

Original Article



Iranian Journal of Remote Sensing & GIS

Spatial and Temporal Analysis of Methane Pollutant Distribution in Metropolitan Areas Using Remote Sensing and Geographic Information Systems (Case Study: Isfahan Metropolis)

Ahmadreza Aboutorabi Boarzabadi, Ali Sadeghi^{*}, Dariush Rahimi**Affiliation**

**Department of Geography and Urban Planning, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran*

ABSTRACT

Background and Objectives: Air pollution is one of the major environmental and health challenges that has been exacerbated by industrial growth and increased human activity, particularly in large and industrial cities. Methane gas, as one of the most potent greenhouse gases, plays a significant role in global warming, climate change, and the deterioration of air quality. The sources of methane emissions include wetlands, livestock farming, agriculture, and landfill sites, with human activities contributing significantly to its increase. Measuring and monitoring air pollution often faces spatial and temporal limitations due to ground-based monitoring stations. In this context, satellite data, due to its wide coverage, cost-effectiveness, and ability to provide high spatial and temporal resolution data, is used as one of the most important sources of information for studying air pollution. This research utilizes data from the TROPOMI sensor on the Sentinel-5P satellite, which enables the measurement of methane concentrations in the atmosphere, as the primary data source. These data serve as the basis for spatial and temporal analysis of methane distribution in the Isfahan metropolitan area, providing an opportunity to closely examine the spatial and temporal patterns of this pollutant on a large scale. Despite the high importance of methane pollution, no comprehensive study has been conducted regarding the spatial and temporal distribution of this pollutant in Isfahan. The aim of this research is to conduct a comprehensive and systematic analysis of methane distribution in the city of Isfahan using satellite data and identify the relationship between atmospheric changes and methane variations to offer effective solutions for air pollution management and environmental quality improvement.

Materials and Methods: This study aims to analyze the spatial and temporal distribution of methane concentration in the Isfahan metropolitan area using TROPOMI sensor data from the Sentinel-5P satellite over the period from 2019 to 2023. Satellite data were retrieved, processed, and analyzed using the Google Earth Engine platform. To examine the spatial distribution pattern of methane concentration, the Global Moran's I index and G-statistic were applied to analyze clusters and determine the data dispersion. Additionally, the Gi-statistic was used to identify areas with the highest (hot spots) and lowest (cold spots) methane concentrations. Furthermore, the relationship between methane concentration and climatic factors such as temperature, air pressure, precipitation, and wind speed was evaluated through the calculation of Pearson's correlation coefficient. Finally, the temporal trends of methane concentration were analyzed on a monthly, seasonal, and annual scale.

Results and Discussion: The results from the analyses indicate an increasing trend in methane concentration in the Isfahan metropolitan area during the study period. This gas experienced the highest concentrations in the colder seasons, especially in industrial and agricultural areas. Spatial analyses revealed significant clusters of high concentrations in the northern regions, particularly in areas 4 and 7, as well as in the eastern areas, particularly in areas 12 and 15. These high methane concentrations were linked to activities such as livestock farming, agriculture, and landfill operations. In contrast, the southern regions, particularly areas 2 and 6, as well as some parts of the western areas, were identified as cold spots with lower concentrations. Furthermore, the assessment of the relationship between climatic parameters showed an inverse correlation between temperature and wind speed with methane concentration changes, while air pressure exhibited a positive and significant relationship with the gas concentration changes.

Conclusion: The results of this study, based on high-precision satellite data analysis and advanced spatial measurement techniques, provide valuable information for air pollution management and urban planning. Accordingly, it is recommended that methane emission monitoring and control be prioritized during the colder seasons, with a focus on the identified hot spots. In this regard, optimizing industrial processes, efficiently managing waste in the eastern parts of Isfahan, and controlling methane emissions from northern livestock farms using modern technologies, including bioremediation methods, can play an effective role in reducing this pollutant. Additionally, the use of remote sensing data and advanced predictive models for continuous methane concentration monitoring and targeted pollution control strategies is recommended as an effective approach.

Keywords: Methane pollutant, Sentinel-5P, Remote sensing, Isfahan metropolis, Spatial and temporal analysis.

Citation:

Aboutorabi Boarzabadi, A., Sadeghi, A., Rahimi, D., *Spatial and Temporal Analysis of Methane Pollutant Distribution in Metropolitan Areas Using Remote Sensing and Geographic Information Systems (Case Study: Isfahan Metropolis)*, *Iran J Remote Sens GIS*. 17(3): 177-200.

* Corresponding Author: Alisadeghi@geo.ui.ac.ir
DOI: <https://doi.org/10.48308/gisj.2025.238060.1243>

Received: 2024.12.24
Accepted: 2025.03.03





تحلیل فضایی و زمانی توزیع آلاینده متان در مناطق کلان‌شهری با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: کلان‌شهر اصفهان)

احمدرضا ابوترابی برزآبادی، علی صادقی*، داریوش رحیمی

سمت

* گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری،
دانشکده علوم جغرافیایی و
برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان،
ایران

چکیده

سابقه و هدف: آلودگی هوا یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی و بهداشتی است که با رشد صنعتی و افزایش فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه در شهرهای بزرگ و صنعتی، تشدید شده است. گاز متان یکی از قوی‌ترین گازهای گلخانه‌ای است که در گرمایش جهانی، تغییرات اقلیمی و کاهش کیفیت هوا نقش چشمگیری ایفا می‌کند. منابع انتشار این گاز شامل تالاب‌ها، دامداری‌ها، کشاورزی و دفن زباله است که فعالیت‌های انسانی سهم شایان توجهی در افزایش آن دارد. اندازه‌گیری و پایش آلودگی هوا اغلب با محدودیت‌های مکانی و زمانی ایستگاه‌های سنجش زمینی مواجه است. در این راستا داده‌های ماهواره‌ای، به‌دلیل پوشش گسترده، هزینه پهنه و توانایی ارائه داده‌های با وضوح مکانی و زمانی بالا، به‌منزله یکی از مهم‌ترین منابع اطلاعاتی برای مطالعه آلودگی هوا به کار می‌روند. در این پژوهش، از داده‌های سنجنده TROPOMI، روی ماهواره سنتینل-۵P که امکان اندازه‌گیری غلظت گاز متان در جو را فراهم می‌کند، به‌منزله منبع اصلی داده استفاده شده است. این داده‌ها مبنای تحلیل فضایی و زمانی توزیع متان در محدوده کلان‌شهر اصفهان بوده‌اند و امکان بررسی دقیق الگوهای مکانی و زمانی این آلاینده را در سطح گسترده فراهم کرده‌اند. با وجود اهمیت بالای آلودگی متان، تا کنون مطالعه‌ای جامع درباره تحلیل توزیع مکانی و زمانی این آلاینده در کلان‌شهر اصفهان انجام نشده است. هدف این پژوهش تحلیل جامع و نظام‌مند توزیع متان در شهر اصفهان، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و شناسایی ارتباط میان تغییرات عوامل جوی و تغییرات گاز متان است تا راهکارهایی مؤثر، برای مدیریت آلودگی هوا و بهبود کیفیت زیست‌محیطی، مطرح شود.

مواد و روش‌ها: این پژوهش، با هدف تحلیل مکانی و زمانی توزیع غلظت متان در کلان‌شهر اصفهان، از داده‌های سنجنده TROPOMI مستقر بر ماهواره سنتینل-۵P در بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲ استفاده کرده است. داده‌های ماهواره‌ای با بهره‌گیری از سامانه گوگل ارث انجین فراخوانی، پردازش و تحلیل شدند. برای بررسی الگوی توزیع مکانی غلظت متان، شاخص موران جهانی و آماره G، به‌منظور تحلیل خوشه‌ها و تعیین نحوه پراکنش داده‌ها به کار رفت. علاوه بر این، از آماره Gi برای شناسایی مناطق دارای بیشترین (نقاط داغ) و کمترین (نقاط سرد) غلظت متان استفاده شد. همچنین ارتباط میان غلظت متان و عوامل اقلیمی مانند دما، فشار هوا، میزان بارش و سرعت باد، از طریق محاسبه ضریب همبستگی پیرسون، ارزیابی شد. در نهایت، روند تغییرات زمانی غلظت متان در مقیاس‌های ماهیانه، فصلی و سالیانه مورد تحلیل قرار گرفت.

نتایج و بحث: نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام‌شده نشان‌دهنده روند افزایشی غلظت گاز متان، در کلان‌شهر اصفهان، طی دوره زمانی مورد مطالعه بوده است. این گاز در فصل‌های سرد سال، به‌ویژه در نواحی صنعتی و کشاورزی، بیشترین غلظت را داشته است. بررسی‌های مکانی گویای تشکیل خوشه‌های درخور توجهی از غلظت‌های بالا در مناطق شمالی، به‌ویژه مناطق ۴ و ۷، و همچنین مناطق شرقی، به‌ویژه مناطق ۱۲ و ۱۵، است که به‌دلیل فعالیت‌های مرتبط با دامداری، کشاورزی و دفن زباله، غلظت‌های بالای متان را در این مناطق به‌دنبال داشته است. در مقابل، نواحی جنوبی، به‌ویژه مناطق ۲ و ۶ و همچنین بخش‌هایی از نواحی غربی به‌منزله نقاط سرد دارای غلظت‌های کمتر شناخته شدند. ارزیابی ارتباط پارامترهای اقلیمی نیز نشان داد که دما و سرعت باد، با تغییرات غلظت متان، ارتباط معکوس داشته‌اند؛ درحالی‌که فشار هوا نشان‌دهنده رابطه مثبت و معناداری با تغییرات غلظت این گاز بود.

استناد:

ابوترابی برزآبادی، ا.، صادقی، ع.، رحیمی، د.، تحلیل فضایی و زمانی توزیع آلاینده متان در مناطق کلان‌شهری با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: کلان‌شهر اصفهان)، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۷، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۴: ۱۷۷-۲۰۰.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش، که مبتنی بر تحلیل داده‌های ماهواره‌ای با دقت بالا و روش‌های پیشرفته سنجش مکانی است، اطلاعات ارزشمندی را در زمینه مدیریت آلودگی هوا و برنامه‌ریزی شهری فراهم می‌آورد. بر این اساس پیشنهاد می‌شود پایش و کنترل انتشار متان با اولویت‌بندی فصل‌های سرد سال و تمرکز بر مناطق شناسایی شده به‌منزله نقاط داغ انجام شود. در این راستا بهینه‌سازی فرایندهای صنعتی، مدیریت کارآمد پسماندها در نواحی شرقی اصفهان و کنترل انتشار متان از دامداری‌های شمالی با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، از جمله روش‌های تصفیه زیستی، می‌تواند در کاهش این آلاینده نقش مؤثری ایفا کند. افزون بر این، استفاده از داده‌های سنجش از دور و مدل‌های پیش‌بینی پیشرفته برای پایش مداوم غلظت متان و اجرای هدفمند راهکارهای کنترل آلودگی، به‌منزله راهبردی مؤثر، توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آلاینده متان، سنتینل-۵P، سنجش از دور، کلان‌شهر اصفهان، تحلیل فضایی و زمانی.



۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، افزایش سطح آلودگی‌های محیطی و تغییرات اقلیمی توجه ویژه‌ای را به آلاینده‌های هوا، به‌خصوص گازهای گلخانه‌ای، معطوف کرده است. گاز متان (CH₄)، به‌منزله یکی از قوی‌ترین گازهای گلخانه‌ای با توان گرمایش جهانی بالا و پتانسیل تأثیرگذاری در تغییرات اقلیمی، نقشی مهم در برهم زدن تعادل سیستم اقلیمی جهانی دارد (Orsetti et al., 2022). مطالعات علمی نشان می‌دهند که متان دومین گاز گلخانه‌ای مهم پس از دی‌اکسید کربن است (Skeie et al., 2023). از سال ۲۰۰۷، سطح متان جوّی به‌طور مداوم در حال افزایش بوده و هم‌اکنون به حدود ۲/۵ برابر سطح اولیه خود رسیده است (Basu et al., 2022).

برخلاف دی‌اکسید کربن، متان با وجود غلظت پایین‌تر، تأثیر چشمگیری در افزایش دمای زمین و کاهش کیفیت هوا دارد و از منابع گوناگونی به اتمسفر وارد می‌شود. منابع جوّی متان تنوع و پیچیدگی درخور توجهی دارند و به‌طور کلی، به دو دسته طبیعی و انسانی تقسیم می‌شوند. منابع طبیعی انتشار متان شامل تالاب‌ها، اقیانوس‌ها، پوشش گیاهی، موربان‌ها و حیات‌وحش است. درمقابل، منابع انسانی شامل فعالیت‌هایی همچون کشت برنج، دفن زباله، دام‌پروری، سوزاندن زیست‌سوخت، استخراج سوخت‌های فسیلی و احتراق می‌شوند (Jin et al., 2024).

یکی از چالش‌های اصلی، در مدیریت شهری و زیست‌محیطی، درک توزیع مکانی و زمانی این آلاینده‌ها به‌منظور کاهش تأثیرات منفی آنها در سلامت و محیط‌زیست است. از این‌رو تحلیل زمانی و مکانی توزیع آلاینده‌ها ابزاری حیاتی برای شناسایی الگوهای پراکندگی، نقاط داغ و سرد آلاینده‌ها و آثار فصلی و سالیانه است (Vlasov et al., 2022).

