صرفاً دوره ای نبوده است؛ بلکه ماهیت مزمن و دائمی در تولید آتروسول منطقه ای دارد.



شکل 5: نقشه شاخص AAI ماهواره Sentinel-5 استان اصفهان

Fig 5: Sentinel-5 satellite AAI index map of Isfahan province

الگوی زمانی و توزیع آماری شاخص‌های آئروسل

باتوجه به آلودگی بالای شهر اصفهان نسبت به سایر مناطق استان اصفهان، تحلیل‌های زمانی و توزیع آماری شاخص‌های AOD و AAI برای این شهرستان به‌صورت ماهانه و فصلی صورت گرفته است. بررسی هم‌زمان شاخص‌های AOD و AAI در بازه زمانی 2020 تا 2025 نشان می‌دهد که سیستم آئروسل در شهر اصفهان از یک رژیم نسبتاً فصلی و کنترل‌شده به یک رژیم پایدار، چندمنبعی و دائماً آلوده تغییر یافته است. این تغییر نه تنها در شدت، در ساختار فصلی، ماهیت فیزیکی - شیمیایی ذرات و طول فصل آلودگی نیز کاملاً مشهود است. به‌طور کلی، این تحول را می‌توان به‌عنوان یک گذار فازی در سامانه جو - سطح تعبیر کرد که تحت تأثیر هم‌زمان خشکسالی، تغییر کاربری زمین و فعال‌شدن کانون‌های گردوغبار داخلی (به‌ویژه تالاب گاوخونی) رخ داده است.

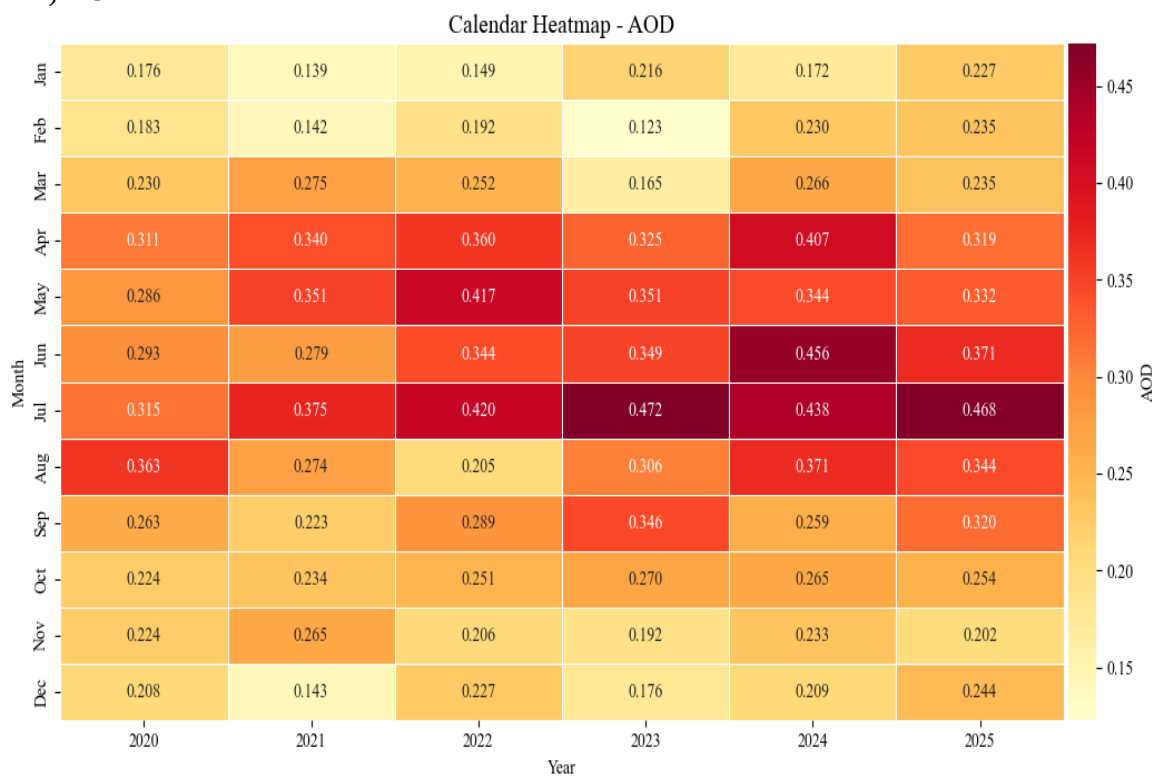
تحلیل نقشه‌حرارتی شاخص AOD: تحلیل نقشه‌حرارتی **شکل 6** نشان می‌دهد سال 2020 (رژیم پایه و کنترل‌شده)، میانگین سالانه AOD حدود 0/21 بوده و ساختار زمانی آن به‌وضوح تابستان‌محور است. وجود پنج ماه با مقادیر کمتر از 0/2 نشان‌دهنده وجود یک پنجره پاکی پایدار زمستانی - بهاری (دسامبر تا آوریل) است که بیانگر عملکرد مؤثر فرآیندهای شستشوی جوی و ورود توده‌های هوای مرطوب غربی است. اوج آلودگی در اوت (0/363) ثبت شده است که عمدتاً ماهیت فصلی و گذرا دارد و هنوز نشانه‌ای از رژیم دائمی آلودگی دیده نمی‌شود. سال 2021 (آغاز انتقال رژیم)، در این سال میانگین AOD به 0/25 افزایش می‌یابد. مهم‌ترین تغییر، جابجایی فصلی اوج آلودگی از اواخر تابستان به اوایل تابستان (ژوئیه: 0/375) است. این جابه‌جایی نشان‌دهنده آغاز ورود زود هنگام ریزگردهای منطقه‌ای و افزایش نقش منابع غیرشهری است؛ با این حال، پایداری مقادیر پایین در زمستان نشان می‌دهد که سیستم هنوز از حالت طبیعی خارج نشده است. سال 2022 (نقطه شکست سیستم)، این سال را می‌توان نقطه گذار ساختاری (system tipping point) در نظر گرفت. میانگین سالانه به 0/29 افزایش می‌یابد و یک جهش غیرعادی در مه (0/417) ثبت می‌شود. این افزایش ناگهانی را می‌توان به فعال‌شدن کانون‌های داخلی گردوغبار ناشی از خشکسالی انباشته و خشکیدگی تالاب گاوخونی نسبت داد. در این مرحله، سیستم از یک رژیم صرفاً فصلی به یک رژیم ترکیبی (فصلی - منطقه‌ای) وارد می‌شود. سال 2023 (گذار به رژیم بحرانی)، در این سال میانگین AOD به 0/35 می‌رسد و بیشینه مطلق در ژوئیه (0/472) ثبت می‌شود. مهم‌تر از مقدار، تغییر ساختار زمانی آلودگی است؛ به‌گونه‌ای که فصل آلودگی به سپتامبر نیز گسترش می‌یابد. حذف کامل ماه‌های کمتر از 0/2 نشان می‌دهد که پس‌زمینه جوی دیگر هرگز به شرایط پاک باز نمی‌گردد. سال 2024 (تثبیت رژیم آلوده)، میانگین سالانه در حدود 0/34 تثبیت می‌شود. نکته کلیدی این سال، حذف کامل پنجره پاکی و گسترش فصل آلوده به حدود 7 ماه (آوریل تا اکتبر) است. این وضعیت نشان‌دهنده تبدیل آلودگی از یک پدیده episodic به یک ویژگی ساختاری اقلیم محلی است. سال 2025 (نفوذ آلودگی به فصل سرد)، در این سال، شاخص ژانویه به 0/227 می‌رسد (افزایش 29٪ نسبت به 2020). این موضوع نشان می‌دهد که حتی در فصل زمستان نیز، وارونگی دمایی دیگر بر یک پس‌زمینه آلوده دائمی عمل می‌کند؛ بنابراین، آلودگی از حالت «تابستانی - فصلی» به حالت تمام‌فصل (all-season regime) تبدیل شده است.

افزایش حدود 62٪ در میانگین سالانه و کاهش شدید پنجره پاکی از 5 ماه به کمتر از 1 ماه نشان‌دهنده یک گذار بازگشت‌ناپذیر در رژیم آئروسول شهری اصفهان است. این تغییر بیانگر آن است که سیستم از حالت کنترل‌شده اقلیمی به یک سیستم مزمن با بار پایه بالا (elevated baseline pollution state) وارد شده است.

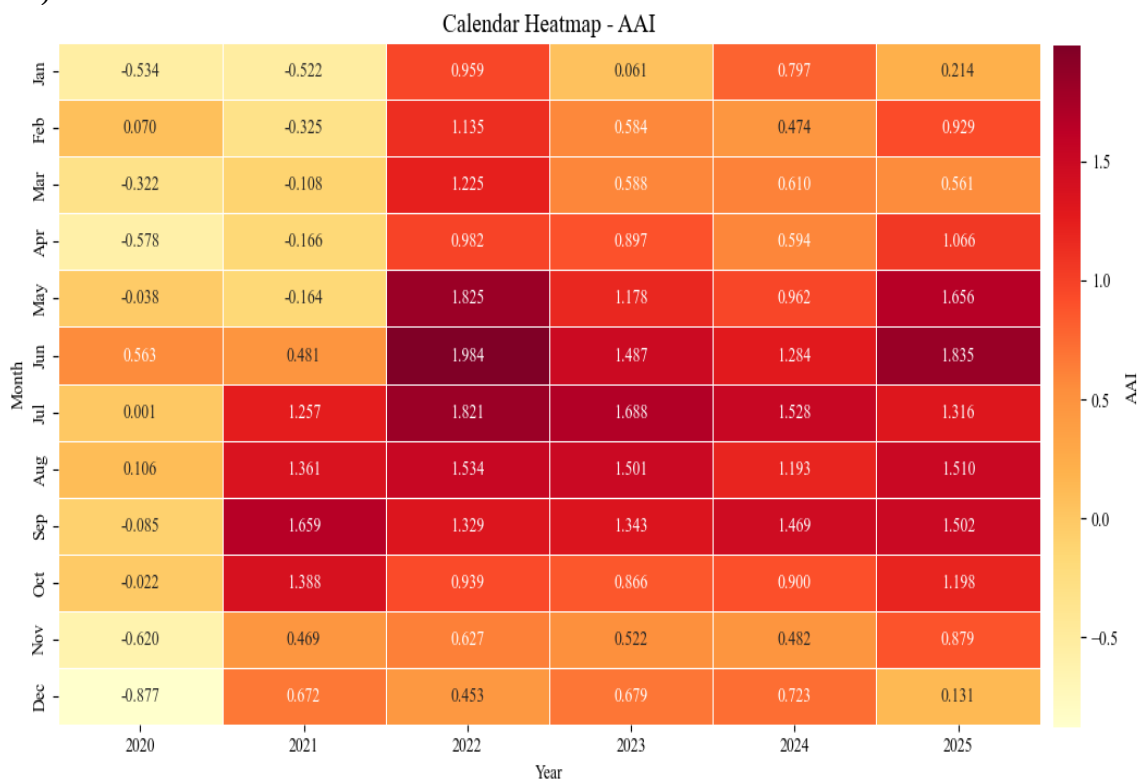
تحلیل نقشه‌حرارتی شاخص AAI: تحلیل نقشه حرارتی شاخص AAI در شکل 6 نشان‌دهنده تغییرات ماهیت نوری و شیمیایی آئروسول‌ها است و امکان تفکیک بین منابع شهری (سولفاتی) و منابع گردوغبار (معدنی) را فراهم می‌کند. سال 2020 (غلبه آئروسول‌های پراکنده‌کننده)، در این سال میانگین AAI حدود 0/4- بوده است و سیستم در حالت غالباً پراکنده‌کننده قرار دارد. این وضعیت نشان‌دهنده غلبه آئروسول‌های ثانویه شهری (سولفات‌ها و نترات‌ها) است. مقدار بسیار پایین در دسامبر (0/87-) بیانگر شرایط جوی نسبتاً پاک و عدم حضور ذرات معدنی جذبی است. سال 2021 (شروع چرخش شیمیایی)، در این مرحله یک تغییر علامت ساختاری رخ می‌دهد. AAI در ژوئیه به 1/25+ جهش کرده است و در سپتامبر و اکتبر نیز مقادیر بالا تثبیت می‌شود. این تغییر نشان‌دهنده آغاز غالب شدن ذرات معدنی بیابانی (dust-dominated aerosols) است. این مرحله را می‌توان آغاز گذار از رژیم صنعتی به رژیم گردوغباری دانست. سال 2022 (بحران جذبی و تغییر منبع غالب)، میانگین سالانه به 1/1 می‌رسد و مقادیر بسیار بالا در مه (1/82)، ژوئن (1/98) و ژوئیه (1/82) ثبت می‌شود. این مقادیر نشان‌دهنده غلبه کامل ذرات معدنی مانند همتایت، کانی‌های رسی و گردوغبار بیابانی است. در این مرحله، سیستم دیگر تحت کنترل منابع شهری نیست؛ بلکه تحت سلطه کانون‌های طبیعی - تخریبی سطح زمین قرار دارد. سال‌های 2023-2024 (تثبیت رژیم جذبی دائمی)، در این دوره برای نخستین بار، تمام ماه‌ها دارای مقادیر مثبت AAI هستند. این موضوع بیانگر شکل‌گیری یک پس‌زمینه دائمی گردوغبار جذبی در جو اصفهان است. میانگین سالانه در 2023 و 2024 به ترتیب 0/85 و 0/78 ثبت شده و نشان‌دهنده کاهش نسبی شدت اما عدم بازگشت به شرایط پایه است. به بیان دیگر، سیستم وارد حالت تعادل جدید آلوده (new polluted equilibrium) شده است. سال 2025 (پایداری رژیم جدید)، در این سال نیز مقادیر بالا در ماه‌های گرم (1/65 در مه و 1/83 در ژوئن) نشان‌دهنده تداوم رژیم جذبی است. میانگین سالانه حدود 0/9+ باقی مانده و هیچ نشانه‌ای از بازگشت به شرایط منفی مشاهده نمی‌شود.