استفاده از ایستگاه‌های سنجش آلودگی از دقیق‌ترین روش‌های اندازه‌گیری آلودگی شناخته شده‌اند؛ باین‌حال اندازه‌گیری‌ها به منطقه اطراف ایستگاه‌ها محدود می‌شود و به‌دلیل هزینه‌های بالای

نصب و نگهداری، در مدیریت و پایش آلودگی هوا کاربرد گسترده‌ای ندارد (Filonchik et al., 2018; Batur et al., 2022). اندازه‌گیری‌های ایستگاه‌های آلودگی اغلب تحت تأثیر خطاهای مهم در این زمینه قرار می‌گیرد و معمولاً به ایجاد الگوهای فضایی غیرعادی منجر می‌شود (Garajeh & Feizizadeh, 2021).

درهمین‌راستا سنجش از دور به‌منزله ابزاری قدرتمند در پایش و اندازه‌گیری آلودگی هوا، اهمیت ویژه‌ای دارد. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، می‌توان مناطق وسیعی را پوشش داد و تغییرات آلودگی هوا را در مقیاس‌های بزرگ و به‌صورت پیوسته، رصد کرد. علاوه‌براین سنجش از دور امکان شناسایی منابع آلودگی، ارزیابی تأثیرات سیاست‌های کاهش آلودگی هوا و بررسی روند تغییرات آلودگی هوا در طول زمان را فراهم می‌کند. همچنین با توجه به هزینه بالای نصب و نگهداری شبکه گسترده‌ای از ایستگاه‌های زمینی، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند روشی کم‌هزینه برای پایش آلودگی هوا در نظر گرفته شود. به‌طور کلی، سنجش از دور در جایگاه مکملی ارزشمند برای ایستگاه‌های زمینی، دید جامعی درباره وضعیت آلودگی هوا در مناطق گوناگون ارائه می‌دهد و در تصمیم‌گیری‌های مرتبط با مدیریت کیفیت هوا بسیار مؤثر است (Mukundan et al., 2022; Naboureh et al., 2023).

سنجنده‌های اصلی ماهواره‌ای که قابلیت شناسایی و اندازه‌گیری غلظت متان را دارند، شامل چندین سنجنده مهم می‌شوند. یکی از این سنجنده‌ها ENVIAT است که روی ماهواره SCIAMACHY نصب شده و در تحلیل ترکیبات جوّی، کاربرد گسترده‌ای دارد. سنجنده TANSO-FTS نیز که از طریق ماهواره GOSAT طراحی شده است، به شناسایی و تحلیل گازهای گلخانه‌ای، از جمله متان کمک می‌کند. در کنار اینها، سنجنده AIRS که روی ماهواره آکوا قرار دارد نیز اطلاعاتی دقیق از وضعیت جوّی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، از جمله متان، در اختیار قرار می‌دهد. همچنین سنجنده TROPOMI که روی ماهواره سنتینل-۵P نصب

در پژوهشی جامع، کمیت انتشار گاز متان از معادن زغال‌سنگ در استرالیا را بررسی و تعیین کردند. آنها از داده‌های سنجنده TROPOMI بهره گرفتند و میزان انتشار متان در مناطق مورد مطالعه را به‌دقت تحلیل کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که برای دو مورد خاص، میزان تخمین‌های ماهیانه انتشار متان به‌طور چشمگیری بیشتر از مقادیر گزارش‌شده از سوی دولت استرالیا بوده است.

پلانت^۴ و همکاران (۲۰۲۲) انتشار متان شهری در فضا را با استفاده از داده‌های سنجنده TROPOMI، در هشت شهر ایالات متحد، ارزیابی کردند. نتایج نشان داد استفاده از داده‌های ماهواره‌ای با دقت بالا، مانند سنجنده TROPOMI، در پایش و تحلیل الگوهای انتشار آلاینده‌های جوئی، از جمله متان در مناطق شهری کاربرد مؤثری دارد. محمدی و آخوندزاده هنزائی^۵ (۲۰۲۲)، به‌منظور پایش و آشکارسازی گاز متان در شهر تهران، از داده‌های سنجنده TROPOMI که در سامانه گوگل ارث انجین در دسترس است، استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که در سال ۱۴۰۱، مقدار متوسط غلظت متان در جنوب تهران، بالا و حدود ۱۹۷۰ ppm بوده است. سانگ^۶ و همکاران (۲۰۲۳)، با هدف تعیین الگوهای مکانی و زمانی متان از سال ۲۰۹۹ تا ۲۰۲۱، از مشاهدات TROPOMI و GOSAT بهره بردند. نتایج این پژوهش گویای افزایش غلظت متان، با مقدار رشد ۸/۴ ppb در سال، بوده است. جین^۷ و همکاران (۲۰۲۴)، به‌منظور پایش غلظت متان با وضوح فضایی بالا در کشور چین، از داده‌های سنجنده TROPOMI و مدل جنگل تصادفی^۸ استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که غلظت متان در

شده، یکی از پیشرفته‌ترین سنجنده‌ها در شناسایی و ردیابی غلظت متان و دیگر آلاینده‌ها در جو است و اطلاعات حیاتی در مورد تغییرات کیفیت هوا و تأثیرات زیست‌محیطی فراهم می‌آورد (Aumann et al., 2003; Alexe et al., 2015; De Gouw et al., 2020; Sadavarte et al., 2021; Pei et al., 2023).

ماهواره‌های سنتینل در زمینه‌های گوناگون پایش جهانی، برای برنامه‌های مدیریت زیست‌محیطی، درک و مقابله با آثار تغییرات اقلیمی، مدیریت منابع آب، هیدرولوژی، نظارت بر گسترش و تغییر ابرشهرها، جنگل‌ها و مناطق کشاورزی و نظارت بر بهره‌وری و سلامت گیاه، اطلاعات حیاتی فراهم کرده‌اند (Kazemi Garajeh et al., 2023). همچنین استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در کنار داده‌های سنجنش از دور، امکان تحلیل پیشرفته و شناسایی مناطق حساس و مستعد انتشار بیشتر متان را فراهم و به سیاست‌گذاران، در اتخاذ تصمیمات دقیق‌تر، کمک می‌کند (Ma et al., 2023).

پژوهش‌های پیشین نیز نقش فناوری سنجنش از دور در تحلیل‌های مکانی و زمانی آلاینده‌های گوناگون هوا، از جمله گاز متان، را به‌صورت گسترده بررسی کرده‌اند. از مطالعات در این زمینه، می‌توان به پژوهش‌هایی اشاره کرد که در ادامه مطرح می‌شود. موسوی^۱ و همکاران (۲۰۱۷) تغییرات ماهیانه و فصلی گاز متان را با استفاده از داده‌های ماهواره GOSAT در ایران، طی سال ۲۰۱۳، پایش کردند. نتایج این پژوهش نشان داد گاز متان، در این دوره، دارای افزایش ۳۵/۰۹ ppb بوده است. چرپانوا^۲ و همکاران (۲۰۲۰) تغییرات مکانی و زمانی غلظت آلاینده متان و ارتباط آن با مناطقی را که دچار حریق می‌شوند، بررسی کردند. آنها با استفاده از داده‌های روزانه سنجنده TROPOMI به این نتیجه رسیدند که غلظت متان، در مناطقی که به‌تازگی دچار آتش‌سوزی شده‌اند، بسیار بیشتر از مناطقی است که سوختگی آنها طی سال گذشته رخ داده است. ساداوارته^۳ و همکاران (۲۰۲۱)،

1. Mousavi

2. Cherepanova

3. Sadavarte

4. Plant

5. Mohammadi & Akhoundzadeh Henzaei

6. Song

7. Jin

8. Random Forest

فراوان و کمتر بودن آلودگی، به سمت جنوب‌غرب بوده است (Nooraie & Shokrani, 2021).

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

برای انجام دادن پژوهش حاضر، از منابع داده متفاوتی استفاده شده است که در ادامه، این منابع و نحوه دستیابی به آنها و استفاده از آنها بررسی می‌شود.

۲-۲-۱- داده‌های ماهواره سنتینل-۵P

در پژوهش حاضر، برای دستیابی به داده‌های آلاینده متان در بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲، از تصاویر سنجنده TROPOMI ماهواره سنتینل-۵P استفاده شده است. سنتینل-۵P اولین مأموریت کوپرنیک برای کنترل آلودگی هواست. با استفاده از سنجنده TROPOMI که در تاریخ ۱۳ اکتبر سال ۲۰۱۷، به منظور پایش تروپوسفر به فضا پرتاب شد، می‌توان گازهای گوناگونی مانند ازن، متان، فرمالدئید، آئروسول، مونوکسید کربن، دی‌اکسید نیتروژن و دی‌اکسید گوگرد را شناسایی کرد (Loyola et al., 2018). تصاویر سنجنده TROPOMI از ماهواره سنتینل-۵P، به دلیل قدرت تفکیک مکانی مناسب و مشاهدات گسترده و جهانی از سطح زمین، می‌توانند در بررسی توزیع فضایی آلاینده‌ها مؤثر باشند. این سنجنده داده‌های آلودگی هوا را روزانه، به صورت تقریباً آبی و در عرض سه ساعت، ارائه می‌دهد و داده‌های آفلاین نیز، چند روز پس از تصویربرداری، در دسترس‌اند (Virghileanu et al., 2020; Shikwambana et al., 2020). این سنجنده، با بهره‌گیری از هندسه تصویربرداری Pushbroom، قادر است تصاویر دقیقی از جو زمین، در سه محدوده طیفی متفاوت، به ثبت برساند. این محدوده‌های طیفی شامل باند فرابنفش و مرئی (UV) با طول موجی بین ۲۷۰ تا ۴۹۰ نانومتر، باند فرورسرخ نزدیک (NIR) در محدوده طول موجی ۶۷۵ تا ۷۷۵ نانومتر، و باند فرورسرخ کوتاه (SWIR) با طول موجی از ۲۳۰۵ تا ۲۳۸۵ نانومتر است (Hadian & Moradizadeh, 2024). جزئیات کامل باندهای ماهواره سنتینل-۵P در جدول ۱ آمده است.

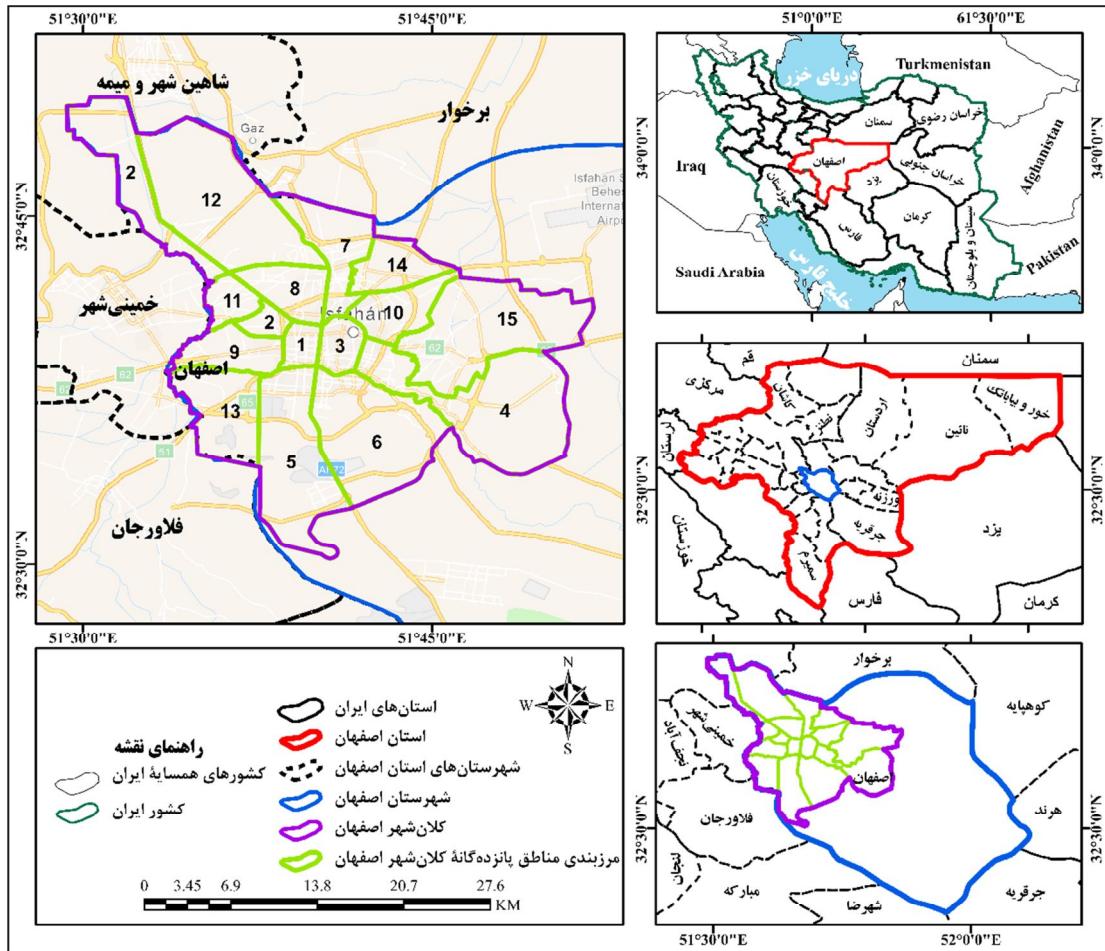
کشور چین به‌طور کلی، در شرق و جنوب، بالا و در غرب و شمال، پایین است. مناطق دارای غلظت بالا شامل چین مرکزی، حوضه سیچوان، دلتای رودخانه مروارید و دلتای رودخانه یانگ‌تسه می‌شود و همچنین، از نظر مقیاس زمانی، غلظت متان تغییرات فصلی مشخصی دارد؛ به‌طوری که فصل‌های تابستان و پاییز بیشترین میزان غلظت این آلاینده را در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۱، داشته‌اند.

اگرچه تحلیل مکانی و زمانی گازهای آلاینده، به‌ویژه متان در سطح جهانی به‌طور گسترده بررسی شده است، در ایران، به‌ویژه کلان‌شهر اصفهان، مطالعات جامعی در این زمینه وجود ندارد. پژوهش حاضر، با بهره‌گیری از داده‌های سنجنده TROPOMI ماهواره سنتینل-۵P در بستر سامانه گوگل ارث انجین، توزیع گاز متان در سطح کلان‌شهر اصفهان را طی سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲، تحلیل زمانی و مکانی کرده است. این تحلیل‌ها شامل بررسی روند تغییرات سالیانه، فصلی و ماهیانه غلظت متان در بخش‌های گوناگون کلان‌شهر اصفهان می‌شود و هدف اصلی آن شناسایی الگوهای پراکنش این آلاینده و تعیین نقاط دارای غلظت بالا (نقاط داغ) و غلظت پایین (نقاط سرد) در مناطق گوناگون این کلان‌شهر است.

۲- مواد و روش کار

۲-۱- معرفی منطقه مورد مطالعه

کلان‌شهر اصفهان، با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳۹ دقیقه و ۴۰ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۸ دقیقه و ۳۰ ثانیه شمالی، پس از تهران و مشهد، سومین شهر بزرگ ایران است. محدوده شهری اصفهان از شاهین‌شهر در شمال تا سپاهان‌شهر در جنوب، خمینی‌شهر و نجف‌آباد در غرب و دشت سجزی در شرق امتداد می‌یابد (شکل ۱). در سال ۱۳۹۵، شهر اصفهان شامل پانزده منطقه شهری و در مجموع، ۱۹۳ محله بوده که ۲۵ محله در شهر گنجانده شده است (Bagheri et al., 2022). جهت توسعه شهر طی دوره‌های متفاوت، با توجه به وجود آب



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی کلان‌شهر اصفهان

جدول ۱. اطلاعات باندهای سنجنده سنتینل-۵P

SWIR	NIR	UVIS	UV	آشکارساز			
۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	باند
۲۳۰۵-۲۳۸۵	۷۲۵-۷۷۵	۶۷۵-۷۲۵	۴۰۵-۵۰۰	۳۱۰-۴۰۵	۳۰۰-۳۲۰	۲۳۰-۳۰۰	دامنه طیفی
۰/۲۵	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۵	۰/۵۰	۱	توان تفکیک طیفی (نانومتر)
۷×۷	۷×۷	۷×۷	۷×۷	۷×۷	۷×۷	۲۸×۲۱	توان تفکیک مکانی (کیلومتر)

منبع: Hadian & Moradizadeh, 2024

۳-۲- روش تحقیق

پژوهش حاضر از نوع غیرمداخله‌ای و تحلیلی-توصیفی است که به‌منظور پایش و شناسایی توزیع مکانی و زمانی آلاینده متان در کلان‌شهر اصفهان انجام شد. برای دستیابی به اهداف این پژوهش، داده‌های مورد نیاز از طریق پلتفرم Google Earth Engine فراخوانی و پردازش شد. در این پژوهش، تصاویر ماهواره‌ای مرتبط با غلظت آلاینده متان در محدوده کلان‌شهر اصفهان، متعلق به دوره زمانی اول فروردین ۱۳۹۸ تا ۲۹ اسفند ۱۴۰۲، استخراج شد. به‌منظور محدود کردن داده‌ها به منطقه جغرافیایی مورد نظر، فیلترهای مکانی با دقت بالا براساس مرزهای جغرافیایی کلان‌شهر اصفهان اعمال شد. همچنین، برای تحلیل دقیق‌تر تغییرات زمانی آلاینده متان، فیلترهای زمانی شامل بازه‌های ماهیانه، فصلی و سالیانه، به‌طور جداگانه اعمال شد تا روند و نوسانات غلظت آلاینده، در این دوره پنج‌ساله، بررسی شود. این فرایندها، با استفاده از زبان برنامه‌نویسی جاوا اسکریپت، در محیط Google Earth Engine انجام شد و داده‌های استخراج‌شده به‌دقت پردازش و آماده تحلیل‌های بعدی شدند.

در مرحله بعد، به‌منظور تحلیل روند تغییرات زمانی غلظت متان، مقادیر متوسط ماهیانه، فصلی و سالیانه استخراج و بررسی شدند. در این بخش، نمودارهای تغییرات زمانی آلاینده متان برای هر یک از بازه‌های

این تنوع در پوشش طیفی به‌سنجنده امکان می‌دهد تا ترکیبات گوناگون جوّی را در طیف‌های متفاوت، با دقت بالایی ثبت و بررسی کند. توانایی ثبت داده‌ها در این باندهای گسترده سبب می‌شود سنجنده امکان شناسایی و تحلیل تغییرات جزئی و دینامیکی در ترکیب و غلظت گازها و ذرات معلق در جو را داشته باشد و درنهایت، به بهبود شناخت و مدیریت مسائل محیط‌زیستی و کیفیت هوا یاری برساند.

برای دستیابی به تصاویر آلاینده متان، از محصولات سامانه گوگل ارث انجین استفاده شده است. اطلاعات درباره باند مورد استفاده از سنجنده TROPOMI ماهواره سنتینل-۵P در این پژوهش، به‌همراه تعداد تصاویر فراخوانی‌شده متعلق به بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲، در جدول ۲ بیان شده است.

۲-۲-۲- داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی

برای بررسی رابطه بین پارامترهای جوّی و نوسانات مقادیر آلاینده متان در کلان‌شهر اصفهان، داده‌های میانگین ماهیانه پارامترهای دما، فشار هوا، بارش و سرعت متوسط باد از ایستگاه‌های هواشناسی سازمان هواشناسی استان اصفهان، متعلق به بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲، گردآوری شد. این مقادیر، پس از محاسبه و تنظیم، به‌منظور تحلیل‌های آماری و بررسی‌های دقیق‌تر در بخش‌های بعدی به کار رفتند.

جدول ۲. اطلاعات مربوط به باند مورد استفاده از تصاویر سنجنده TROPOMI ماهواره سنتینل-۵P برای پایش متان

تعداد تصاویر فراخوانی‌شده	سال	توان تفکیک مکانی (متر)	توضیحات / حداکثر / حداقل / واحد / باند	مجموعه داده	آلاینده
۴۹۷۷	۱۳۹۸	۱۱۱۳/۲	CH4_column_volume_mixing_ratio_dry_ / Column- / 2405 / 1285 / Mol Fraction air averaged dry air mixing ratio of methane, as parts-per-billion.	COPERNI CUS/S5P/O FFL/L3_C H4	متان (CH ₄)
۴۹۶۸	۱۳۹۹				
۵۰۳۷	۱۴۰۰				
۴۶۶۸	۱۴۰۱				
۴۶۰۲	۱۴۰۲				

منبع: earthengine.google.com, 2024

در گام بعد، به منظور رتبه‌بندی و سطح‌بندی مناطق پانزده‌گانه کلان‌شهر اصفهان براساس متوسط پنج‌ساله غلظت آلاینده متان، از ابزارهای آمار ناحیه‌ای^۲ در محیط GIS استفاده شد. این ابزارها امکان تقسیم‌بندی و رتبه‌بندی نواحی گوناگون براساس غلظت آلاینده را فراهم کردند و در نهایت، نقشه‌ها و نمودارهای سطح‌بندی شده از مناطق کلان‌شهر اصفهان تولید شد.

پس از تکمیل تحلیل‌های مکانی و زمانی، برای بررسی ارتباط میان تغییرات زمانی و مکانی غلظت آلاینده متان و پارامترهای جوّی در محدوده مورد مطالعه، داده‌های هواشناسی شامل دمای هوا، سرعت باد، فشار هوا و میزان بارش، متعلق به یک دوره زمانی پنج‌ساله ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲، گردآوری و تحلیل شد. داده‌های هواشناسی از ایستگاه‌های متفاوت در منطقه مورد مطالعه استخراج شدند و برای دستیابی به توزیع پیوسته این داده‌ها در کل منطقه، از روش درون‌یابی وزنی معکوس فاصله^۳ استفاده شد. این روش امکان برآورد مقادیر پارامترهای جوّی را در نقاط بدون ایستگاه هواشناسی، فراهم آورد و برای هر پارامتر جوّی، نقشه‌هایی با دقت مکانی مناسب تولید کرد. در ادامه، میانگین‌های ماهیانه هر یک از پارامترهای جوّی، برای کل منطقه، محاسبه شد تا شاخصی از شرایط جوّی غالب در پهنه مورد مطالعه ایجاد شود. این فرایند به کاهش تأثیر نوسانات محلی و طرح دیدگاهی جامع درباره شرایط جوّی کمک کرد. برای استخراج غلظت آلاینده متان، داده‌های ماهیانه درمورد این آلاینده، برای کل پهنه منطقه مورد مطالعه، فراخوانی شد و میانگین‌گیری مشابهی درمورد غلظت‌های ماهیانه انجام شد. هدف از این مرحله تهیه پایگاه داده جامعی برای بررسی تغییرات زمانی و مکانی غلظت متان و ارتباط آن با پارامترهای جوّی بود. داده‌های به‌دست‌آمده با دقت پردازش شد و نتایج به‌صورت کمی بیان شدند.

زمانی مذکور، ترسیم و روند تغییرات غلظت این آلاینده تحلیل شد. تحلیل‌های انجام‌شده در این مرحله امکان شناسایی الگوهای فصلی، سالیانه و میان‌مدت در غلظت متان را فراهم آورد. همچنین این داده‌ها، برای بررسی تأثیر عوامل اقلیمی و محیطی در تغییرات زمانی آلاینده، به کار رفت.

برای تحلیل‌های مکانی توزیع آلاینده متان، از مجموعه ابزار آمار فضایی در محیط GIS بهره‌گرفته شده است. آمار فضایی به‌منظور شناسایی و بررسی الگوهای توزیع مکانی، شناسایی خوشه‌های فضایی و تحلیل روابط بین پدیده‌های هم‌جوار به کار رفت. این تحلیل‌ها بر مبنای فرض وجود ارتباطات مکانی میان پدیده‌ها، به‌ویژه در حوزه‌هایی که آلودگی هوا نقش محوری دارد، انجام شدند. بدین‌منظور داده‌های غلظت متان در بازه زمانی پنج‌ساله، با اعمال فیلتر زمانی پنج‌ساله در گوگل ارث انجین، به‌صورت میانگین محاسبه شد. تصویر متوسط پنج‌ساله به‌صورت مبنایی برای بررسی الگوهای توزیع مکانی این آلاینده استفاده شد. در این مرحله، تصویر به‌دست‌آمده با استفاده از توابع تبدیل GIS به فرمت وکتور و به‌صورت نقاط مجزا درآمد. تبدیل تصویر رستری به وکتوری با ابزار Raster to Point انجام شد و مختصات دقیق مکانی داده‌ها، به‌همراه مقادیر مربوط به آن، ثبت شد.

در این مرحله، آماره موران جهانی^۱ برای بررسی توزیع مکانی به کار رفت. این آماره امکان شناسایی و تعیین الگوهای خوشه‌ای یا تصادفی توزیع آلاینده‌ها را فراهم می‌آورد. این روش که یکی از ابزارهای قدرتمند در تحلیل‌های جغرافیایی شناخته می‌شود، میزان همبستگی بین مقادیر یک متغیر در مکان‌های مجاور را بررسی می‌کند. به‌دنبال آن، آماره G برای تحلیل شدت خوشه‌ها به کار رفت و در نهایت، آماره Gi برای شناسایی مناطق پرخطر و کم‌خطر، از نظر میزان غلظت آلاینده متان، استفاده شد. این تحلیل، با بررسی الگوهای فضایی انتشار آلودگی، نقاط بحرانی و مناطق کم‌خطر را مشخص می‌سازد.