ادغام نتایج دو شاخص نشان می‌دهد که سیستم آئروسول اصفهان طی دوره 2020-2025 دچار یک گذار فازی غیرخطی (non-linear regime shift) شده است که دارای چهار ویژگی کلیدی است: (1) حذف تدریجی پنجره پاکی جوی: کاهش ماه‌های کم‌آلودگی از 5 ماه به تقریباً صفر. (2) افزایش هم‌زمان بار کل و ماهیت جذبی: افزایش AOD همراه با مثبت‌شدن پایدار AAI نشان‌دهنده تغییر هم‌زمان کمیت و کیفیت آئروسول‌ها است. (3) تغییر منبع غالب از شهری به طبیعی - تخریبی: غلبه گردوغبار بیابانی ناشی از کانون‌های داخلی، به‌ویژه تالاب گاوخونی. (4) شکل‌گیری رژیم جدید اقلیمی - آئروسول: سیستم از حالت فصلی به یک رژیم دائمی آلوده (permanent polluted atmospheric state) تبدیل شده است.

A) AOD



B) AAI



شکل 6: تحلیل نقشه‌حرارتی شاخص‌های AOD و AAI شهر اصفهان در بازه زمانی 2020-2025

Fig 6: Heat map analysis of AOD and AAI indices of Isfahan city in the period 2020-2025

تحلیل آماری توزیع فراوانی شاخص AOD: بررسی هیستوگرام و منحنی KDE شاخص AOD در شکل 7 نشان می‌دهد که توزیع این شاخص دارای ساختار دووجهی (Bimodal) معنادار و پایدار است که از نظر دینامیک جو بیانگر وجود دو جاذب پایدار در سامانه آئروسول اصفهان است. این ویژگی نشان می‌دهد که سیستم در یک حالت تعادل واحد قرار ندارد؛ بلکه بین دو وضعیت پایدار با ویژگی‌های فیزیکی متفاوت در نوسان است و درواقع رفتار آن ماهیت غیرخطی و شبه‌فازی دارد. قله اول توزیع با بیشترین فراوانی (۶ تکرار) در بازه 0/22 تا 0/25 AOD قرار دارد که بیانگر حالت پایه جدید جو اصفهان است. این سطح نشان می‌دهد که حتی در وضعیت غالب، سیستم در شرایطی بالاتر از اقلیم‌های پاک تثبیت شده است و در محدوده ناسالم برای گروه‌های حساس قرار دارد. نکته مهم این است که در اقلیم‌های پاک، قله اصلی معمولاً در مقادیر کمتر از 0/1 شکل می‌گیرد؛ درحالی‌که در اینجا نقطه تعادل به‌طور کامل جابه‌جا شده است. درمقابل، قله دوم در بازه 0/34 تا 0/36 با فراوانی مشابه مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده یک رژیم دوم پایدار و تکرارشونده در شرایط بسیار آلوده است. فاصله قابل توجه بین این دو قله (حدود 0/12 واحد) نشان می‌دهد که انتقال بین این دو وضعیت تدریجی نیست؛ بلکه سیستم دارای دو حالت پایدار مجزا با یک سد انرژی مشخص است و رفتار آن را می‌توان در چارچوب سیستم‌های bistable تفسیر کرد. در ناحیه دم راست توزیع، اگرچه فراوانی رخدادها کمتر است، ساختار آماری بسیار مهمی دیده می‌شود. چولگی مثبت و کشیدگی دم راست نشان می‌دهد که سیستم توانایی تولید رخداد‌های حدی دارد و توزیع دارای دنباله سنگین است. نکته مهم‌تر آن است که منحنی KDE در بازه 0/42 تا 0/48 کاهش یکنواخت ندارد و افزایش جزئی نشان می‌دهد که احتمال رخداد‌های بسیار شدید در حال تقویت است. درمقابل، دم چپ توزیع به‌شدت تضعیف شده است و مقادیر 0/1 تا 0/2 به رخداد‌های نادر تبدیل شده‌اند؛ به‌گونه‌ای که شرایط پاک عملاً از توزیع حذف شده است و حالت مرجع اقلیمی دیگر در سیستم مشاهده نمی‌شود.

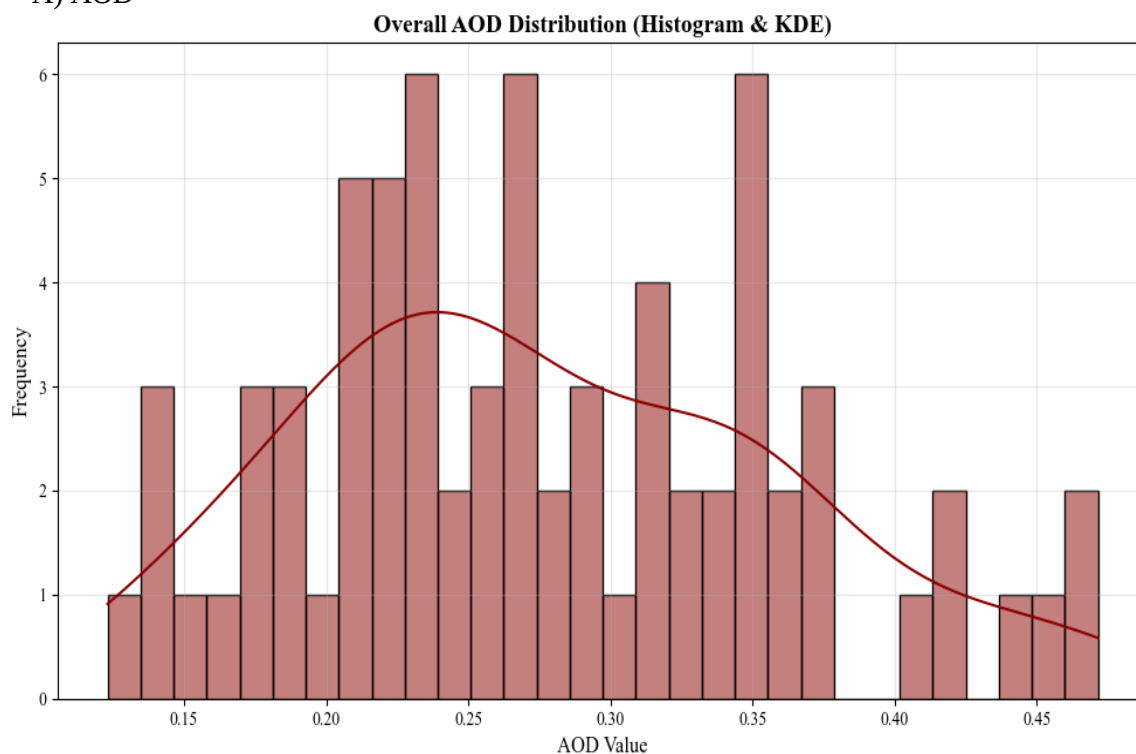
درنتیجه، توزیع AOD نشان می‌دهد که سامانه آئروسول به یک سیستم دوپایدار با چولگی مثبت و دم سنگین راست تبدیل شده است که در آن احتمال انتقال از حالت متوسط به آلوده بسیار بیشتر از بازگشت به شرایط پاک است و ریسک رخداد‌های حدی به‌طور سیستماتیک در حال افزایش است. این وضعیت بیانگر یک گذار ساختاری در سیستم اقلیمی از تعادل تک‌حالت به تعادل دوحالت ناپایدار است.

تحلیل آماری توزیع فراوانی شاخص AAI: برخلاف AOD، توزیع AAI دارای ساختار پهن‌دوش تک‌قله (broad unimodal) است که نشان‌دهنده وجود یک رژیم غالب اما گسترده از آئروسول‌های جذبی در کل دوره مطالعه است. این ویژگی بیانگر آن است که سیستم وارد یک حالت گیرافتاده شده است که در آن ذرات جذبی به جای رخداد‌های مقطعی، به یک ویژگی پایدار جوی تبدیل شده‌اند. قله اصلی توزیع در بازه 0/5 تا 0/7 با بیشترین فراوانی (۷ تکرار) قرار دارد که بیانگر حالت غالب ناسالم برای عموم و تسلط ذرات جاذب نور است. نبود تمرکز در مقادیر پایین نشان می‌دهد که رژیم پاک جذبی تقریباً از سیستم حذف شده است و پس‌زمینه جوی دائماً در وضعیت آلوده باقی می‌ماند. در بازه 0/9 تا 1/1 نیز یک شانه آماری مشخص با حدود ۵ تکرار مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده ورود