1. Global Moran's I
2. Zonal Statistics
3. IDW

۳- نتایج و بحث

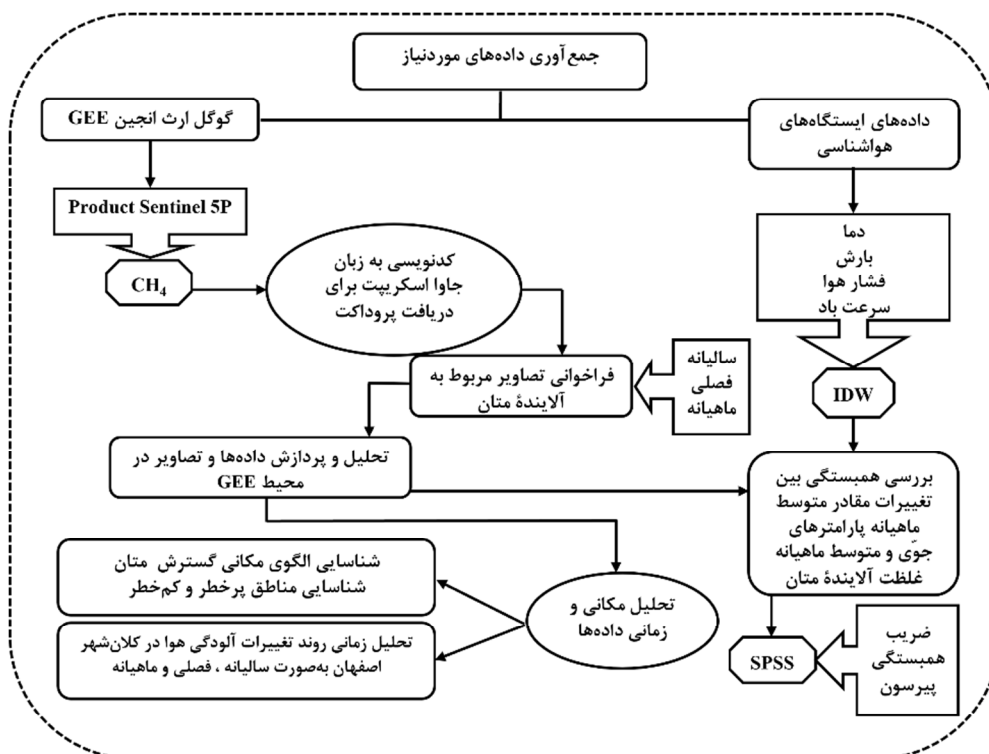
در این بخش، نتایج حاصل از پژوهش به تفکیک تحلیل‌های زمانی و مکانی به‌طور کامل بیان شده است. ابتدا، تحلیل‌های زمانی به تفصیل بررسی شدند و سپس جزئیات تحلیل‌های مکانی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه، یافته‌ها به صورت جامع توضیح داده شده‌اند تا روند تغییرات و الگوهای مشاهده‌شده به‌طور کامل برای خوانندگان روشن شود.

۳-۱- نتایج تحلیل زمانی

۳-۱-۱- تحلیل تغییرات ماهیانه

برای بررسی تغییرات ماهیانه غلظت آلاینده متان در کلان‌شهر اصفهان، نمودار این تغییرات طی سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲ ترسیم و در شکل ۳ ارائه شده است. نمودار شکل ۳ نمایانگر نوسانات چشمگیر در میزان آلاینده، طی سال‌های مذکور بود. در سال ۱۳۹۸، غلظت متان روندی افزایشی را نشان داد؛ به‌طوری که

در مرحله بعد، برای تحلیل روابط میان متغیرهای جوی و غلظت متان، روش آماری ضریب همبستگی پیرسون به کار رفت. این روش امکان سنجش شدت و جهت ارتباط خطی میان متغیرها را فراهم می‌کند. تحلیل‌های همبستگی، درمورد هریک از پارامترهای جوی (شامل دما، سرعت باد، فشار هوا و بارش) و غلظت متان، به صورت جداگانه انجام شد. مقادیر ضریب همبستگی در بازه ۱- تا ۱+ قرار دارند؛ به‌گونه‌ای که مقادیر نزدیک به ۱+ نشان‌دهنده وجود رابطه‌ای مستقیم و قوی، مقادیر نزدیک به ۱- بیانگر رابطه‌ای معکوس و قوی، و مقادیر نزدیک به صفر گویای وجود نداشتن رابطه خطی معنادار بین دو متغیر است. نتایج این تحلیل‌ها به صورت جدول‌ها و نمودارهای گرافیکی ارائه شد تا روندها و الگوهای غالب، در ارتباط میان متغیرهای جوی و غلظت آلاینده متان، به‌طور شفاف به تصویر کشیده شود. روش انجام شدن پژوهش در شکل ۲ به صورت کلی داده شده است.



شکل ۲. روندنمای مراحل گوناگون پژوهش

رسید؛ در صورتی که کمترین غلظت‌ها در اردیبهشت و تیر ثبت شدند. این تحلیل‌ها، به‌طور کلی، نشان دادند که غلظت ماهیانه متان در اصفهان، طی این پنج سال، روندی صعودی و مستمر داشته است.

همچنین، برای نمایش چگونگی تغییرات مکانی زمانی آلاینده متان در سطح مناطق پانزده‌گانه کلان‌شهر اصفهان، نقشه تغییرات متوسط ماهیانه این آلاینده در ماه‌های متفاوت سال، طی بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲، در شکل ۴ ارائه شده است.

۳-۱-۲- تحلیل تغییرات فصلی

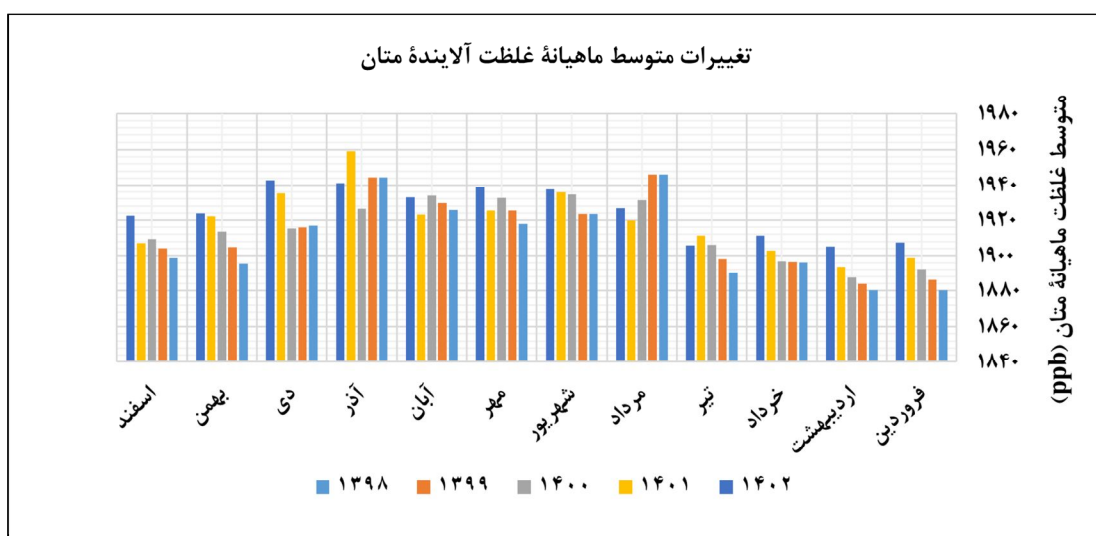
به‌منظور بررسی و تحلیل تغییرات فصلی غلظت آلاینده متان در کلان‌شهر اصفهان طی سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲، نمودار تغییرات فصلی در این بازه زمانی تهیه و در شکل ۵ ارائه شده است.

نتایج تحلیل نمودار مذکور نشان می‌دهد که در طول بازه زمانی مورد بررسی، فصل‌های تابستان و پاییز همواره بیشترین مقادیر غلظت متان را به خود اختصاص داده‌اند. این الگوهای فصلی نشان‌دهنده نوسانات مشخصی است که احتمالاً تحت تأثیر عوامل گوناگونی همچون فعالیت‌های صنعتی، شرایط جوی خاص هر فصل و دیگر متغیرهای محیطی شکل گرفته‌اند.

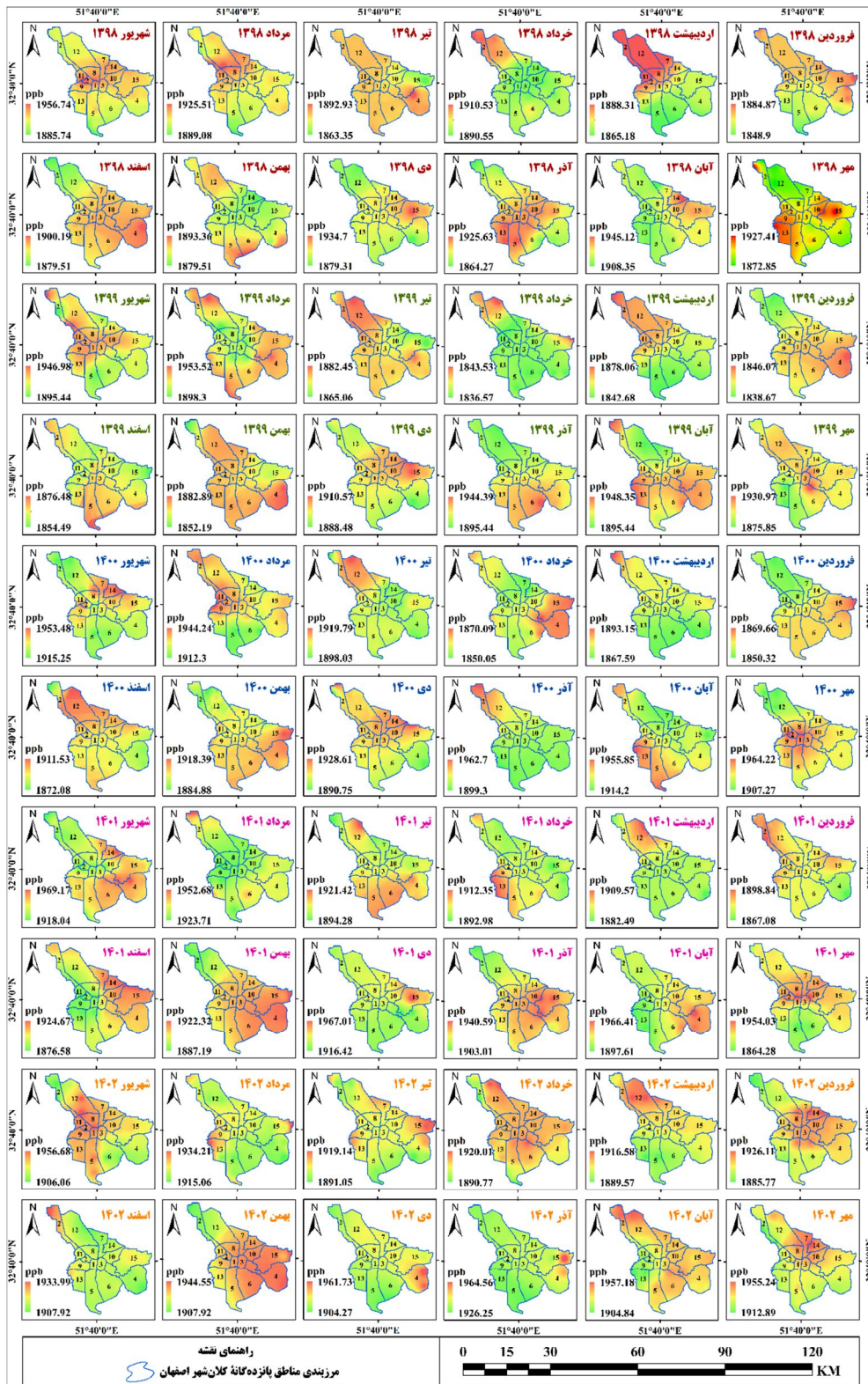
کمترین مقادیر آن در ماه‌های فروردین، اردیبهشت و تیر ثبت شد و ازدیگرسو بالاترین غلظت‌ها در ماه‌های آبان و دی مشاهده شد. این روند افزایشی، با ثبت بیشترین سطح آلودگی در دی، بارزتر شد و الگوی خاصی از تجمع آلاینده متان را در این مقطع زمانی برجسته ساخت.

در سال ۱۳۹۹، این روند افزایشی تداوم یافت؛ بیشترین میزان غلظت در ماه‌های مرداد و آذر به ثبت رسید و در مقابل، فروردین و اردیبهشت کمترین غلظت‌ها را به خود اختصاص داد. این نتایج نشان‌دهنده رشد تدریجی غلظت متان در اصفهان بود؛ به‌ویژه در ماه‌های مرداد و آذر که به‌منزله نقاط اوج این سال ثبت شدند. در سال ۱۴۰۰ نیز، الگوی صعودی ادامه یافت و بیشترین غلظت‌ها در بازه مرداد تا آذر و به‌ویژه در شهریور مشاهده شد. این روند افزایش تدریجی تجمع متان را طی سال‌های متوالی تأیید کرد.

در سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ نیز، افزایش غلظت متان ادامه یافت. در سال ۱۴۰۱، بیشترین میزان این آلاینده طی ماه‌های آذر و شهریور ثبت شد؛ در حالی که فروردین و اردیبهشت کمترین میزان غلظت را داشتند و آذر، بار دیگر، به‌منزله ماهی با بیشترین آلودگی شناخته شد. در سال ۱۴۰۲، الگوی صعودی غلظت متان ادامه یافت و میزان این آلاینده، در ماه‌های دی و آذر، به اوج خود



شکل ۳. نمودار تغییرات متوسط ماهیانه غلظت آلاینده متان



شکل ۴. تغییرات مکانی-زمانی متوسط ماهیانه آلاینده متان، طی بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲، در کلان‌شهر اصفهان

برای نمایش چگونگی تغییرات مکانی زمانی آلاینده متان در سطح مناطق پانزده‌گانه کلان‌شهر اصفهان نیز نقشه تغییرات متوسط فصلی این آلاینده، طی بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲، در شکل ۶ آمده است.

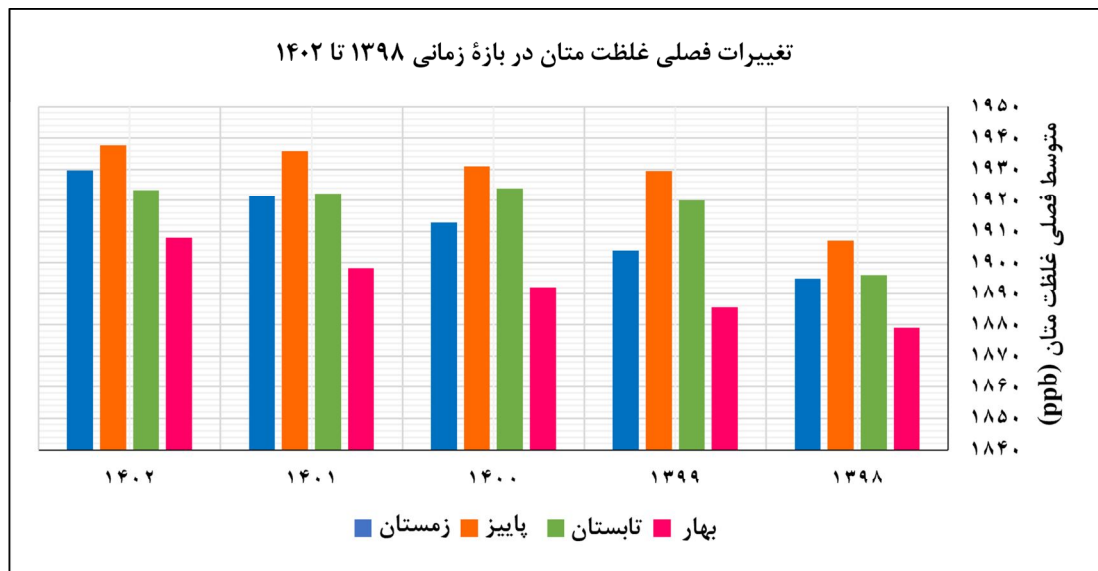
۳-۱-۳- تحلیل تغییرات سالیانه

به‌منظور بررسی و تحلیل تغییرات سالیانه غلظت آلاینده متان در کلان‌شهر اصفهان، طی سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲، نمودار تغییرات متوسط سالیانه در این بازه زمانی تهیه و در شکل ۷ ارائه شده است.

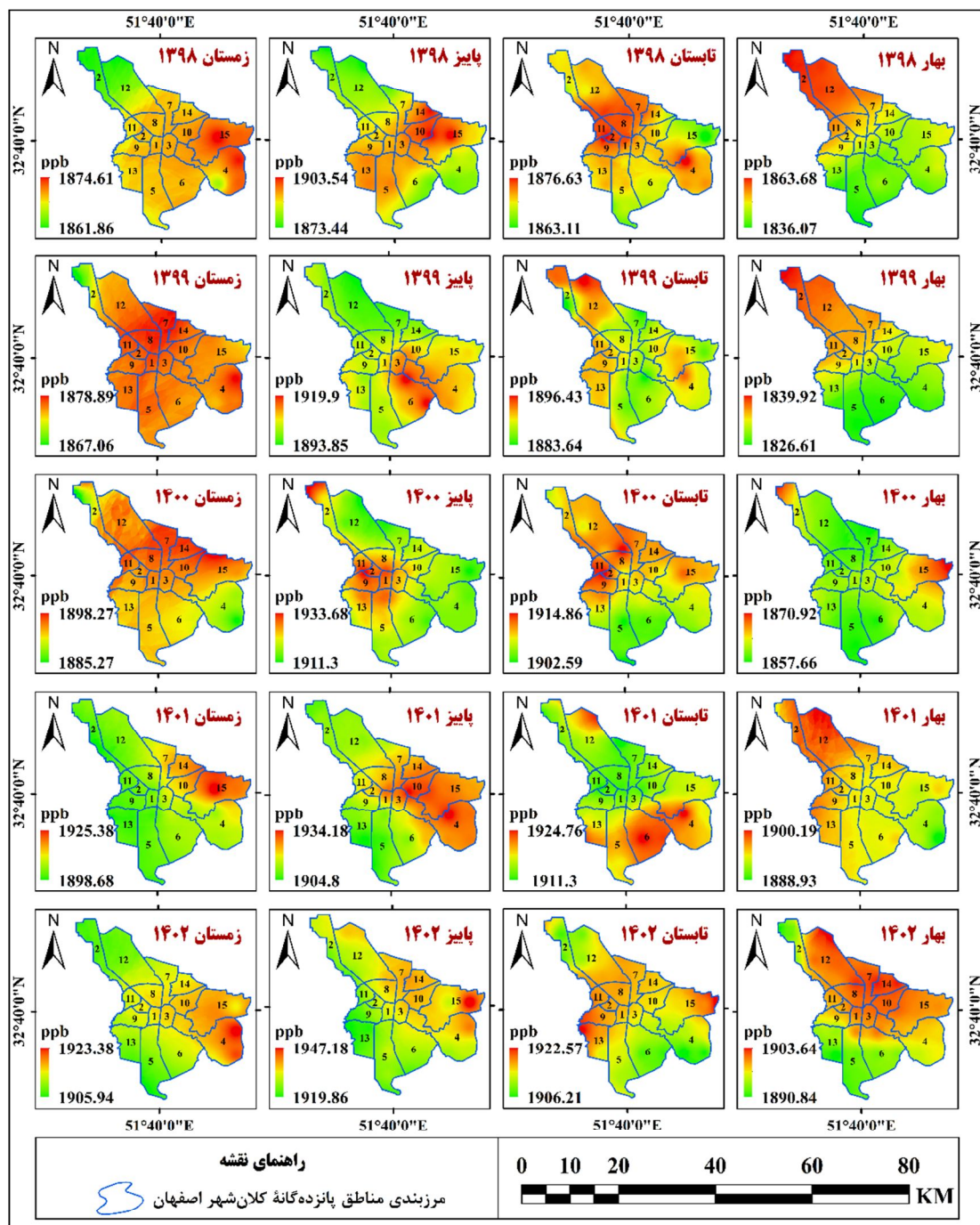
به‌طور کلی، نمودار نشان‌دهنده روندی صعودی در غلظت این آلاینده در طول دوره مورد بررسی است. این بدان معنی است که غلظت متان در هوا به‌طور پیوسته در حال افزایش بوده؛ به‌نحوی که کمترین میزان متان در سال ۱۳۹۸ و بیشترین آن در سال ۱۴۰۲ مشاهده شده است. شیب خط رگرسیون سرعت این افزایش را نشان می‌دهد. با توجه به معادله رگرسیون، هر سال به‌طور متوسط حدود $7/0634$ واحد به غلظت متان اضافه می‌شود.

براساس داده‌های در دست، سال ۱۴۰۲ به‌طور خاص، به‌منزله سالی با بیشترین میزان غلظت متان در فصل پاییز، در مقایسه با سایر سال‌های دوره ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲، شناسایی شده است. درمقابل، فصل بهار سال ۱۳۹۸ کمترین میزان غلظت این آلاینده را در بازه زمانی مذکور به خود اختصاص داده است. این اختلاف درخور توجه در مقادیر غلظت متان، میان فصل‌ها و سال‌های متفاوت، نمایانگر تأثیرپذیری بالای این آلاینده از شرایط فصلی و تغییرات زمانی است که تحلیل و تفسیر دقیق‌تر آن می‌تواند به روشن‌تر شدن نقش عوامل گوناگون کمک کند.

طی مقایسه نتایج تحقیق حاضر با تحقیقات افرادی همچون محمدی و آخوندزاده هنزائی (۲۰۲۲)، شباهت‌هایی در افزایش غلظت متان طی فصل‌های سرد و کاهش آن در فصل‌های گرم، در تهران، مشاهده شد. همچنین این نتایج، با مطالعات ساداوارته و همکاران (۲۰۲۱) که نقش فعالیت‌های انسانی در افزایش غلظت متان را تأیید کرده‌اند، همخوانی داشت.



شکل ۵. نمودار تغییرات متوسط فصلی غلظت آلاینده متان



شکل ۶. تغییرات مکانی-زمانی متوسط فصلی آلاینده متان طی بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲، در کلان‌شهر اصفهان

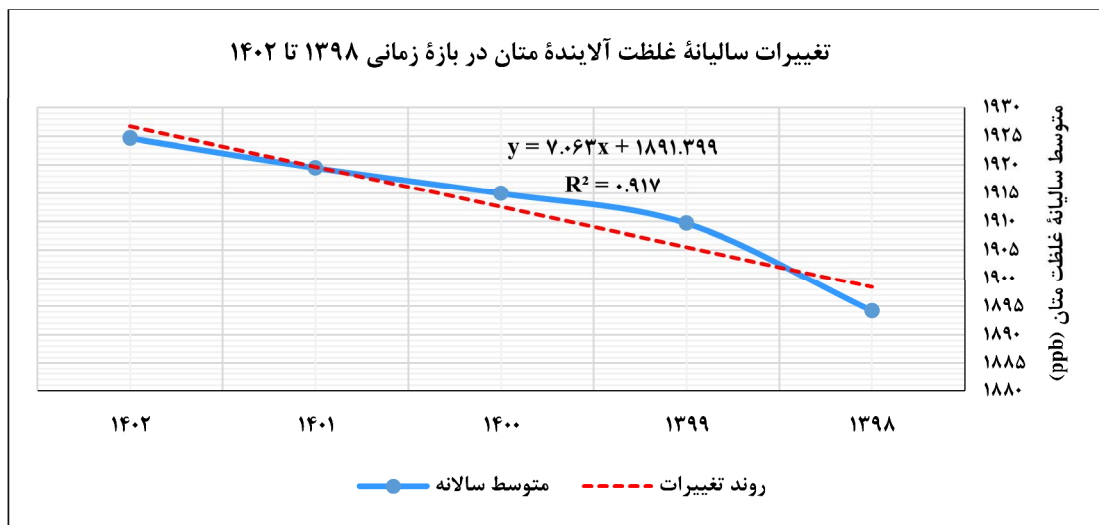
طوفان، می‌شود. این افزایش ناشی از علل متعددی است که از محتمل‌ترین آنها می‌توان به فعالیت‌های انسانی، مانند انتشار متان از صنایع نفت و گاز، کشاورزی (به‌ویژه تولیدات شالیزار و دامداری) و دفع پسماندها، اشاره کرد.

متان گاز گلخانه‌ای قدرتمندی است که در گرمایش جهانی نقش مهمی دارد؛ در نتیجه، افزایش غلظت آن در جو سبب تشدید تغییرات اقلیمی و بروز پدیده‌های شدید آب‌وهوایی، مانند افزایش دما، خشکسالی، سیل و

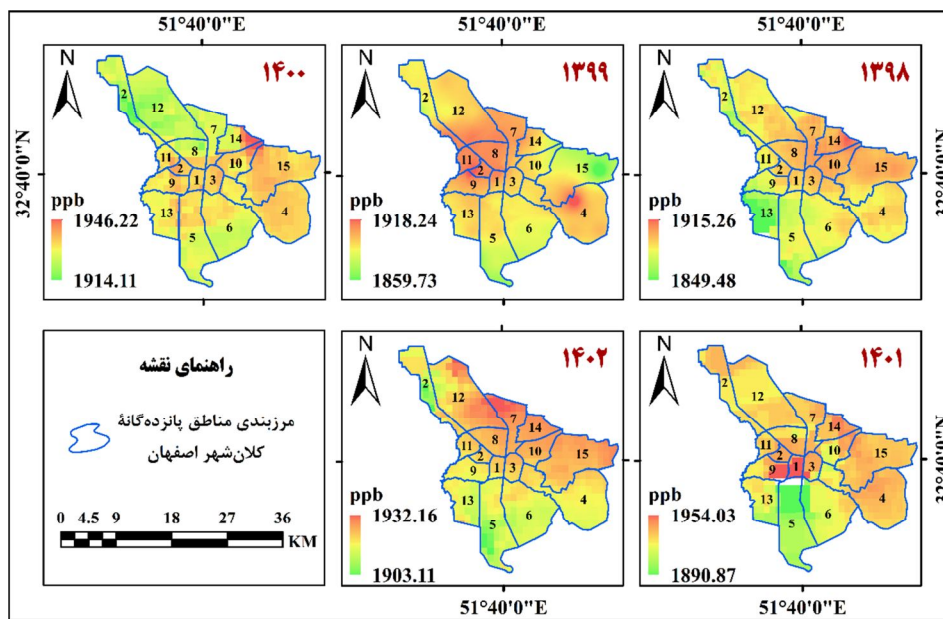
۳-۲- تحلیل مکانی

برای تحلیل الگوهای فضایی و روابط بین مقادیر آلاینده متان در کلان‌شهر اصفهان، متوسط پنج‌ساله تمامی تصاویر فراخوانی شده در سامانه گوگل ارث انجین برای این آلاینده محاسبه شد و برای تحلیل‌های این بخش، به کار رفت؛ نتیجه آن در شکل ۹ آمده است.