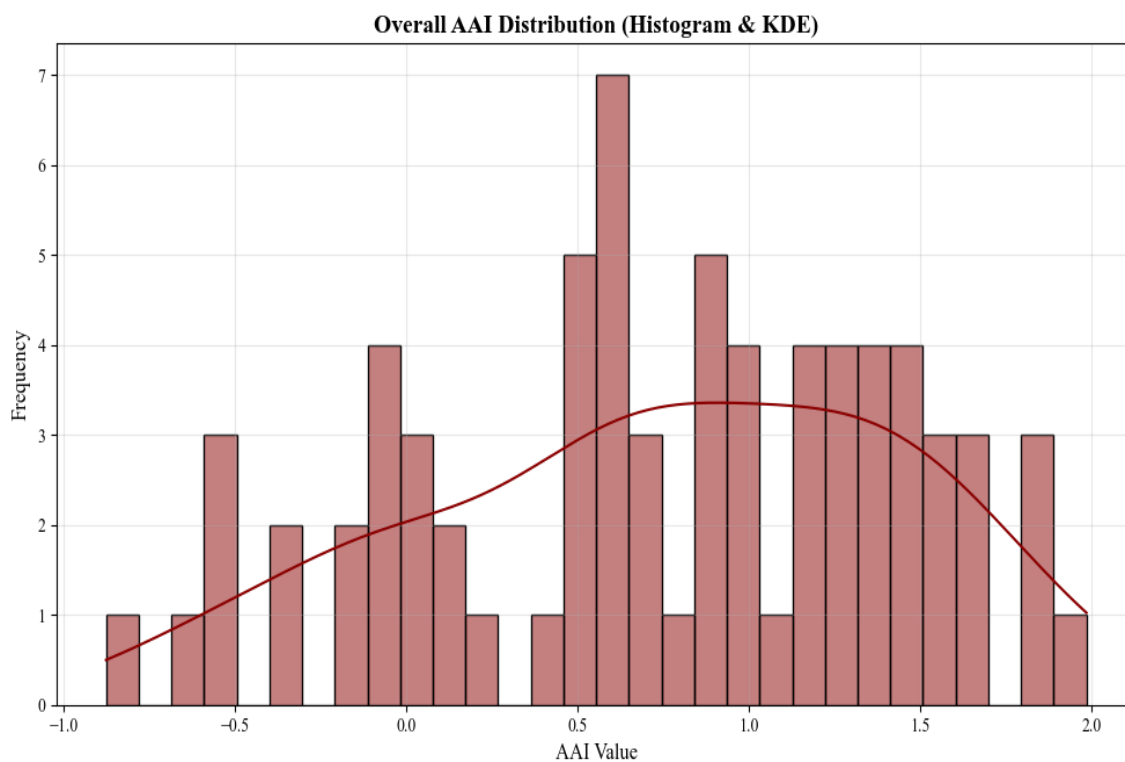
مکرر سیستم به وضعیت بسیار آلوده است. نزدیکی این شانه به قله اصلی نشان می‌دهد که مرز انرژی مشخصی بین وضعیت‌ها وجود ندارد و سیستم به راحتی بین حالت‌های آلوده جابه‌جا می‌شود. منحنی KDE در این شاخص برخلاف انتظار دارای یک فلات پهن در بازه 0/5 تا 1/5 است که از نظر آماری بیانگر پایداری زمانی بالا و وجود یک پس‌زمینه دائمی از آئروسول‌های جذبی است. این ویژگی نشان می‌دهد که آلودگی در قالب رخدادهای کوتاه مدت عمل نمی‌کند؛ بلکه به یک وضعیت پایدار و مستمر در جو تبدیل شده است. در ناحیه دم راست، حضور مقادیر بسیار بالا در بازه 1/8 تا 2 نشان‌دهنده رخدادهای حدی شدید است که در سال‌های اولیه تقریباً وجود نداشتند؛ اما در سال‌های پایانی به طور چشمگیری افزایش یافته‌اند. این موضوع بیانگر افزایش ریسک اقلیمی و تقویت شدت رخدادهای گردوغبار است. در مقابل، دم چپ توزیع که در سال 2020 شامل مقادیر منفی قابل توجه بود، در توزیع نهایی تقریباً حذف شده است که نشان‌دهنده فروپاشی کامل رژیم پراکنده‌کننده و غلبه کامل رژیم جذبی است؛ در نتیجه، توزیع AAI نشان می‌دهد که سیستم به یک حالت پایدار آلوده وارد شده است که در آن ذرات جذبی دیگر پدیده‌ای گذرا نیستند؛ بلکه به جزء دائمی ساختار جوی تبدیل شده‌اند و احتمال رخدادهای فوق‌بحرانی به صورت تدریجی در حال افزایش است.

ادغام نتایج دو شاخص نشان می‌دهد که سیستم آئروسول شهر اصفهان طی دوره 2020 تا 2025 دچار یک گذار غیرخطی و ساختاری در مقیاس اقلیمی شده است که هم در کمیت و هم در کیفیت آئروسول‌ها قابل مشاهده است. از یک سو، AOD نشان‌دهنده وجود دو رژیم پایدار مجزا است که بیانگر نوسان سیستم بین یک حالت متوسط و یک حالت بسیار آلوده است؛ در حالی که از سوی دیگر AAI نشان می‌دهد که ماهیت آئروسول‌ها به طور کلی به سمت رژیم جذبی پایدار و پهن دامنه تغییر کرده است. این هم‌زمانی نشان می‌دهد که سیستم نه تنها از نظر شدت آلودگی دچار تغییر شده، از نظر ماهیت فیزیکی و شیمیایی نیز وارد یک رژیم جدید شده است که در آن ذرات جذبی به عنوان یک پس‌زمینه دائمی در جو حضور دارند. در چنین شرایطی، حتی در حالت‌های نسبی بهبود AOD، کیفیت اپتیکی جو همچنان تحت سلطه آئروسول‌های جذبی باقی می‌ماند و این موضوع بیانگر قفل‌شدگی سیستم در یک وضعیت آلوده پایدار است. در نهایت، این تغییرات نشان می‌دهد که سامانه اقلیمی - آئروسول اصفهان از یک رژیم فصلی و پیش‌بینی‌پذیر به یک رژیم دائمی، غیرخطی و با ریسک بالای رخدادهای حدی تبدیل شده است؛ به گونه‌ای که هم احتمال وقوع آلودگی‌های شدید افزایش یافته و هم بازگشت به شرایط پاک عملاً از ساختار آماری سیستم حذف شده است.

A) AOD



B) AAI



شکل 7: تحلیل آماری توزیع فراوانی شاخص‌های AOD و AAI شهر اصفهان در بازه زمانی 2020-2025

Figure 7: Statistical analysis of the frequency distribution of AOD and AAI indices in Isfahan city in the period 2020-2025

تحلیل سری زمانی و روند شاخص AOD: بررسی سری زمانی شاخص AOD در شکل 8 نشان می‌دهد که دینامیک آلودگی در منطقه تحت مطالعه را نمی‌توان به‌عنوان یک فرآیند ایستا یا خطی تفسیر کرد؛ بلکه سیستم از سه مؤلفه اصلی شامل نوسانات کوتاه‌مدت فصلی، تغییرات میان‌مدت (میانگین متحرک) و روند بلندمدت غیرخطی تشکیل شده است که به‌صورت هم‌زمان اما با ماهیت‌های متفاوت عمل می‌کنند. این ساختار سه‌لایه نشان‌دهنده یک سامانه جوی غیرایستا (non-stationary system) با پاسخ وابسته به مقیاس زمانی است. در مؤلفه نوسانات کوتاه‌مدت، الگوی شبه‌سینوسی کاملاً پایدار با چرخه سالانه مشخص مشاهده می‌شود که شامل قله‌های تابستانه و کف‌های زمستانه است. این الگو بیانگر کنترل قوی چرخه‌های فصلی بر تولید و انتقال آئروسول‌ها است؛ با این حال، آنچه از نظر دینامیکی اهمیت دارد، تغییر سیستماتیک دامنه نوسان (amplitude modulation) در طول زمان است. دامنه نوسان از حدود 0/22 در سال 2020 (0/14 تا 0/36) به حدود 0/33 در سال 2023 (0/17 تا 0/47) و سپس به حدود 0/31 در سال 2025 (0/23 تا 0/46) افزایش یافته است که معادل رشد تقریبی ۵۰ درصدی نسبت به دوره ابتدایی است. این افزایش نشان می‌دهد که سیستم به‌طور تدریجی از یک رژیم کم‌حساس به یک رژیم بیش‌پاسخ‌گو (highly responsive regime) نسبت به عوامل فصلی تبدیل شده است؛ به‌طوری‌که همان محرک‌های اقلیمی اکنون پاسخ‌های بسیار شدیدتری تولید می‌کنند. در کنار آن، افزایش پایدار کف زمستانه (winter baseline) یکی از مهم‌ترین نشانه‌های تغییر رژیم است. کف زمستانه از 0/14 در سال 2020 به 0/17 در سال 2023 (۲۱٪ افزایش) و سپس به 0/23 در سال 2025 (۶۴٪ افزایش نسبت به مبنا) رسیده است. این روند نشان می‌دهد که حتی در شرایط بیشینه شستشوی جوی (precipitation-driven scavenging)، سیستم دیگر قادر به بازگشت به حالت پاک اولیه نیست و یک بار پایه دائمی از آئروسول‌ها در جو تثبیت شده است که نشان‌دهنده شکست در مکانیزم توان طبیعی جو برای پاک‌سازی خودش از آلاینده‌ها (self-cleaning) اتمسفر است. در مؤلفه میانگین متحرک ۱۲ ماهه، سه فاز دینامیکی کاملاً متمایز قابل شناسایی است. در فاز اول (2020 تا میانه 2022)، سیستم در یک حالت شبه‌تعادل پایدار با خط پایه 0/23 تا 0/25 قرار دارد که نشان‌دهنده یک رژیم ایستای نسبی است. در فاز دوم (میانه 2022)، یک جهش ناگهانی (abrupt shift) به حدود 0/28 رخ می‌دهد که از نظر آماری یک structural break point محسوب می‌شود و نشان‌دهنده عبور سیستم از یک آستانه بحرانی است. در فاز سوم (2024 تا 2025)، تثبیت در سطح جدید 0/29 تا 0/30 مشاهده می‌شود که همراه با شیب مثبت ملایم است. نکته کلیدی این است که سیستم پس از گذار، هرگز به رژیم پیشین باز نمی‌گردد که این امر نشان‌دهنده وقوع یک regime shift بازگشت‌ناپذیر (irreversible regime transition) است.

در روند کلی (trend line)، افزایش از 0/245 در ابتدای 2020 به 0/305 در انتهای 2025 معادل رشد مطلق 0/06 واحد یا حدود 24/5٪ افزایش نسبی است. نرخ رشد سالانه حدود 4/1٪ و شیب خطی حدود 0/01 واحد در سال برآورد می‌شود؛ با این حال، نکته مهم این است که این روند خطی تنها نمای سطحی تغییرات را نشان می‌دهد؛ درحالی‌که دینامیک واقعی سیستم شامل یک نقطه شکست غیرخطی در سال 2022 است که ماهیت کل سیستم را تغییر داده است. AOD نشان می‌دهد که سیستم در سه بعد هم‌زمان دچار تغییر شده است: افزایش خط پایه، افزایش دامنه نوسان و افزایش کف زمستانه. ترکیب این سه ویژگی بیانگر گذار از یک رژیم فصلی پیش‌بینی‌پذیر به یک رژیم

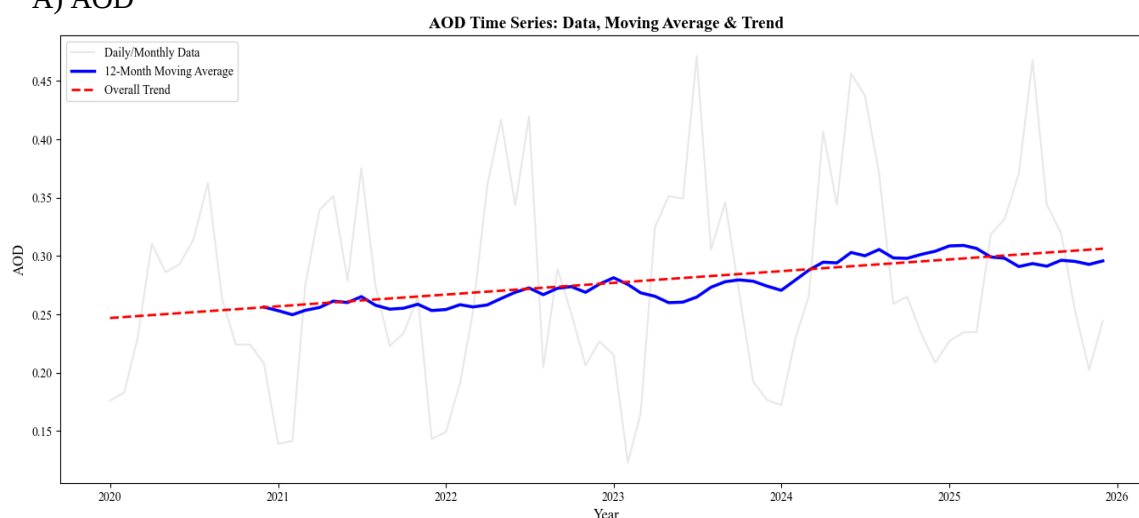
غیرخطی، حساس و نیمه‌پایدار است که در آن پاسخ سیستم به عوامل اقلیمی تقویت شده و حافظه اقلیمی (memory) در حال شکل‌گیری است.