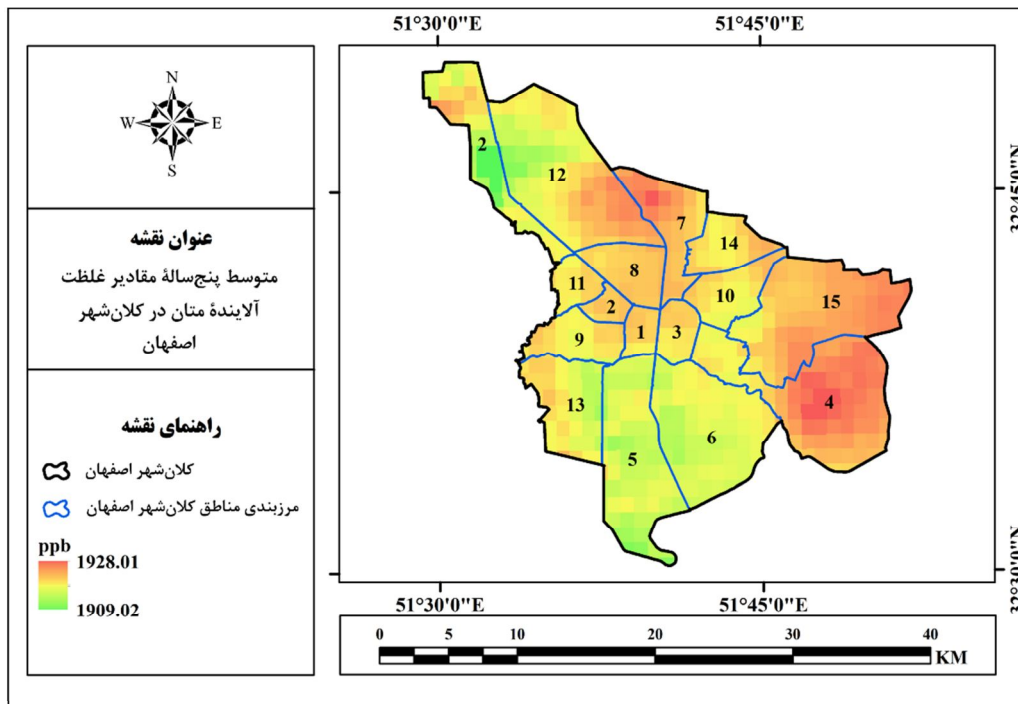
تغییرات اقلیمی و افزایش دما نیز می‌توانند، با افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌های تولیدکننده متان در منابع طبیعی، مانند باتلاق‌ها، بر شدت این پدیده بیفزایند. همچنین برای نمایش چگونگی تغییرات مکانی- زمانی آلاینده متان در سطح مناطق پانزده‌گانه کلان‌شهر اصفهان، نقشه تغییرات متوسط سالیانه این آلاینده طی بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲ در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۷. نمودار تغییرات متوسط سالیانه غلظت آلاینده متان



شکل ۸. تغییرات مکانی- زمانی متوسط سالیانه آلاینده متان طی بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲، در کلان‌شهر اصفهان

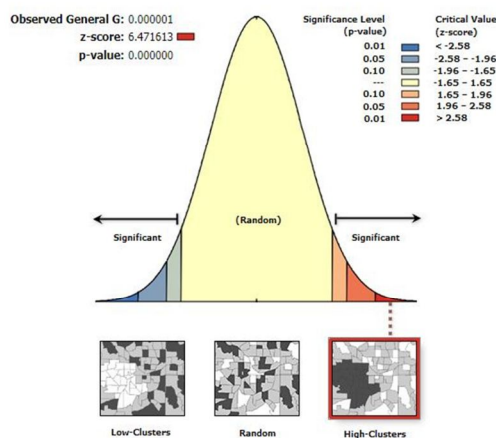


شکل ۹. تغییرات مکانی- زمانی متوسط پنج‌ساله آلاینده متان در کلان‌شهر اصفهان

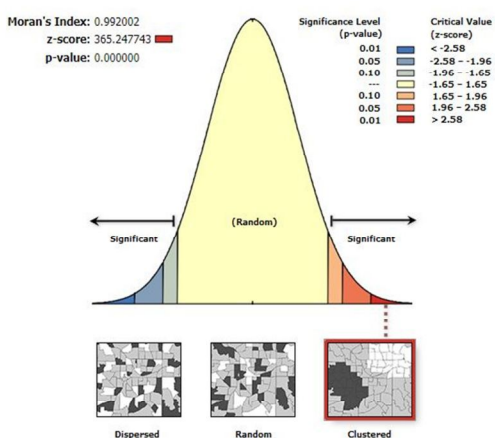
۳-۲-۱- شناسایی الگوی توزیع مکانی آلاینده متان

در این بخش، با هدف شناسایی و تحلیل الگوهای مکانی پراکنش آلاینده متان در سطح مناطق شهری کلان‌شهر اصفهان، از روش آماری خودهمبستگی

فضایی موران استفاده شده است. نتایج محاسبه شاخص موران، در مورد آلاینده متان، در شکل ۱۰ به صورت گرافیکی نمایش داده شده است.



شکل ۱۱. نتیجه شاخص HLC در مورد آلاینده متان



شکل ۱۰. نتیجه شاخص خودهمبستگی موران در مورد آلاینده متان

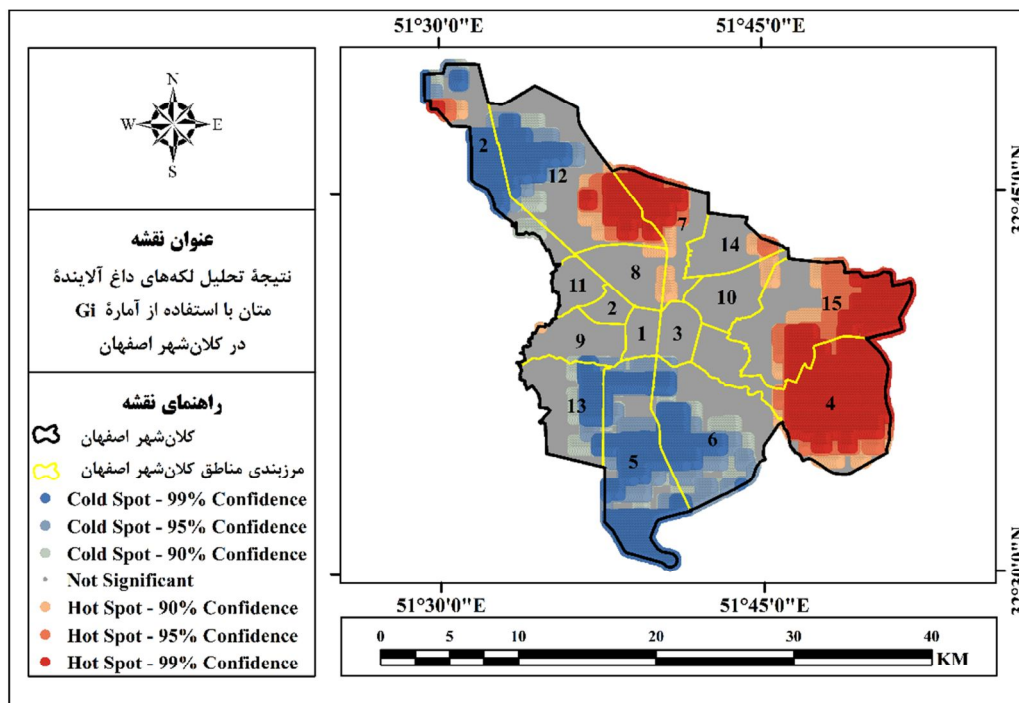
مقدار بسیار پایین p -value می‌توان گفت که این خوشه‌بندی به‌هیچ‌روی تصادفی نیست و از نظر آماری، با سطح اطمینان ۹۹٪ معنی‌دار شده است. مقدار عددی شاخص عمومی G نیز عددی بسیار کوچک است که گویای قوی بودن این خوشه‌بندی در داده‌هاست.

این الگوها می‌توانند نشان‌دهنده منابع آلودگی خاص یا تأثیرات جغرافیایی و محیطی در مناطق خاصی از کلان‌شهر اصفهان باشند که نیازمند بررسی و تحلیل بیشتر، برای شناسایی دقیق منابع و اتخاذ تدابیر مناسب به‌منظور کاهش آلودگی‌اند.

۲-۲-۳- شناسایی مناطق کم‌خطر و پرخطر کلان‌شهر اصفهان با استفاده از تحلیل نقاط داغ (آماره G_i)
در این بخش، برای شناسایی مناطق کم‌خطر و پرخطر از نظر مقدار آلودگی متان، تحلیل نقاط داغ براساس آماره G_i استفاده شد که نتیجه این تحلیل در شکل ۱۲ ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، نتایج شاخص موران در مورد کلان‌شهر اصفهان نشان می‌دهد که مقادیر آلاینده متان به‌شدت خودمبسته‌اند و الگوی فضایی بسیار معنی‌داری دارند. مقدار شاخص موران نزدیک به ۱، z -score بسیار بالا و p -value نزدیک به صفر، همگی نشان می‌دهند که مقادیر این آلاینده به‌صورت خوشه‌ای توزیع شده است و این خوشه‌بندی به‌هیچ‌صورت تصادفی نیست.

با توجه به نتایج شاخص موران در مورد آلاینده متان و شناسایی الگوی پراکنش مکانی خوشه‌ای، برای تشخیص شدت خوشه‌ای بودن این توزیع، از شاخص آماره G_i استفاده شد که نتایج حاصل از آن در شکل ۱۱ ارائه شده است. مطابق شکل ۱۱، در کلان‌شهر اصفهان، مقادیر غلظت آلاینده متان به‌صورت High-Clusters خوشه‌بندی و توزیع شده است. این نکته بیان می‌کند که این خوشه‌بندی بیشتر در مورد مقادیر زیاد این متغیر اتفاق افتاده است و با توجه به مقدار بالای z -score و



شکل ۱۲. نتیجه تحلیل نقاط داغ آلاینده متان در کلان‌شهر اصفهان

است. این مناطق اغلب در جنوب کلان‌شهر اصفهان قرار گرفته‌اند.

سایر مناطق نیز که بیشتر به رنگ خاکستری دیده می‌شوند، نشان‌دهنده رخ ندادن تغییرات معنی‌دار در تراکم آلاینده متان در این مناطق‌اند و تراکم یکنواخت‌تری نیز دارند.

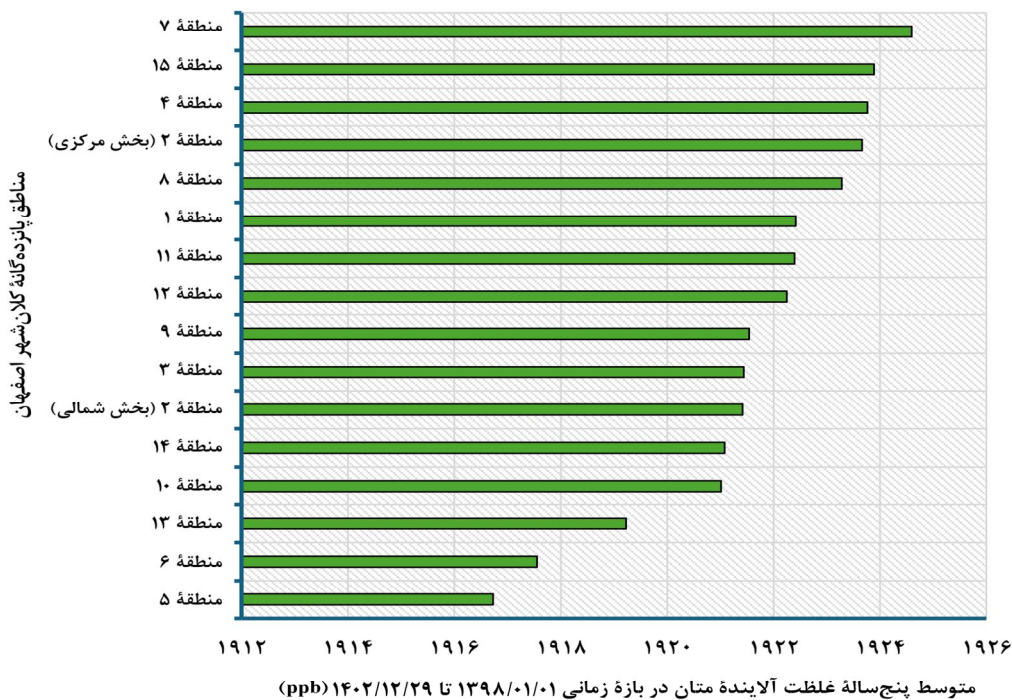
۳-۲-۳- سطح‌بندی مناطق کلان‌شهر اصفهان از نظر آلاینده متان

وضعیت سطح‌بندی مناطق گوناگون کلان‌شهر اصفهان، از نظر متوسط پنج‌ساله غلظت آلاینده متان، در شکل ۱۳ ارائه شده است.

با توجه به شکل ۱۳، می‌توان استنباط کرد منطقه ۷ در کلان‌شهر اصفهان بیشترین میزان آلودگی متان و منطقه ۵ نیز کمترین آلودگی را طی بازه زمانی مورد مطالعه در این پژوهش، به خود اختصاص داده‌اند.

همان‌طور که شکل ۱۲ نشان می‌دهد، مناطق ۴، ۷ و بخش‌هایی از مناطق ۱۲، ۱۵ و بخش شمالی منطقه ۲ به‌منزله نقاط داغ با سطوح اطمینان ۹۹٪، ۹۵٪ و ۹۰٪ مشخص شده‌اند. این مناطق اغلب در بخش‌های شرق و شمال‌شرق کلان‌شهر اصفهان واقع شده‌اند و تراکم بالای متان را بیان می‌کنند. ازجمله مهم‌ترین عوامل مؤثر در این مسئله، می‌توان به تمرکز بالای اراضی کشاورزی و فعالیت‌های دامداری در مناطق ۷، ۱۵ و بخش‌هایی از منطقه ۴، فعالیت پالایشگاه اصفهان در بخش شمالی منطقه ۲، و واقع شدن سایت دفن پسماند در بخش شرقی اصفهان و منطقه ۴ اشاره کرد. همچنین مناطق ۵، ۶، بخش‌های از مناطق ۱۲، ۱۳ و قسمت‌های کوچکی از بخش شمالی منطقه ۲ به‌منزله نقاط سرد با هوای پاک‌تر، با سطوح اطمینان ۹۹٪، ۹۵٪ و ۹۰٪ مشخص شده‌اند که تراکم پایین متان در این مناطق را نشان می‌دهند و کیفیت هوا در آنها بهتر

وضعیت رتبه‌بندی مناطق متفاوت کلان‌شهر اصفهان از نظر آلاینده متان



شکل ۱۳. وضعیت سطح‌بندی مناطق متفاوت کلان‌شهر اصفهان از نظر غلظت آلاینده متان

۳-۳- بررسی رابطه زمانی میان مقادیر متوسط آلاینده متان و عوامل متفاوت آب‌وهوایی پدیده‌های جوّی و آب‌وهوایی تأثیرات عمیقی در کیفیت هوا و مقادیر آلاینده‌های گوناگون دارند. تغییرات در دما، فشار هوا، متوسط سرعت باد و مقدار بارش می‌تواند در وضعیت آلاینده‌های جوّی تأثیری مستقیم یا غیرمستقیم بگذارد و در نتیجه، در سلامت انسان و محیط‌زیست نیز نقشی چشمگیر داشته باشد (Giovannini et al., 2020). در این بخش، به‌منظور

بررسی ارتباط بین پارامترهای جوّی و تغییرات مقادیر آلاینده متان در کلان‌شهر اصفهان، با استفاده از داده‌های دریافت‌شده از سازمان هواشناسی استان اصفهان، مقادیر متوسط ماهیانه چهار پارامتر مهم آب‌وهوایی شامل دمای هوا، فشار جو، میزان بارش و سرعت متوسط باد و همچنین مقادیر متوسط ماهیانه غلظت این آلاینده که از سامانه گوگل ارث انجین طی دوره پنج‌ساله ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲ استخراج شد، محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. مقادیر متوسط ماهیانه پارامترهای جوّی به‌همراه مقادیر متوسط ماهیانه غلظت آلاینده متان

Date	CH ₄ (ppb)	T ₁ (°C)	Wind (m/s)	Pr ₂ (mm)	P ₃ (mBar)	Date	CH ₄ (ppb)	T ₁ (°C)	Wind (m/s)	Pr ₂ (mm)	P ₃ (mBar)
1398/01	1880.236	13.843	2.404	18.686	836.200	1400/07	1932.61	17.462	2.057	1	840.204
1398/02	1880.3085	21.909	2.565	12.173	837.465	1400/08	1933.78	8.862	1.629	38.226	840.543
1398/03	1896.1735	28.829	2.051	0.153	834.947	1400/09	1926.49	5.676	1.758	15.368	839.555
1398/04	1890.384	31.752	1.766	0	831.124	1400/10	1915.17	2.854	2.17	12.43	836.109
1398/05	1946.085	29.062	2.168	0.819	834.830	1400/11	1913.58	6.473	2.598	8.062	836.884
1398/06	1923.45	25.425	1.61	0	837.030	1400/12	1909.5	11.709	3.886	13.178	835.670
1398/07	1917.9135	18.149	1.173	16.084	840.543	1401/01	1898.71	18.967	3.277	14.395	836.191
1398/08	1925.8135	7.367	1.027	31.736	841.397	1401/02	1893.53	21.6	3.603	4.16	835.111
1398/09	1944.533	4.092	0.756	43.521	839.596	1401/03	1902.68	28.742	3.198	0.094	833.476
1398/10	1916.7495	2.327	2.024	8.82	836.861	1401/04	1911.24	29.747	3.161	7.94	831.381
1398/11	1895.749	6.485	3.134	17.135	837.332	1401/05	1919.75	27.574	2.739	0.224	835.007
1398/12	1898.872	10.144	3.233	34.168	835.813	1401/06	1935.75	25.305	2.361	0	836.736
1399/01	1886.198	15.131	3.277	38.647	836.004	1401/07	1925.55	19.231	1.903	0.011	841.127
1399/02	1883.92925	22.616	3.065	6.598	837.124	1401/08	1923.06	10.089	1.622	26.755	840.600
1399/03	1896.46675	28.143	3.11	0.988	833.301	1401/09	1959.13	4.43	1.551	24.528	840.445
1399/04	1898.182	29.723	3.056	1.232	832.797	1401/10	1935.12	0.16	1.579	53.832	840.694
1399/05	1946.085	28.995	2.983	0	831.173	1401/11	1922.18	3.82	2.5	56.877	837.547
1399/06	1923.45	23.652	2.262	0	838.397	1401/12	1906.94	11.456	3.092	18.631	835.959
1399/07	1925.26175	15.979	1.79	0.001	841.587	1402/01	1907.28	16.826	3.103	10.611	835.818
1399/08	1929.79675	10.121	1.695	45.336	840.681	1402/02	1905.245	22.72	3.266	2.761	836.457
1399/09	1944.533	3.704	1.531	23.46	840.511	1402/03	1911.442	28.264	2.953	5.503	832.569
1399/10	1915.95975	2.841	1.818	0	840.197	1402/04	1905.624	31.026	3.341	0	832.399
1399/11	1904.6645	7.42	2.562	14.302	838.591	1402/05	1926.566	28.591	2.851	0.224	835.759
1399/12	1904.186	12.182	3.661	15.818	835.824	1402/06	1937.616	25.479	2.579	0	837.131
1400/01	1892.16	19.42	2.992	6.039	837.761	1402/07	1938.845	19.047	2.187	7.89	840.493
1400/02	1887.55	22.53	2.941	20.215	835.831	1402/08	1932.958	11.448	1.66	22.86	839.839
1400/03	1896.76	29.648	2.971	0	834.416	1402/09	1941.174	7.214	1.61	9.454	840.829
1400/04	1905.98	30.902	3.164	0	831.589	1402/10	1942.778	6.342	1.818	17.135	838.170
1400/05	1931.16	28.546	2.815	1.468	834.919	1402/11	1923.632	5.18	2.562	34.168	837.655
1400/06	1934.43	25.25	2.3	0	835.586	1402/12	1922.542	9.164	3.661	38.647	836.898

1. Temperature
2. Precipitation
3. Pressure

دارد که این ارتباط، با توجه به مقدار Sig به دست آمده، از نظر آماری معنی‌دار نیست. این یافته‌ها نشان می‌دهند که احتمالاً این رابطه تصادفی است و تأثیر بارش در غلظت متان اهمیت چندانی ندارد. با این حال ممکن است علت این رابطه ضعیف وجود منابع محلی ثابت تولیدکننده آلاینده متان در منطقه باشد.

در مورد سرعت باد، داده‌های جدول ۴ حاکی از وجود رابطه‌ای معکوس و معنی‌دار بین میانگین سرعت باد ماهیانه و غلظت متان است. به عبارت دیگر، با افزایش سرعت باد، غلظت متان کاهش چشمگیری می‌یابد. این پدیده که با سطح اطمینان ۹۹٪ تأیید شده است، به نقش کلیدی باد در پراکنده‌سازی ذرات آلاینده و کاهش غلظت آنها در جو ارتباط دارد. افزایش سرعت باد سبب می‌شود آلاینده‌ها، در سطوح بالاتر و نواحی گسترده‌تر، توزیع شود و تأثیرات تجمعی آنها کاهش یابد.

در نهایت، تحلیل‌ها نشان می‌دهند که بین میانگین فشار هوا و غلظت متوسط ماهیانه متان، رابطه‌ای مثبت و معنی‌دار وجود دارد. افزایش فشار هوا به‌طور کلی با افزایش غلظت این آلاینده همراه است. این رابطه احتمالاً

نتایج تحلیل همبستگی پیرسون بین شاخص‌های متفاوت جوی و مقادیر غلظت متوسط ماهیانه متان در جدول ۶ آمده است. تحلیل داده‌های جدول ۴ بیان می‌کند که بین تغییرات دمایی و غلظت متوسط ماهیانه آلاینده متان، رابطه‌ای معکوس و قوی وجود دارد که این ارتباط، با سطح اطمینان ۹۵٪، از نظر آماری معنی‌دار است. به بیان دیگر، افزایش دما به کاهش شایان توجه در غلظت متان منجر می‌شود. این پدیده را می‌توان به دو عامل کلیدی نسبت داد: نخست، افزایش پراکنده‌گی آلاینده‌ها در دماهای بالاتر که ناشی از کاهش پایداری لایه‌های جو و افزایش توربولانس است؛ دوم، تسریع واکنش‌های شیمیایی که سبب تجزیه سریع‌تر برخی آلاینده‌ها، از جمله متان، می‌شود. در مقابل، کاهش دما به تشکیل لایه‌های جوی پایداری می‌انجامد که مانع از اختلاط عمودی هوا می‌شود. در این شرایط، آلاینده‌ها در لایه‌های نزدیک به سطح زمین تجمع و غلظت آنها افزایش می‌یابد.

نتایج همچنین نشان می‌دهند که بین میانگین بارش ماهیانه و غلظت متان، رابطه‌ای مثبت اما ضعیف وجود

جدول ۴. نتایج آزمون همبستگی پیرسون

		CH ₄	Temperature	Wind	Precipitation	pressure
CH₄	Pearson Correlation	1	-.280*	-.570**	.133	.449**
	Sig. (2-tailed)		.030	.000	.323	.000
	N	60	60	60	60	60
Temperature	Pearson Correlation	-.280*	1	.397**	-.683**	-.688**
	Sig. (2-tailed)	.030		.002	.000	.000
	N	60	60	60	60	60
Wind	Pearson Correlation	-.570**	.397**	1	-.313*	-.669**
	Sig. (2-tailed)	.000	.002		.018	.000
	N	60	60	60	60	60
Precipitation	Pearson Correlation	.133	-.683**	-.313*	1	.443**
	Sig. (2-tailed)	.323	.000	.018		.001
	N	60	60	60	60	60
Pressure	Pearson Correlation	.449**	-.688**	-.669**	.443**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	.001	
	N	60	60	60	60	60

** همبستگی در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار است

* همبستگی در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار است

ناشی از تأثیرات فشار بالا در پایداری جو، کاهش سرعت باد و تغییرات در الگوهای انتشار و پراکندگی آلاینده‌هاست. فشار بالاتر می‌تواند به تقویت پایداری لایه‌های جوی کمک کند و مانع پراکندگی آلاینده‌ها شود که این مسئله به افزایش غلظت متان در جو می‌انجامد. نتایج آماری حاصل از پژوهش حاضر، در مورد همبستگی پارامترهای جوی و تغییرات متان، با مطالعات مشابه مانند جین و همکاران (۲۰۲۴) در چین و پلان و همکاران (۲۰۲۲) در ایالات متحد هم‌خوانی داشت.

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر، با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده TROPOMI و تحلیل‌های آماری در GIS، توانسته است الگوهای مکانی و زمانی انتشار متان را در کلان‌شهر اصفهان به‌طور جامع شناسایی کند. نتایج حاکی از آن است که فصل‌های سرد سال، به دلیل پایداری جو، کاهش دما و افزایش سکون هوا، شرایط مساعدی برای تجمع گاز متان فراهم می‌کنند و در نتیجه، غلظت این گاز در این دوره‌ها افزایش شایان توجهی می‌یابد. مناطق شمالی و شرقی اصفهان نیز کانون‌های اصلی انتشار متان شناسایی شدند. بررسی‌های انجام‌شده نشان داد که این مناطق تحت تأثیر فعالیت‌های گسترده صنعتی و کشاورزی قرار دارند که نقش اصلی را در افزایش میزان انتشار این گاز ایفا می‌کنند.

در راستای کاهش آلودگی متان، تقویت زیرساخت‌های مدیریت پسماند جایگاه ویژه‌ای دارد. احداث و به‌روزرسانی تأسیسات مدرن مدیریت پسماندهای شهری و صنعتی، با استفاده از فناوری‌هایی نظیر تبدیل زباله به انرژی، می‌تواند نقشی کلیدی در کاهش انتشار متان ایفا کند. همچنین اصلاح روش‌های کشاورزی و دامداری راهکاری اثربخش برای مقابله با این معضل زیست‌محیطی است. این اقدامات شامل توسعه فناوری‌های نوین کاهش انتشار متان از دامداری‌ها می‌شود؛ مانند استفاده از افزودنی‌های غذایی خاص برای کاهش تخمیر معده‌ای دام‌ها و نیز مدیریت اصولی

۳-۴- صحت‌سنجی نتایج پژوهش

اگرچه نبود داده‌های زمینی از محدودیت‌های این پژوهش به شمار می‌آید، انطباق نتایج به‌دست‌آمده با یافته‌های پژوهش‌های پیشین، اعتبار و صحت این نتایج را تقویت می‌کند. یافته‌های این مطالعه قابلیت بالای داده‌های ماهواره‌ای سنجنده TROPOMI و روش‌های تحلیلی به‌کاررفته در شناسایی الگوهای انتشار متان در کلان‌شهر اصفهان را بیان می‌کند. این هم‌خوانی علمی مبنایی قوی برای اعتماد به نتایج در شرایطی را فراهم می‌آورد که داده‌های زمینی به‌صورت مستقیم در دسترس نیستند.