تحلیل سری زمانی و روند شاخص AAI: برخلاف AOD که یک گذار تدریجی با شکست ساختاری را نشان می‌دهد، سری زمانی AAI بیانگر یک گذار فازی گسسته و غیرپیوسته (discrete phase transition) است که ماهیت سیستم را به‌طور بنیادی تغییر داده است. در این شاخص، به‌جای تغییر تدریجی، یک جهش ناگهانی از رژیم پراکنده‌کننده به رژیم جذبی مشاهده می‌شود. در مؤلفه نوسانات کوتاه‌مدت، مهم‌ترین ویژگی تغییر در پایداری زمانی (temporal persistence) است. در سال‌های 2020-2021، رویدادهای AAI دارای پهنای زمانی محدود (۳۰ تا ۴۵ روز) هستند که نشان‌دهنده اپیزودیک بودن آلودگی است؛ اما از سال 2022 به بعد، پهنای این قله‌ها به ۹۰ تا ۱۲۰ روز افزایش یافته که بیانگر سه برابر شدن ماندگاری آئروسول‌های جذبی در جو است. این افزایش ماندگاری (پایداری زمانی) نشان می‌دهد که سیستم از حالت «رویدادمحور» به حالت «پس‌زمینه دائمی» تغییر یافته است. ویژگی دوم، حذف کامل مقادیر منفی است. در سال 2020، AAI دارای مقادیر منفی قابل توجه (تا حدود ۰/۹-) بوده که نشان‌دهنده غلبه پراکندگی نوری و آئروسول‌های غیرجذبی است؛ اما پس از 2022، این مقادیر به‌طور کامل حذف شده‌اند که بیانگر فروپاشی رژیم فیزیکی قبلی و جایگزینی آن با رژیم جدید است. این تغییر از نظر فیزیک جو به معنای تغییر در رژیم سپیدایی تک‌پراکندگی و غلبه ذرات جاذب (آئروسول‌های جذبی) است. ویژگی سوم، افزایش دامنه نوسان از حدود ۱/۲ در ابتدای دوره به حدود ۱/۸ در سال‌های پایانی است که نشان‌دهنده افزایش انرژی درونی سیستم و تشدید رخداد‌های حادی است. در مؤلفه میانگین متحرک ۱۲ ماهه، گذار سیستم به‌صورت بسیار واضح قابل مشاهده است. سیستم از مقادیر نزدیک صفر در سال 2020، با شیب بسیار تند در بازه 2021-2022 (بیش از ۰/۱ واحد در ماه) به سطح جدید ۰/۷ تا ۰/۹ تثبیت شده است. نکته کلیدی این است که پس از گذار، خط پایه جدید هرگز به زیر ۰/۵ باز نمی‌گردد که نشان‌دهنده تشکیل یک عامل جدید پایدار در فضای حالت سیستم است. از نظر تئوری سیستم‌های پیچیده، این رفتار معادل یک دوشاخه‌شوندگی نقطه‌ای (دوشاخه‌شوندگی بحرانی) است که در آن سیستم از یک حالت پایدار به حالت پایدار جدید با ویژگی‌های کاملاً متفاوت جهش کرده است. این تغییر نه تنها کمی بلکه کیفی است؛ زیرا ماهیت فیزیکی آئروسول‌ها نیز از حالت پراکنده‌کننده به حالت جذبی تغییر کرده است. در روند کلی، افزایش از تقریباً صفر در ابتدای دوره به حدود ۱.۳-۱.۵ در انتهای دوره نشان‌دهنده رشد بسیار شدید (effectively infinite relative growth) است. نرخ رشد سالانه حدود ۰/۲۳ واحد برآورد می‌شود که چندین برابر بزرگ‌تر از AOD است. نکته مهم این است که این روند را نمی‌توان با مدل خطی توضیح داد و بهترین برازش مربوط به مدل‌های پله‌ای یا لجستیک است که وجود یک آستانه بحرانی را تأیید می‌کنند.

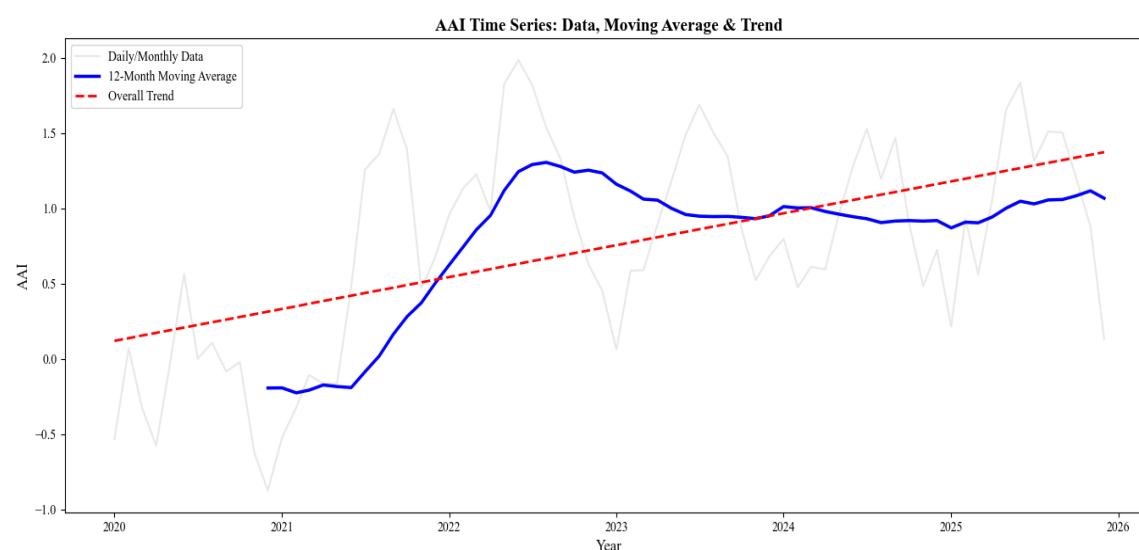
AAI نشان‌دهنده یک تغییر رژیم کامل در سیستم آئروسول است که در آن نه تنها شدت، ماهیت فیزیکی ذرات نیز تغییر کرده است. سیستم از یک حالت پراکنده‌کننده به یک رژیم جذبی پایدار منتقل شده و در این حالت جدید تثبیت شده است که ویژگی اصلی آن پایداری بالا، حذف بازگشت‌پذیری و افزایش ماندگاری زمانی است.

مقایسه دو شاخص نشان می‌دهد که سیستم آئروسول منطقه تحت مطالعه دچار یک گذار غیرخطی دوگانه شده است؛ به‌طوری‌که AOD بیانگر تغییرات تدریجی همراه با نقطه شکست ساختاری است؛ درحالی‌که AAI نشان‌دهنده یک انتقال فازی کامل و ناگهانی است. از نظر کمی، AOD حدود 24/5٪ رشد داشته است؛ درحالی‌که AAI از مقادیر نزدیک صفر به بیش از 1/3 افزایش یافته که بیانگر تغییر چندبرابری در مقیاس مطلق است. از نظر دینامیکی، AOD نشان‌دهنده افزایش تدریجی خط پایه و حساسیت فصلی است؛ درحالی‌که AAI نشان‌دهنده تشکیل یک رژیم جدید پایدار با ویژگی‌های کاملاً متفاوت فیزیکی - شیمیایی است. در نتیجه، سیستم از یک رژیم فصلی قابل پیش‌بینی به یک رژیم پایدار اما آلوده با حافظه اقلیمی قوی تبدیل شده است که بازگشت به شرایط اولیه در آن بسیار بعید است.

A) AOD



B) AAI



شکل 8: تحلیل سری زمانی و روند شاخص‌های AOD و AAI شهر اصفهان در بازه زمانی 2020-2025

Fig 8: Time series analysis and trend of AOD and AAI indices of Isfahan city in the period 2020-2025

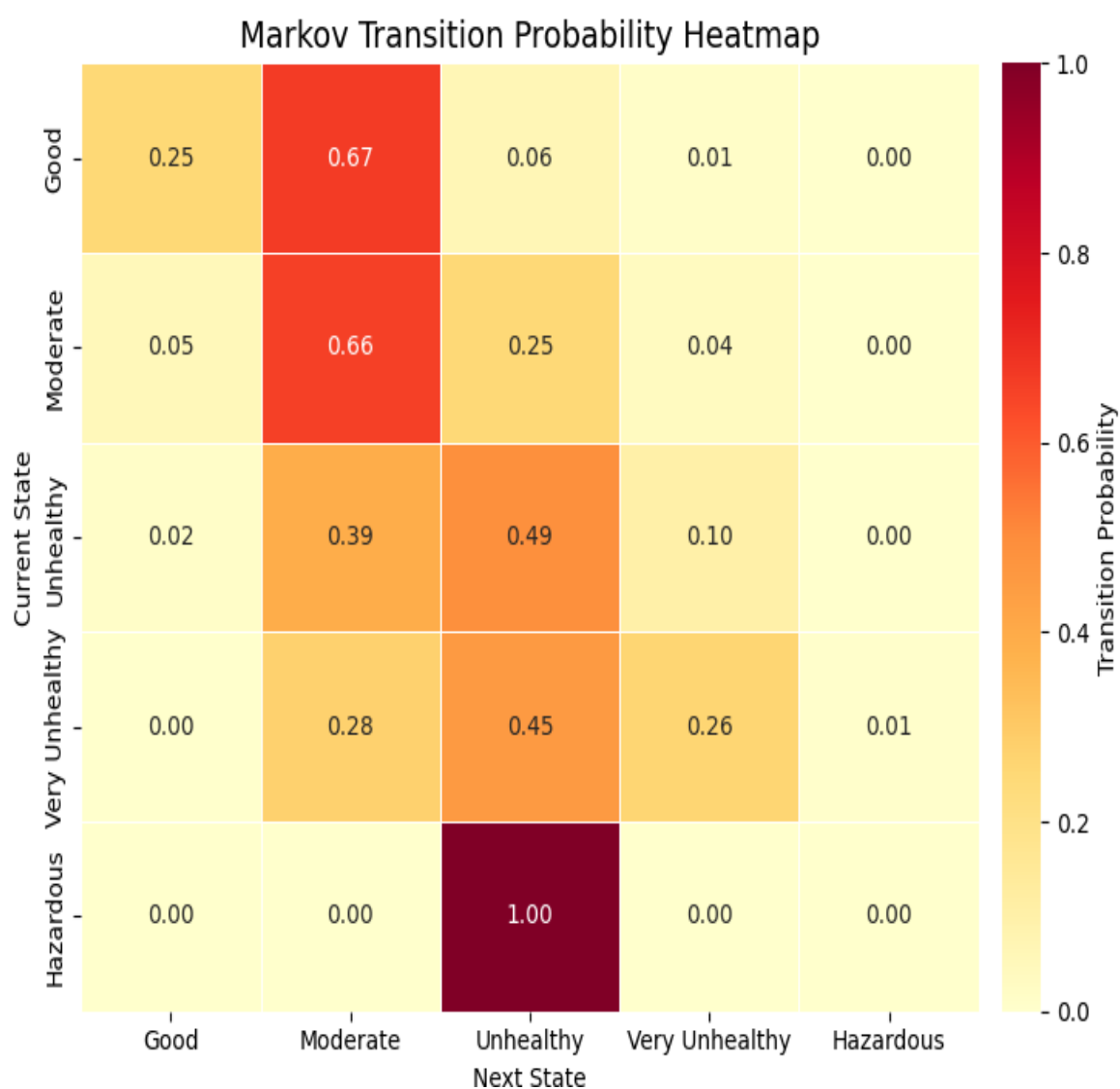
تحلیل مارکوفی پایداری و انتقال کلاس‌های آلودگی

بررسی ماتریس انتقال روزانه کلاس‌های آلودگی شاخص AOD و احتمالات پایدار استخراج شده از آن در شکل 9 نشان می‌دهد که سامانه آلودگی هوای شهر اصفهان دارای ساختاری غیرخطی، حافظه‌دار و به شدت ناهمسان است که رفتار آن را نمی‌توان با فرض استقلال زمانی یا پویایی تصادفی ساده توضیح داد. این ساختار بیانگر وجود دو جاذب اصلی در سطوح «متوسط» و «ناسالم» است؛ درحالی‌که وضعیت «پاک» عملاً یک حالت ناپایدار و گذرا در سیستم محسوب می‌شود. در تحلیل پایداری درون‌کلاسی، مقادیر روی قطر اصلی ماتریس نشان می‌دهد که کلاس «متوسط» با احتمال ۶۶٪ بیشترین پایداری را دارد و به عنوان جاذب اصلی سیستم عمل می‌کند؛ به این معنا که شرایط غالب جوی پس از یک روز متوسط، با احتمال دو سوم در همان وضعیت باقی می‌ماند. کلاس «ناسالم» نیز با احتمال ۹/۸٪ پایداری چشمگیری دارد که نشان می‌دهد این سطح از آلودگی نه یک وضعیت لحظه‌ای، بلکه یک حالت نسبتاً ماندگار است. درمقابل، کلاس «بسیار ناسالم» با ۲/۲۶٪ و کلاس «خطرناک» با ۶/۲۶٪ اگرچه کمتر تکرار می‌شوند؛ اما در صورت وقوع توانایی تداوم چندروزه دارند.

در نقطه مقابل، کلاس «پاک» با تنها ۲۳٪ کمترین پایداری را دارد و نشان می‌دهد که وضعیت هوای پاک در این سامانه به شدت ناپایدار است و به سرعت به سطوح آلوده‌تر انتقال می‌یابد. در بررسی ناهمسانی گذارها، ماتریس انتقال یک گرایش واضح به سمت تشدید آلودگی را آشکار می‌سازد. انتقال از «پاک» به «متوسط» با احتمال ۶۷٪ نشان می‌دهد که حتی شرایط پاک نیز به سرعت وارد وضعیت آلوده‌تر می‌شود. در سطح «متوسط»، حدود ۲۵٪ از روزها به «ناسالم» منتقل می‌شوند؛ درحالی‌که تنها حدود ۹٪ امکان بازگشت به وضعیت پاک دارند که این عدم تقارن، نشان‌دهنده تمایل سه‌برابری سیستم به سمت تشدید آلودگی نسبت به بهبود آن است. در کلاس «ناسالم»، اگرچه حدود ۴۰٪ از وضعیت‌ها به «متوسط» باز می‌گردند؛ اما این بازگشت به سطح پاک منجر نمی‌شود و سیستم در یک حلقه نیمه‌آلوده باقی می‌ماند. در سطوح بالاتر نیز رفتار مشابهی مشاهده می‌شود؛ به گونه‌ای که در کلاس «بسیار ناسالم» حدود ۷/۷۲٪ از انتقال‌ها به سطح پایین‌تر (ناسالم) انجام می‌شود و احتمال حرکت مستقیم به وضعیت پاک تقریباً صفر است. در کلاس «خطرناک» نیز سیستم عمدتاً به سطوح پایین‌تر اما همچنان آلوده باز می‌گردد و مسیر بازگشت به پاک عملاً وجود ندارد.

در تحلیل احتمالات پایدار، توزیع بلندمدت نشان می‌دهد که تنها ۵/۴٪ از روزها در وضعیت «پاک» قرار دارند؛ درحالی‌که ۱۵۴٪ در وضعیت «متوسط»، ۸/۳۳٪ در وضعیت «ناسالم» و ۵/۷٪ در وضعیت «بسیار ناسالم» تثبیت می‌شوند و وضعیت «خطرناک» کمتر از ۱٪ را شامل می‌شود. این توزیع نشان می‌دهد که در مجموع بیش از ۸۸٪ از روزهای سال در شرایط «متوسط تا بسیار ناسالم» سپری می‌شود و هوای واقعاً پاک تنها در بخش بسیار کوچکی از سال مشاهده می‌شود. از منظر میانگین وزنی نیز مقدار حدود ۷/۲ به دست می‌آید که بیانگر قرارگیری وضعیت غالب سیستم در مرز بین «متوسط» و «ناسالم» است. از دیدگاه نظریه سیستم‌های پیچیده، این ساختار نشان‌دهنده یک سیستم دارای دو جاذب پایدار و یک مسیر یک‌طرفه تشدید آلودگی است. وجود حافظه زمانی در گذارها، ناهمسانی شدید در انتقال‌ها و نبود مسیر مؤثر بازگشت از سطوح بالا به وضعیت پاک، بیانگر شکل‌گیری یک «تله آلودگی» است که در آن ورود به سطوح بالاتر آلودگی، عملاً به بازگشت کامل به شرایط اولیه منجر نمی‌شود و تنها به نوسان در سطوح نیمه‌آلوده ختم می‌شود.

درنهایت، این تحلیل نشان می‌دهد که نقطه بحرانی سیستم در کلاس «متوسط» قرار دارد؛ زیرا این کلاس بیشترین سهم روزها و بالاترین نقش انتقالی به سطوح آلوده‌تر را دارد. همچنین، ساختار گذارها به گونه‌ای است که احتمال تشدید آلودگی به‌طور معناداری بیشتر از احتمال بهبود آن است و مسیر طبیعی بازگشت به وضعیت پاک در سیستم تقریباً حذف شده است؛ درنتیجه، مدیریت کیفیت هوا در این منطقه نیازمند رویکردی ساختاری است که به‌جای تمرکز بر رخدادهای بحرانی، بر کاهش احتمال گذار از «متوسط» به «ناسالم» و بازسازی مسیرهای بازگشت به وضعیت پاک تمرکز داشته باشد.



شکل 9: ماتریس احتمال انتقال روزانه کلاس‌های آلودگی AOD و احتمالات پایدار (۲۰۲۰-۲۰۲۵)

Fig 9: Daily transmission probability matrix of AOD pollution classes and sustainable probabilities (2020–2025)

بررسی ماتریس انتقال روزانه کلاس‌های آلودگی شاخص AAI در بازه ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ در شکل 10 آورده شده است که ساختاری دوگانه اما متفاوت از AOD را آشکار می‌کند: از یک سو پایداری بسیار قوی در کلاس‌های ناسالم و از سوی دیگر ناپایداری سریع در کلاس‌های بسیار ناسالم و خطرناک همراه با حذف تقریباً کامل کلاس متوسط به‌عنوان حالت گذار است. این ساختار نشان می‌دهد سامانه از یک رژیم تدریجی به یک رژیم جهشی و گسسته منتقل شده است و در ادامه این رفتار تحلیل می‌شود.

پایداری درون‌کلاسی و حافظه بلندمدت سیستم در سطوح مختلف آلودگی نشان می‌دهد که مقادیر روی قطر اصلی ماتریس، بیانگر اینرسی بسیار بالای سیستم در سطوح آلوده جذبی هستند. کلاس ناسالم دارای بیشترین پایداری با مقدار ۷۴٪ است که به‌طور معناداری از مقدار متناظر در AOD (۴۸/۹٪) بیشتر است. این موضوع نشان می‌دهد هنگامی که سیستم وارد وضعیت ناسالم می‌شود، با احتمال نزدیک به سه‌چهارم در روز بعد نیز در همان وضعیت باقی می‌ماند که بیانگر شکل‌گیری یک رژیم پایدار در آلودگی جذبی است. درمقابل، کلاس پاک با وجود داشتن پایداری ۵۶٪، همچنان از نظر خروج به سمت سطوح آلوده ناپایدار است و نقش آن بیشتر به‌عنوان یک حالت گذار در ساختار کلی سیستم ظاهر می‌شود. کلاس بسیار ناسالم نیز با پایداری ۴۷٪ نشان می‌دهد که رخدادهای شدید جذبی نه تنها لحظه‌ای نیستند، در مقیاس چندروزه تداوم دارند و سیستم در این سطح نیز از ماندگاری چشمگیری برخوردار است. کلاس متوسط در این ساختار نقش یک حالت گذرای ضعیف و ناپایدار را دارد و کلاس خطرناک نیز تقریباً فاقد ماندگاری مؤثر است. نتیجه این بخش نشان می‌دهد که سیستم دارای یک ابرجاذب در کلاس ناسالم است و پس از ورود به این سطح، آلودگی تمایل شدیدی به ماندگاری دارد و به‌ندرت به سطوح پایین‌تر باز می‌گردد.

بررسی گرایش سیستم به تشدید آلودگی و ناهمسانی انتقال نشان می‌دهد که ماتریس انتقال دارای ساختاری به‌شدت نامتقارن است. از کلاس پاک، حدود ۴۳٪ انتقال به سمت سطوح آلوده رخ می‌دهد که بیانگر ناپایداری وضعیت پاک و ورود سریع به چرخه آلودگی است. از کلاس متوسط، حدود ۳۹٪ احتمال افزایش به ناسالم وجود دارد که نشان می‌دهد این کلاس یک نقطه لولایی ناپایدار است و به‌سرعت به سمت آلودگی تخلیه می‌شود. از کلاس ناسالم، احتمال افزایش به بسیار ناسالم در حدود ۱۰ تا ۱۵٪ است و در عین حال کاهش به متوسط نیز محدود و کمتر از ۱۵٪ است؛ بنابراین، حتی در شرایط بهبود نسبی نیز سیستم غالباً در وضعیت آلوده باقی می‌ماند. از کلاس بسیار ناسالم، حدود ۴۴٪ احتمال بازگشت به ناسالم وجود دارد و انتقال به خطرناک بسیار نادر است، با این ویژگی که حتی پس از فروکش رخداد شدید، سیستم به وضعیت پاک باز نمی‌گردد. در کلاس خطرناک نیز کاهش سریع به بسیار ناسالم یا ناسالم رخ می‌دهد؛ اما بازگشت به سطوح پایین‌تر عملاً مشاهده نمی‌شود؛ در نتیجه، مسیرهای انتقال نشان می‌دهند که سیستم فاقد مسیر تدریجی بهبود بوده و حرکت مستقیم از پاک به ناسالم و از متوسط به ناسالم غالب است.