مطالعات مشابهی که در سایر مناطق و با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای انجام شده‌اند، نتایج یکسانی را درباره الگوهای انتشار متان دربرداشته‌اند. برای نمونه، تحقیقاتی که محمدی و آخوندزاده هنزائی (۲۰۲۲) در شهر تهران انجام دادند الگوی فصلی افزایش غلظت متان در ماه‌های سرد سال و کاهش آن در فصل‌های گرم را به‌وضوح نشان داده است. این الگوها با نتایج پژوهش حاضر تطابق چشمگیری دارند. علاوه‌براین، نتایج به‌دست‌آمده در زمینه ارتباط دما و سرعت باد، با تغییرات غلظت متان، با مطالعات ساداوارته و همکاران (۲۰۲۱) در چین و پلان و همکاران (۲۰۲۲) در ایالات متحد هم‌خوانی دارد.

این تطابق میان نتایج پژوهش حاضر و مطالعات مشابه، در مقیاس‌های جغرافیایی و اقلیمی متفاوت،

ارزشمند، نقش مهمی در پیش‌برد این مطالعه داشت، صمیمانه تقدیر می‌کنیم. در نهایت، قدردانی عمیق خود را از تمامی عزیزانی که با راهنمایی‌ها و همکاری‌های خود در این مسیر همراه ما بودند، ابراز می‌داریم.

۶- منابع

- Alexe, M., Bergamaschi, P., Segers, A., Detmers, R., Butz, A., Hasekamp, O., ... & Kort, E.A., 2015, **Inverse Modelling of CH₄ Emissions for 2010–2011 Using Different Satellite Retrieval Products from GOSAT and SCIAMACHY**, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(1), PP. 113-133, <https://doi.org/10.5194/acp-15-113-2015>, 2015.
- Aumann, H.H., Chahine, M.T., Gautier, C., Goldberg, M.D., Kalnay, E., McMillin, L.M., ... & Susskind, J., 2003, **AIRS/AMSU/HSB on the Aqua Mission: Design, Science Objectives, Data Products, and Processing Systems**, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2), PP. 253-264, DOI: 10.1109/TGRS.2002.808356.
- Bagheri, R., Ebrahimi Bouzani, M. & Mokhtari Malekabadi, R., 2022, **Spatial Distribution and Deprivation Zoning in Isfahan City**, *Geography (Scientific Quarterly of the Iranian Geographical Association)*, 20(73), PP. 37-62.
- Basu, S., Lan, X., Dlugokencky, E., Michel, S., Schwietzke, S., Miller, J.B., ... & Manca, G., 2022, **Estimating Emissions of Methane Consistent with Atmospheric Measurements of Methane and $\delta^{13}C$ of Methane**, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(23), PP. 15351-15377, <https://doi.org/10.5194/acp-22-15351-2022>.
- Batur, I., Markolf, S.A., Chester, M.V., Middel, A., Hondula, D. & Vanos, J., 2022, **Street-Level Heat and Air Pollution Exposure Informed by Mobile Sensing**, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 113, P. 103535, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103535>.
- Cherepanova, E.V., Feoktistova, N.V. & Chudakova, M.A., 2020, **Analysis of Methane Concentration Anomalies over Burned Areas of the Boreal and Arctic Zone of Eastern Siberia in 2018–2019 Using TROPOMI Data**, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 56, PP. 1470-1481, <https://doi.org/10.1134/S0001433820120385>.

پسماندهای کشاورزی. برای کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه متان، پایش مستمر و نظام‌مند انتشار این گازها از واحدهای صنعتی و اعمال الزامات سختگیرانه زیست‌محیطی، اقدامی ضروری به شمار می‌آید. جنگل‌کاری و توسعه فضای سبز در مناطق دارای غلظت بالای متان، با کاشت گونه‌هایی گیاهی که امکان جذب بالای کربن را دارند، نیز می‌تواند به کاهش این گاز در جو کمک شایانی کند. در این زمینه برنامه‌های آموزشی گسترده‌ای، با هدف ارتقای سطح آگاهی عمومی درباره تأثیر انتشار متان، و نقش رفتارهای انسانی در کاهش این آلودگی اهمیت چشمگیری دارد.

همچنین برای ارتقای دقت در داده‌های جمع‌آوری شده و اتخاذ تصمیم‌های علمی‌تر و مؤثرتر، پیشنهاد می‌شود که در مناطق آلوده، ایستگاه‌های زمینی پایش متان احداث شود. این ایستگاه‌ها، در تعامل با داده‌های ماهواره‌ای، می‌توانند ابزاری دقیق و کارآمد برای پایش بلندمدت انتشار متان فراهم کنند. چنین رویکردی، افزون‌بر کمک به بهبود کیفیت داده‌ها، زمینه‌ساز برنامه‌ریزی بهتر و اجرای مؤثرتر سیاست‌های کاهش آلودگی خواهد بود.

به‌طور کلی مجموعه‌ای از اقدامات یکپارچه، شامل تقویت زیرساخت‌های مدیریت پسماند، بهینه‌سازی فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی، توسعه فضای سبز، پایش دقیق گازهای گلخانه‌ای و اجرای برنامه‌های آموزشی، می‌تواند به کاهش معتدله انتشار متان در کلان‌شهرها، بهبود کیفیت هوا و کاهش تأثیر تغییرات اقلیمی کمک کند. این اقدامات در نهایت به تحقق اهداف توسعه پایدار و ایجاد محیط‌زیستی سالم‌تر برای نسل‌های آینده منجر خواهد شد.

۵- سپاس‌گزاری

نگارندگان، با نهایت سپاس و قدردانی، حمایت مالی شهرداری اصفهان را که مسیر انجام شدن این پژوهش را هموار ساخت، ارج می‌نهند. همچنین از سازمان هواشناسی اصفهان که با در اختیار گذاشتن داده‌های

- De Gouw, J.A., Veeffkind, J.P., Roosenbrand, E., Dix, B., Lin, J.C., Landgraf, J. & Levelt, P.F., 2020, **Daily Satellite Observations of Methane from Oil and Gas Production Regions in the United States**, Scientific Reports, 10(1), P. 1379, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57678-4>.
- Filonchik, M., Yan, H., Yang, S. & Lu, X., 2018, **Detection of Aerosol Pollution Sources during Sandstorms in Northwestern China Using Remote Sensed and Model Simulated Data**, Advances in Space Research, 61(4), PP. 1035-1046, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.11.037>.
- Garajeh, M.K. & Feizizadeh, B., 2021, **A Comparative Approach of Data-Driven Split-Window Algorithms and MODIS Products for Land Surface Temperature Retrieval**, Applied Geomatics, 13, PP. 715-733, <https://doi.org/10.1007/s12518-021-00388-x>.
- Giovannini, L., Ferrero, E., Karl, T., Rotach, M.W., Staquet, C., Trini Castelli, S. & Zardi, D., 2020, **Atmospheric Pollutant Dispersion over Complex Terrain: Challenges and Needs for Improving Air Quality Measurements and Modeling**, Atmosphere, 11(6), P. 646, <https://doi.org/10.3390/atmos11060646>.
- Google Earth Engine, 2024, COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_CH4: TROPOMI CH4: Offline. Google Earth Engine. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S5P_OFFL_L3_CH4.
- Hadian, A. & Moradzadeh, M., 2024, **Modeling the Distribution of NO₂ and O₃ Pollutant Concentrations with Appropriate Spatial Resolution Using Integrated Ground and Satellite Data**, Journal of Remote Sensing and GIS of Iran, 16(2), PP. 85-104, DOI: 10.48308/gisj.2023.103726.
- Jin, Z., He, J. & Wang, W., 2024, **Monitoring Methane Concentrations with High Spatial Resolution over China by Using Random Forest Model**, Remote Sensing, 16(14), P. 2525, <https://doi.org/10.3390/rs16142525>.
- Kazemi Garajeh, M., Laneve, G., Rezaei, H., Sadeghnejad, M., Mohamadzadeh, N. & Salmami, B., 2023, **Monitoring Trends of CO, NO₂, SO₂, and O₃ Pollutants Using Time-Series Sentinel-5 Images Based on Google Earth Engine**, Pollutants, 3(2), PP. 255-279, <https://doi.org/10.3390/pollutants3020019>.
- Li, Y. & Fang, H., 2022, **Real-Time Software for the Efficient Generation of the Clumping Index and Its Application Based on the Google Earth Engine**, Remote Sensing, 14(15), P. 3837, <https://doi.org/10.3390/rs14153837>.
- Loyola, D.G., Gimeno García, S., Lutz, R., Argyrouli, A., Romahn, F., Spurr, R.J., ... & Schüssler, O., 2018, **The Operational Cloud Retrieval Algorithms from TROPOMI on Board Sentinel-5 Precursor**, Atmospheric Measurement Techniques, 11(1), PP. 409-427, <https://doi.org/10.5194/amt-11-409-2018>.
- Ma, L., Cui, Y., Liu, B., Liao, B., Wei, J., Han, H. & Tian, W., 2023, **A GIS-Based Method for Modeling Methane Emissions from Paddy Fields by Fusing Multiple Sources of Data**, Science of The Total Environment, 859, P. 159917, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159917>.
- Mohammadi, M. & Akhoundzadeh Henzaei, M., 2022, **Monitoring and Detection of Methane Gas in Tehran Using Google Earth Engine Platform**, Geoinformatics in Civil Engineering, 1(1), PP. 41-52, DOI: 10.22061/jrsg.2022.1948.
- Mousavi, S.M., Falahatkar, S. & Farajzadeh, M., 2017, **Monitoring Monthly and Seasonal Changes of Methane Gas Using GOSAT Satellite Data**, Journal of Physical Geography Research, 49(2), PP. 327-340, DOI: 10.22059/jphgr.2017.62848.
- Mukundan, A., Huang, C.C., Men, T.C., Lin, F.C. & Wang, H.C., 2022, **Air Pollution Detection Using a Novel Snap-Shot Hyperspectral Imaging Technique**, Sensors, 22(16), P. 6231, <https://doi.org/10.3390/s22166231>.
- Naboureh, A., Li, A., Bian, J. & Lei, G., 2023, **National Scale Land Cover Classification Using the Semiautomatic High-Quality Reference Sample Generation (HRSG) Method and an Adaptive Supervised Classification Scheme**, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 16, PP. 1858-1870, 10.1109/JSTARS.2023.3241620.
- Nooraie, H. & Shokrani, S.M., 2021, **Spatial Analysis and Classification of the Fifteen Regions of Isfahan Metropolis Based on Air Pollution Distribution**, Geography and Environmental Planning, 32(2), PP. 83-102, DOI: 10.22108/gep.2021.126981.1394.

- Orsetti, E., Tollin, N., Lehmann, M., Valderrama, V.A. & Morató, J., 2022, **Building Resilient Cities: Climate Change and Health Interlinkages in the Planning of Public Spaces**, International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(3), P. 1355, <https://doi.org/10.3390/ijerph19031355>.
- Pei, Z., Han, G., Mao, H., Chen, C., Shi, T., Yang, K., ... & Gong, W., 2023, **Improving Quantification of Methane Point Source Emissions from Imaging Spectroscopy**, Remote Sensing of Environment, 295, P. 113652, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113652>.
- Plant, G., Kort, E.A., Murray, L.T., Maasackers, J.D. & Aben, I., 2022, **Evaluating Urban Methane Emissions from Space Using TROPOMI Methane and Carbon Monoxide Observations**, Remote Sensing of Environment, 268, P. 112756, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112756>.
- Sadavarte, P., Pandey, S., Maasackers, J.D., Lorente, A., Borsdorff, T., Denier van der Gon, H., ... & Aben, I., 2021, **Methane Emissions from Superemitting Coal Mines in Australia Quantified Using TROPOMI Satellite Observations**, Environmental Science & Technology, 55(24), PP. 16573-16580, <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03976>.
- Shikwambana, L., Mhangara, P. & Mbatha, N., 2020, **Trend Analysis and First Time Observations of Sulphur Dioxide and Nitrogen Dioxide in South Africa Using TROPOMI/Sentinel-5 P Data**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 91, P. 102130.
- Skeie, R.B., Hodnebrog, Ø. & Myhre, G., 2023, **Trends in Atmospheric Methane Concentrations since 1990 Were Driven and Modified by Anthropogenic Emissions**, Communications Earth & Environment, 4(1), P. 317, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102130>.
- Song, H., Sheng, M., Lei, L., Guo, K., Zhang, S. & Ji, Z., 2023, **Spatial and Temporal Variations of Atmospheric CH₄ in Monsoon Asia Detected by Satellite Observations of GOSAT and TROPOMI**, Remote Sensing, 15(13), P. 3389, <https://doi.org/10.3390/rs15133389>.
- Virghileanu, M., Săvulescu, I., Mihai, B.A., Nistor, C. & Dobre, R., 2020, **Nitrogen Dioxide (NO₂) Pollution Monitoring with Sentinel-5P Satellite Imagery over Europe during the Coronavirus Pandemic Outbreak**, Remote Sensing, 12(21), P. 3575, <https://doi.org/10.3390/rs12213575>.
- Vlasov, D., Ramírez, O. & Luhar, A., 2022, **Road Dust in Urban and Industrial Environments: Sources, Pollutants, Impacts, and Management**, Atmosphere, 13(4), P. 607, <https://doi.org/10.3390/atmos13040607>.

This Page is Intentionally Left Blank