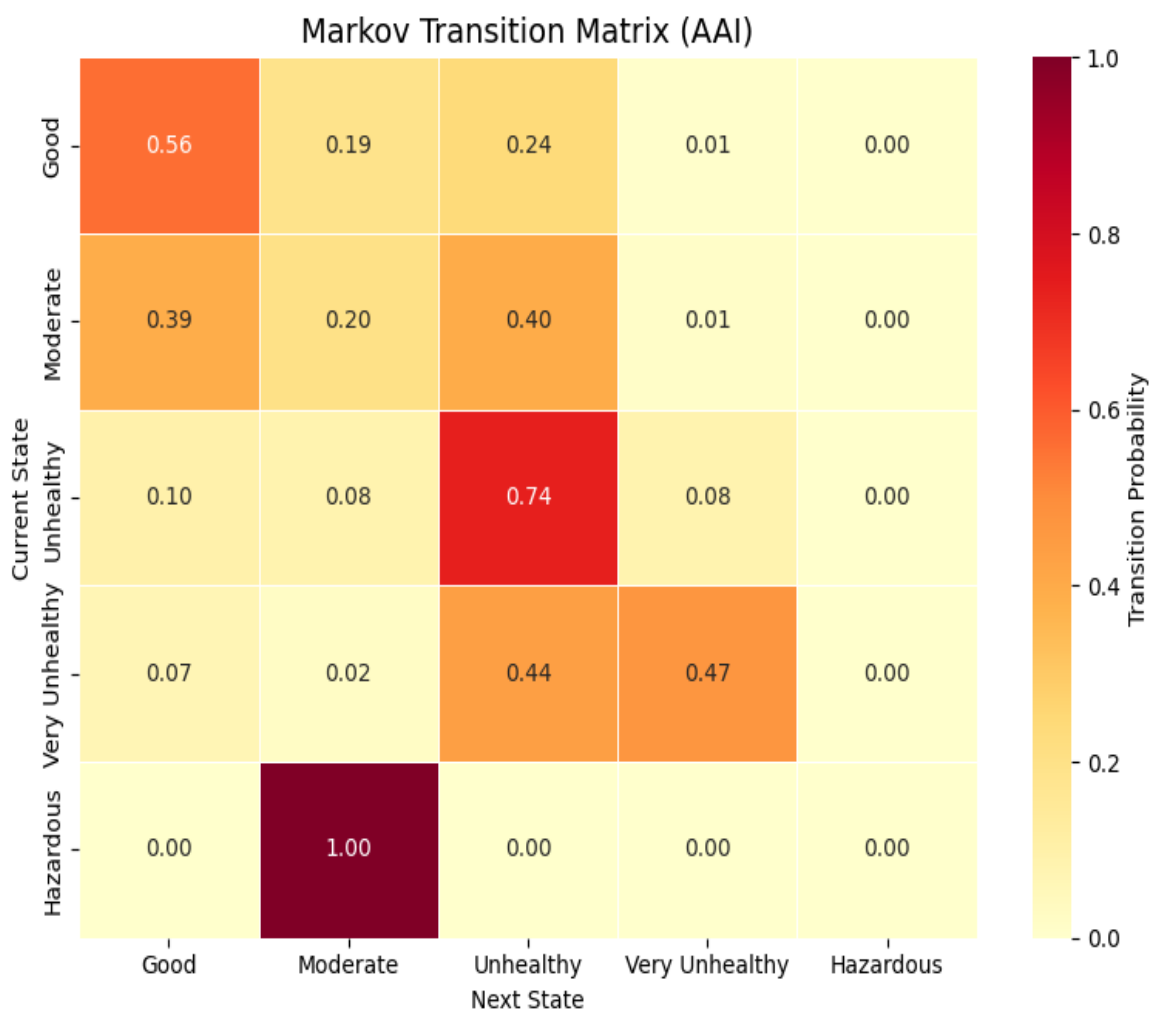
تحلیل احتمالات پایدار یا توزیع بلندمدت نشان می‌دهد که کلاس پاک حدود ۲۴٪ از زمان را شامل می‌شود، کلاس متوسط حدود ۱۲٪ سهم دارد، کلاس ناسالم با حدود ۵۵٪ حالت غالب سیستم را تشکیل می‌دهد، کلاس بسیار ناسالم حدود ۹٪ و کلاس خطرناک تقریباً صفر درصد است. از منظر بهداشتی، حدود ۶۴٪ روزها در

شرایط ناسالم و بسیار ناسالم قرار دارند که نشان‌دهنده فشار مزمن بر کیفیت هوا و سلامت عمومی است. میانگین وزنی کلاس‌ها نیز حدود 5.2 به دست می‌آید که بیانگر قرارگیری سیستم در مرز بین متوسط و ناسالم اما با گرایش غالب به سمت ناسالم است.

مقایسه ساختاری AAI با AOD نشان می‌دهد که در AOD کلاس غالب متوسط بوده است؛ درحالی‌که در AAI کلاس غالب ناسالم است. همچنین، پایداری کلاس ناسالم در AAI (۷۴٪) به مراتب بیشتر از AOD (۴۸/۹٪) است. کلاس متوسط در AAI تقریباً حذف شده و نقش آن به یک حالت ناپایدار کاهش یافته است؛ درحالی‌که در AOD نقش جاذب اصلی را داشت. علاوه بر این، کلاس خطرناک در AAI تقریباً فاقد پایداری است؛ درحالی‌که در AOD رفتار قابل توجه‌تری داشت. مسیر بازگشت نیز در AAI محدود به بازگشت تا سطح ناسالم است و عملاً بازگشت به وضعیت پاک مشاهده نمی‌شود.

تفسیر مبتنی بر سیستم‌های پیچیده نشان می‌دهد که رفتار AAI دارای ساختار دو جاذبه‌ای است؛ یک جاذب در کلاس پاک با احتمال متوسط و یک جاذب بسیار قوی در کلاس ناسالم با پایداری بالا. این دو حالت توسط یک سد گذار از هم جدا شده‌اند؛ اما ویژگی مهم سیستم این است که عبور از حالت پاک به ناسالم بسیار آسان‌تر از بازگشت است؛ بنابراین، سیستم دارای رفتار پسماندی است؛ به این معنا که پس از ورود به وضعیت آلوده، خروج از آن دشوار و کند می‌شود؛ در نتیجه، از منظر سیاستی، تمرکز صرف بر رخدادهای خطرناک کافی نیست؛ زیرا بخش عمده سال در وضعیت ناسالم سپری می‌شود، کلاس متوسط باید به عنوان نقطه مداخله اصلی در نظر گرفته شود؛ زیرا مسیر اصلی انتقال به آلودگی از این کلاس عبور می‌کند، و در نهایت، بازسازی مسیر بازگشت از ناسالم به پاک ضروری است؛ زیرا در وضعیت فعلی این مسیر عملاً تضعیف شده است.

در نهایت، نتایج نشان می‌دهد سیستم AAI در شهرستان اصفهان در یک رژیم دوقطبی ناپایدار قرار گرفته است که در آن کلاس ناسالم با پایداری ۷۴٪ هسته اصلی سامانه را تشکیل می‌دهد و کلاس پاک تنها حدود یک‌چهارم زمان را پوشش می‌دهد. حذف نقش پایدار کلاس متوسط و نبود مسیر بازگشت مؤثر به وضعیت پاک نشان می‌دهد که آلودگی جذبی به یک ویژگی ساختاری و مزمن در سامانه جوی منطقه تبدیل شده است.



شکل 10: ماتریس احتمال انتقال روزانه کلاس های آلودگی AAI و احتمالات پایدار (۲۰۲۰-۲۰۲۵)

Fig 10: Daily transmission probability matrix of AAI pollution classes and sustainable probabilities (2020-2025)

در دهه های اخیر، شدت و تداوم آلودگی هوا در مناطق شهری ایران، به ویژه در استان های مرکزی، به یکی از چالش های جدی سلامت عمومی و محیط زیست تبدیل شده است. محدودیت ایستگاه های زمینی پایش، استفاده از داده های سنجش از دور را به رویکردی اجتناب ناپذیر برای تحلیل الگوهای مکانی - زمانی آلودگی بدل کرده است. در پژوهش حاضر، تغییرات آلودگی هوای استان اصفهان طی دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ با بهره گیری از داده های سنجش از دور (شاخص های AOD و AAI) و مدل سازی زنجیره مارکوف بررسی شد. یافته ها نشان داد که شاخص کنترل کیفیت هوا در اصفهان تصویری از چالش های پایدار زیست محیطی را ترسیم می کند؛ به گونه ای که نواحی مرکزی و شرقی استان همواره تحت فشار آلودگی قرار دارند و بازه های هوای پاک به تدریج کوتاه تر و نادرتر شده اند. این وضعیت مؤید آن است که آلودگی هوا در منطقه یادشده دیگر یک پدیده گذرا یا مقطعی نیست؛ بلکه به بخشی از دینامیک پایدار اتمسفری بدل شده است؛ به طوری که حتی در بازه هایی که انتظار هوای پاک می رود، سطح آلودگی همچنان بالاتر از حد مطلوب باقی می ماند.

مقایسه نتایج با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که الگوهای مشاهده‌شده در این تحقیق با شواهد تجربی دیگر هم‌راستا است؛ برای نمونه، مطالعه‌ای بر ویژگی‌های مغناطیسی گردوغبار خیابانی و ارتباط آن با غلظت فلزات سنگین در چند شهر استان اصفهان نشان داد که تغییرات مکانی و فصلی پذیرفتاری مغناطیسی تحت تأثیر همزمان منابع طبیعی و فعالیت‌های انسان‌زاد قرار دارد. همچنین، همبستگی قوی بین پذیرفتاری مغناطیسی با عناصر روی، مس و کروم و نقش مؤلفه‌های فرومغناطیسی و فوق‌پارامغناطیسی در جذب فلزات سنگین گزارش شد. علاوه بر این، مقادیر بالاتر پارامترهای مغناطیسی در فصل بهار، افزایش سهم فعالیت‌های انسانی و غلظت کانی‌های مغناطیسی را نسبت به سایر فصول نشان داد (اکبری و خادمی، 1402، ص. 247). اگرچه مطالعه مذکور با رویکرد نمونه‌برداری نقطه‌ای و تحلیل‌های آزمایشگاهی انجام شده است، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور چندمنبعی (AOD و AAI) و تحلیل‌های پیشرفته مکانی - زمانی، الگویی جامع‌تر از رفتار آلودگی هوا در مقیاس وسیع و پیوسته ارائه می‌دهد. برخلاف رویکرد مبتنی بر ایستگاه‌های محدود، این پژوهش توانسته است تغییرات پیوسته زمانی - مکانی آلودگی را در بازه ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ شناسایی کند و علاوه بر شدت آلودگی، به تداوم و پایداری آن با استفاده از زنجیره مارکوف بپردازد.

به‌کارگیری زنجیره مارکوف برای تحلیل انتقال بین کلاس‌های کیفیت هوا، بعد پویایی و ماندگاری آلودگی را به تحلیل افزوده است. نتایج نشان می‌دهد که کلاس‌های «ناسالم» و «نیمه‌آلوده» دارای پایداری بالاتری بوده و احتمال بازگشت به شرایط «پاک» محدود است؛ موضوعی که بیانگر قفل‌شدگی سیستم در وضعیت‌های آلوده است. این یافته‌ها با نتایج مطالعات جهانی نیز هم‌خوانی دارد. در مطالعه‌ای با استفاده از داده‌های هفتگی شاخص AQI و مدل زنجیره مارکوف چندحالتی، انتقال بین سه کلاس کیفیت هوا (سالم، ناسالم و بسیار ناسالم) را در ۱۹ کشور بررسی کرد. نتایج نشان داد احتمال انتقال از وضعیت ناسالم به سالم در آسیا ۰.۰۹ و در آفریقا ۰.۲۵ بوده و کلاس «بسیار ناسالم» در این مناطق پایداری بیشتری داشته است؛ درحالی‌که اروپا وضعیت پایداری و بهتری را تجربه کرده است (Hossain et al., 2025, p. 1). پژوهش حاضر هم‌راستا با این رویکرد، به بررسی احتمال انتقال بین کلاس‌های آلودگی با استفاده از زنجیره مارکوف پرداخته است؛ اما فراتر از آن، با بهره‌گیری از شاخص‌های ماهواره‌ای AOD و AAI، تحلیل ماندگاری کلاس‌ها، ترسیم نقشه‌های مکانی آلودگی گردوغبار، تحلیل سری‌های زمانی، توزیع فراوانی و منحنی چگالی KDE را نیز انجام داده است. بدین ترتیب، پژوهش حاضر در مقایسه با مطالعه مذکور، رویکردی گسترده‌تر و جامع‌تر در تحلیل مکانی - زمانی آلودگی هوا ارائه می‌دهد.

در مطالعه دیگری، با استفاده از داده‌های غلظت آلاینده‌ها از ۳۵ ایستگاه پایش در بریتانیا، یک خانواده از مدل‌های نهفته مارکوف کم‌پارامتر برای خوشه‌بندی ایستگاه‌ها و شناسایی وضعیت‌های ریسک مواجهه توسعه داده شد (Maruotti et al., 2026, p. 24). پژوهش حاضر نیز از چارچوب‌های مبتنی بر زنجیره مارکوف برای تحلیل پویایی آلودگی استفاده کرده است؛ اما تمرکز آن بر تحلیل مکانی - زمانی پیوسته در سطح منطقه‌ای و با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای AOD و AAI در بازه چندساله بوده است؛ درحالی‌که مطالعه مذکور بر خوشه‌بندی ایستگاه‌های پایش و استخراج ساختارهای نهفته در داده‌های چندمتغیره متمرکز است. افزون بر این، پژوهش حاضر علاوه بر بررسی

احتمال انتقال بین کلاس‌های آلودگی، به تحلیل ماندگاری وضعیت‌ها، نقشه‌های مکانی، سری‌های زمانی، توزیع فراوانی و KDE پرداخته که منجر به ارائه تصویری جامع‌تر از رفتار فضایی - زمانی آلودگی هوا شده است. همچنین، مطالعه‌ای در شهر لاهور با استفاده از داده‌های Sentinel-5P و اندازه‌گیری‌های زمینی PM_{2.5} و PM₁₀ نشان داد که بیشترین غلظت ذرات معلق در نواحی شمالی و شمال‌شرقی و در مناطق با کاربری حمل‌ونقل ثبت شده است (Mirza et al., 2026, p. 1). پژوهش حاضر نیز به ارزیابی آلودگی هوا با شاخص‌های ماهواره‌ای AOD و AAI پرداخته است؛ اما با استفاده از زنجیره مارکوف، برای هر دو شاخص به‌طور همزمان، انتقال بین کلاس‌های مختلف آلودگی و ماندگاری آنها را در طول زمان تحلیل کرده است؛ رویکردی که در مطالعه یادشده دیده نمی‌شود. در پژوهشی دیگر در لندونزی، تغییرپذیری بلندمدت AOD و AAI نشان داد که در بازه ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳، مقدار AOD حدود ۵۸/۸۱٪ و AAI حدود ۴۵/۲۴٪ افزایش یافته که بیانگر تشدید شرایط آلودگی شدید هوا در سال ۲۰۲۳ است (Tampubolon et al., 2023, p. 21). پژوهش حاضر نیز با استفاده از همین دو شاخص به بررسی آلودگی هوا پرداخته است؛ اما برخلاف مطالعه مذکور که بر تغییرات درصدی شدت آئروسل‌ها تمرکز دارد، با بهره‌گیری همزمان از این دو شاخص و زنجیره مارکوف، به تحلیل انتقال بین کلاس‌های مختلف آلودگی و ماندگاری آنها در مقیاس مکانی - زمانی پرداخته و رفتار پویای آلودگی را در بازه چندساله ارزیابی کرده است.

در سطح ملی، مطالعه‌ای بر گردوغبار و عناصر بالقوه سمی در استان اصفهان نشان داد که بخش شرقی استان منبع اصلی گردوغبار است و بیشترین رسوب ماهانه در ژوئیه (۵/۵۳ گرم بر مترمربع) ثبت شده است. پژوهش حاضر با استفاده از شاخص‌های ماهواره‌ای AOD و AAI به تحلیل آلودگی هوا در مقیاس مکانی - زمانی پرداخته و نتایج آن هم‌راستا با نتایج پژوهش مارجوی و همکاران است و کانون‌های پایدار آلودگی عمدتاً در نواحی مرکزی و شرقی استان، به‌ویژه شهر اصفهان و شهرستان خور و بیابانک، قرار دارند. هر دو شاخص روند افزایشی و نوسانی داشته‌اند؛ به‌طوری‌که شاخص AOD از حدود ۰/۲۵ به بیش از ۰/۳۰ و AAI از مقادیر نزدیک صفر به حدود ۱/۴ افزایش یافته است (Marjovvi et al., 2022, p. 901). تحلیل ماتریس انتقال زنجیره مارکوف نیز پایداری بالای کلاس‌های «ناسالم» و «نیمه‌آلوده» و تداوم شرایط آلوده را نشان داد؛ به‌گونه‌ای که روزهای پاک بسیار محدود بوده‌اند. شدت و تمرکز آلودگی در برخی مناطق استان اصفهان، ضرورت توجه ویژه، برنامه‌ریزی هدفمند و مدیریت مستمر منابع انسانی و طبیعی را برجسته می‌کند. ادامه این روند می‌تواند سلامت عمومی، کیفیت زندگی و محیط زیست شهری را به شکل چشمگیری تحت تأثیر قرار دهد و خطرات بلندمدتی نظیر افزایش بیماری‌های تنفسی و قلبی‌عروقی، کاهش بهره‌وری اقتصادی و مهاجرت جمعیت ایجاد کند. الگوی پایدار و متمرکز آلودگی در محدوده‌های خاص استان، نشان‌دهنده اهمیت شناسایی نقاط بحرانی و اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی (مانند محدودیت‌های ترافیکی هدفمند، کنترل منابع گردوغبار طبیعی در شرق استان و توسعه فضای سبز در کریدورهای آلودگی) است. بدون اتخاذ راهبردهای جامع و هماهنگ در مقیاس منطقه‌ای و فرمانطقه‌ای، کاهش ماندگار آلودگی و ایجاد تعادل در اکوسیستم شهری دشوار خواهد بود و پیامدهای اقتصادی و اجتماعی آن غیرقابل چشم‌پوشی خواهد بود. این شرایط بر ضرورت نگاه کل‌نگر، تقویت پایش‌های ماهواره‌ای زمینی تلفیقی، توسعه مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی و اتخاذ اقدامات پیشگیرانه برای تضمین هوای پاک و توسعه پایدار تأکید دارد.

نتیجه‌گیری

آلودگی هوا یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی و سلامت عمومی است که اثرات مستقیم بر کیفیت زندگی، اکوسیستم و توسعه پایدار دارد. در این مطالعه، تغییرات آلودگی هوا در بازه ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ با استفاده از شاخص‌های AOD از MODIS و AAI از Sentinel-5 در استان اصفهان بررسی شد. تحلیل‌ها شامل نقشه‌حرارتی، سری‌های زمانی، توزیع فراوانی، منحنی KDE و مدل هارکوف برای بررسی پایداری و انتقال روزانه کلاس‌های آلودگی بود تا تصویر دقیقی از شدت، پراکنش و تداوم آلودگی ارائه شود. نتایج نشان داد که نواحی مرکزی و شرقی استان، به‌ویژه شهرستان خور و شهر اصفهان، کانون‌های اصلی آلودگی پایدار هستند. مقادیر AOD در سال ۲۰۲۰ عمدتاً بین $-0/37$ تا $0/56$ بود و بخش‌هایی از خور و اصفهان بیش از $0/96$ ثبت شد. در ۲۰۲۱ شدت آلودگی افزایش یافت و مقادیر در خور و اصفهان عمدتاً $0/72$ تا $1/1$ و حتی بیش از $1/1$ بود. در سال ۲۰۲۲ کاهش نسبی مشاهده شد؛ اما پهنه‌های گسترده‌ای همچنان در کلاس ناسالم تا بسیار ناسالم باقی ماندند. سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ روند کاهشی ادامه یافت؛ ولی شهرستان خور و شهر اصفهان همچنان در کلاس ناسالم و بسیار ناسالم باقی ماندند. سال ۲۰۲۵ کاهش بیشتر وسعت پهنه‌های آلوده را نشان داد؛ اما مقادیر $0/56$ تا $0/87$ در مناطق مرکزی و شرقی استان ثبت شد. شاخص AAI نیز روند مشابهی داشت. در ۲۰۲۰ غالب ماه‌ها نزدیک صفر یا منفی بود. از ۲۰۲۱ جهش شاخص در ژوئیه ($1/257$) و مقادیر بالای سپتامبر و اکتبر نشان‌دهنده ورود گسترده ذرات جذبی بود. در ۲۰۲۲ شاخص به اوج رسید و ماه‌های مه، ژوئن و ژوئیه با مقادیر $1/825$ ، $1/984$ و $1/821$ ثبت شد. در سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ تثبیت شاخص ادامه یافت و مقادیر بیش از $1/5$ در تابستان مشاهده شد، در ۲۰۲۵ مقادیر مه و ژوئن به ترتیب $1/656$ و $1/835$ بود. بیشترین تمرکز در شهر اصفهان و شهرستان خور و بیابانک بود. تحلیل سری زمانی نشان داد که میانگین متحرک ۱۲ ماهه AOD از $0/25$ در ۲۰۲۰ به بیش از $0/30$ در ۲۰۲۵ رسید (رشد 24% در شش سال) و میانگین متحرک AAI از صفر به حدود $1/4$ افزایش یافت. نوسانات کوتاه‌مدت هر دو شاخص نیز تشدید دامنه نوسان و طولانی‌تر شدن فصل‌های آلوده را نشان داد. تحلیل توزیع فراوانی نشان داد که توزیع AOD دوجبهی با بیشترین فراوانی در $0/22$ تا $0/25$ و $0/34$ تا $0/36$ و دم راست کشیده به سمت مقادیر بسیار ناسالم است. توزیع AAI بیشترین فراوانی در $0/5$ تا $0/7$ و تکرار مقادیر $0/9$ تا $1/1$ دارد و ستون‌های انتهایی $1/8$ تا 2 نشان‌دهنده اپیزودهای حدی است. ماتریس انتقال روزانه شاخص AOD نشان داد که روزهای متوسط و ناسالم به ترتیب 66% و $48/9\%$ احتمال ماندگاری دارند و روزهای بسیار ناسالم $2/26\%$ است؛ تنها $4/5\%$ روزها هوای پاک بودند. ماتریس انتقال AAI نیز نشان داد که روزهای ناسالم 74% پایداری دارند و روزهای بسیار ناسالم به سرعت کاهش می‌یابند؛ روزهای پاک نادر هستند. در مجموع، آلودگی هوا در اصفهان مزمن و پایدار است، پنجره‌های هوای پاک، کوتاه و نادر و فصل‌های آلوده طولانی‌تر و شدیدتر شده‌اند. برای مدیریت مؤثر، تمرکز بر کاهش روزهای نیمه‌آلوده و ناسالم، کنترل منابع شهری و صنعتی و پایش مستمر کیفیت هوا ضروری است. همچنین، استفاده از پوشش‌های گیاهی، کاهش انتشار گردوغبار و اقدامات پیشگیرانه در کانون‌های اصلی پیشنهاد می‌شود.

تقدیر و تشکر

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی با شماره 02-1404-14 دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری است و مراتب تشکر و قدردانی از حمایت مادی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به جا آورده می‌شود.

منابع

- ابطحی، سید مرتضی، و عباسی، حمیدرضا (۱۴۰۴). تعیین حساسیت اراضی به فرسایش بادی در کانون گردوغبار سجزی اصفهان. *مهندسی/اکوسیستم بیابان*، ۱۴ (۴۹)، ۱-۱۴.
- <https://doi.org/10.22052/deej.2025.256845.1107>
- اکبری، بهروز، و خادمی، حسین (۱۴۰۲). تغییرات فصلی و مکانی پذیرفتاری مغناطیسی گردوغبار خیابانی در چند شهرستان اصفهان و ارتباط آنها با غلظت برخی فلزات سنگین. *فصلنامه علوم آب و خاک*، ۴ (۲۷)، 1-20.
- <https://doi.org/10.47176/jwss.27.4.59116>
- آروین، عباسعلی (۱۳۹۸). بررسی تأثیر ذرات گرد و غبار کمتر از ۲.۵ میکرون بر سلامت انسان در شهر اصفهان. *برنامه ریزی فضایی*، ۹ (۳)، ۱۱۱-۱۲۴.
- <https://doi.org/10.22108/sppl.2018.112516.1274>
- پیش‌دار، داود، رضازاده، مریم، و سلامتی هرمزی، وحید (۱۴۰۴). بررسی دینامیکی - اقلیمی طوفانهای گردوغبار در جنوب غرب ایران. *پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۱۵ (۳)، ۱-۲۳.
- <https://doi.org/10.61882/jeer.15.3.1>
- عزتیان، ویکتوریا (۱۳۹۸). پایش پلییده گرد و خاک، علل وقوع و پیامدهای آن در استان اصفهان، مطالعه موردی: ۲۰۱۳-۲۰۱۴. *نیوار*، ۴۳ (۱۰۵-۱۰۴)، ۵۰-۶۶.
- <https://doi.org/10.30467/nivar.2019.133980.1090>
- نورائی، همایون، و شکرانی، سیدمحمد (۱۴۰۰). تحلیل فضایی و سطح‌بندی مناطق پانزده‌گانه کلان‌شهر اصفهان بر مبنای توزیع آلودگی هوا. *جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*، ۲ (۳۲)، ۸۳-۱۰۲.
- <https://doi.org/10.22108/gep.2021.126981.1394>
- یوسفی کبریا، علیرضا، خلیلی، علی و رضائی، حسین (۱۴۰۵). تحلیل مکانی - زمانی پدیده گرد و غبار از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ با استفاده از سنجش از دور و ردیابی منبع با مدل HYSPLIT: مطالعه موردی استان ایلام، ایران. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۸ (۱)، 1-24.
- https://jwem.areeo.ac.ir/article_135057.html

References

- Abtahi, S. M., & Abbasi, H. R. (2026). Assessing land susceptibility to wind erosion in the Sejzi dust source, Isfahan. *Desert Ecosystem Engineering*, 14(49), 1-14.
- <https://doi.org/10.22052/deej.2025.256845.1107> [In Persian]
- Akbari, B., & Khademi, H. (2023). Seasonal and spatial variations of magnetic susceptibility of street dust in several cities of Isfahan Province and their relationship with the concentration of selected heavy metals. *Journal of Water and Soil Science*, 27(4), 247-266.
- <https://doi.org/10.47176/jwss.27.4.59116> [In Persian]

- Alyousifi, Y., Ibrahim, K., & Jemain, A. A. (2021). Robust empirical Bayes approach for Markov chain modeling of air pollution index. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 19(1), 343–356. <https://doi.org/10.1007/s40201-020-00607-4>
- Alyousifi, Y., Ibrahim, K., Kang, W., & Wan Zin, W. Z. (2019). Markov chain modeling for air pollution index based on maximum a posteriori method. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 12(12), 1521–1531. <https://doi.org/10.1007/s11869-019-00764-y>
- Arvin, A. (2019). Investigation of the effect of less-than-2.5-microns dust particles on human health in Isfahan City. *Spatial Planning*, 9(3), 111–124. <https://doi.org/10.22108/sppl.2018.112516.1274> [In Persian]
- Boroughani, M., Pourhashemi, S., Hashemi, H., Salehi, M., Amirahmadi, A., Zangane Asadi, M. A., & Berndtsson, R. (2020). Application of remote sensing techniques and machine learning algorithms in dust source detection and dust source susceptibility mapping. *Ecological Informatics*, 56, 101059. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2020.101059>
- Ezzatian, V. (2019). Monitoring dust phenomena, causes of its occurrence and consequences in Isfahan province: Case study: 2013-2014. *Nivar*, 43(104-105), 50–66. <https://doi.org/10.30467/nivar.2019.133980.1090> [In Persian]
- Hossain, M. I., Sarkar, S., Methun, M. I. H., & Rahman, A. (2025). Exploring regional air pollution transition dynamics: A multi-state Markov model approach. *Plos one*, 20(10), e0333849. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0333849>
- Hou, X., Wang, X., Cheng, S., Qi, H., Wang, C., & Huang, Z. (2024). Elucidating transport dynamics and regional division of PM_{2.5} and O₃ in China using an advanced network model. *Environment International*, 188, 108731. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108731>
- Kotriake, T., & Sridhar, V. (2026). Tracing the haze: Satellite-based assessment of stubble burning and air quality in Delhi. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 19(1), 9. <https://doi.org/10.1007/s11869-026-01885-x>
- Li, L., Liu, M., Qi, Y., Zhang, G., & Yu, R. (2023). Spatiotemporal variations and relationships of absorbing aerosol-radiation-gross primary productivity over China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(1), 169. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10775-5>
- Lindqvist, H., Kivimäki, E., Häkkinä, T., Tsuruta, A., Schneising, O., Buchwitz, M., Lorente, A., Martinez Velarte, M., Borsdorff, T., Alberti, C., et al. (2024). Evaluation of Sentinel-5P TROPOMI methane observations at northern high latitudes. *Remote Sensing*, 16(16), 2979. <https://doi.org/10.3390/rs16162979>
- Liu, M., Zhang, Y., & Liu, L. H. (2024). Histogram analysis based on unenhanced CT for identifying thymoma and lymphoma among prevascular mediastinal incidentalomas. *Cancer Imaging*, 24(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s40644-023-00617-z>
- Marjovvi, A., Soleimani, M., Mirghaffari, N., Karimzadeh, H., Yuan, Y., & Fang, L. (2022). Monitoring, source identification and environmental risk of potentially toxic elements of dust in Isfahan Province, Central Iran. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 108(5), 901–908. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03446-7>
- Maruotti, A., Ricciotti, L., & Russo, A. (2026). Multivariate Longitudinal Latent Markov Models to Characterize Pollutant Exposures. In *Environmental Modelling with Contemporary Statistics* (pp. 42–65). Chapman and Hall/CRC.
- Mirza, A. I., Kazmi, J. H., Shaikh, S., Noreena, & Arshad, S. (2026). Monitoring urban air quality in Lahore: A combined approach using ground measurements and Sentinel-5P data. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 23(3), 207. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06976-3>

- Moreo, A., González, P., & del Coz, J. J. (2025). Kernel density estimation for multiclass quantification. *Machine Learning*, 114(4), 92. <https://doi.org/10.1007/s10994-024-06726-5>
- Morton, A., & Finkenstädt, B. F. (2005). Discrete time modelling of disease incidence time series by using Markov chain Monte Carlo methods. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 54(3), 575–594. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9876.2005.05366.x>
- Nooraie, H., & Shokrani, S. M. (2021). Spatial analysis and ranking of fifteen regions of Isfahan metropolis based on the distribution of air pollution. *Geography and Environmental Planning*, 32(2), 83–102. <https://doi.org/10.22108/gep.2021.126981.1394> [In Persian]
- Papi, R., Kakroodi, A. A., Soleimani, M., Karami, L., Amiri, F., & Alavipanah, S. K. (2022). Identifying sand and dust storm sources using spatial-temporal analysis of remote sensing data in Central Iran. *Ecological Informatics*, 70, 101724. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101724>.
- Pishdar, D., Rezazadeh, M., & Salamati Hormozi, V. (2025). Dynamic-climatic study of dust storms in Southwest Iran. *Environmental Erosion Research*, 15(3), 1–23. <https://doi.org/10.61882/jeer.15.3.1> [In Persian]
- Pourhashemi, S., Naemi, M., Boroughani, M., & Kambezidis, H. (2025). The effect of land-use forecasting on dust source susceptibility mapping in Iran. *Environmental Challenges*, 21, 101334. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101334>
- Rahaman, A. (2026). Comprehensive classification of statistical methods: A hierarchical taxonomy from foundations to research frontiers. Available at SSRN 6604119. <https://doi.org/10.2139/ssrn.6604119>
- Rayegani, B., Barati, S., Goshtasb, H., Gachpaz, S., Ramezani, J., & Sarkheil, H. (2020). Sand and dust storm sources identification: A remote sensing approach. *Ecological Indicators*, 112, 106099. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106099>
- Stoner, O., & Economou, T. (2020). An advanced hidden Markov model for hourly rainfall time series. *Computational Statistics & Data Analysis*, 152, 107045. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2020.107045>
- Tampubolon, T., Yanti, J., & Tampubolon, F. R. (2023). Estimating Spatiotemporal Aerosol Index between MODIS and Sentinel 5 in Medan City. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2672, No. 1, p. 012007). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2672/1/012007>
- Wu, Z., He, W., Wu, Z., Gu, S., Li, C., & Guo, J. (2025). Markov chain-based turnout state prediction and lifespan simulation. *Scientific Reports*, 15, 40110. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-23945-5>
- Xiong, X., Che, N., Barnes, W., Xie, Y., Wang, L., & Qu, J. (2006). Status of Aqua MODIS spatial characterization and performance. In *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites X* (Vol. 6361, pp. 209–217). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.687162>
- Yazdani, M., Karimzadeh, H., Azimzadeh, H., & Soleimani, M. (2024). Assessment of environmental and health risks of potentially toxic elements associated with desert dust particles affected by industrial activities in Isfahan metropolitan. *Scientific Reports*, 14(1), 22867. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-74153-6>
- Yousefi Kebriya, A., & Nadi, M. (2024). Examining air pollution continuity in Tehran Province using Markov chain model. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 15(2), 201–210. <https://doi.org/10.5829/ijee.2024.15.02.10>
- Yousefi Kebriya, A., Khalili, A., & Rezaei, H. (2026). Spatial-temporal analysis of dust phenomena from 2020 to 2025 using remote sensing and source tracking with the HYSPLIT model: A case study of Ilam province, Iran. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 1(18), 1–24. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2025.369911.2120> [In Persian].
- Yousefi Kebriya, A., Nadi, M., & Ghanbari Parmehr, E. (2025). Estimation of ozone and nitrogen dioxide pollutants in Mazandaran Province using Sentinel-5 satellite images. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 16(1), 56–66. <https://doi.org/10.5829/ijee.2025.16.01.07>

- Yousefi Kebriya, A., Nadi, M., Ghanbari Parmehr, E., & Sun, Z. (2026). Analysis and source identification of dust event in Khuzestan province using MODIS and SENTINEL satellite data and HYSPLIT model (2018–2022). *PLoS One*, 21(5), e0348129.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0348129>
- Yu, Y., Kalashnikova, O. V., Garay, M. J., Lee, H., & Notaro, M. (2018). Identification and characterization of dust source regions across North Africa and the Middle East using MISR satellite observations. *Geophysical Research Letters*, 45(13), 6690–6701.
<https://doi.org/10.1029/2018GL078324>
- Zhao, C., Ye, A., Zeng, X., & Wu, L. (2026). Spatio-temporal evolution and driving mechanisms of dust activity in China's Northern Sandstorm Belt over the past 20 years. *Environmental Research*, 295, 123987. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2026.123987>