

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

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

corresponding author: Alisadeghi@geo.ui.ac.ir

<https://orcid.org/0000-0002-2320-7720>

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-2P 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-2P 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 5, as well as in the eastern areas, particularly in areas 12 and 13. These high methane concentrations were linked to activities such as livestock farming, agriculture, and landfill operations. In contrast, the southern regions, particularly areas 7 and 8, 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- P , Remote Sensing, Isfahan Metropolis, Spatial and Temporal Analysis

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

احمدرضا ابوترابی برزآبادی، علی صادقی*، داریوش رحیمی

گروه جغرافیا و برنامه ریزی شهری، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۴

*نویسنده عهده دار مکاتبات: Alisadeghi@geo.ui.ac.ir

<https://orcid.org/0000-0002-2320-7720>

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 به‌عنوان یکی از قوی‌ترین گازهای گلخانه‌ای نقش چشمگیری در گرمایش جهانی، تغییرات اقلیمی، و کاهش کیفیت هوا ایفا می‌کند. منابع انتشار این گاز شامل تالاب‌ها، دامداری‌ها، کشاورزی، و دفن زباله است که فعالیت‌های انسانی سهم قابل‌توجهی در افزایش آن دارند. 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 بهینه و توانایی ارائه داده‌های با وضوح مکانی و زمانی بالا، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع اطلاعاتی برای مطالعه آلودگی هوا مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش، از داده‌های سنجنده TROPOMI بر روی ماهواره Sentinel- P ، که امکان اندازه‌گیری غلظت گاز متان در جو را فراهم می‌کند، به‌عنوان منبع اصلی داده استفاده شده است. این داده‌ها مبنای تحلیل فضایی و زمانی توزیع متان در محدوده کلان‌شهر اصفهان بوده و امکان بررسی دقیق الگوهای مکانی و زمانی این آلاینده را در سطح گسترده فراهم کرده‌اند. باوجود اهمیت بالای آلودگی متان، تاکنون مطالعه‌ای جامع در خصوص تحلیل توزیع مکانی و زمانی این آلاینده در کلان‌شهر اصفهان انجام نشده است. هدف این پژوهش، تحلیل جامع و سیستماتیک توزیع متان در شهر اصفهان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و شناسایی ارتباط میان تغییرات عوامل جوی و تغییرات گاز متان است تا راهکارهایی موثر برای مدیریت آلودگی هوا و بهبود کیفیت زیست‌محیطی ارائه 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 Sentinel- P 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 گردید. در نهایت، روند تغییرات زمانی غلظت متان در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه مورد تحلیل قرار گرفت.

۱- مقاله‌ی حاضر مستخرج از نتایج پایان‌نامه نویسنده اول تحت عنوان «تحلیل فضایی و زمانی توزیع آلاینده‌های هوا در مناطق کلان‌شهری با استفاده از سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: کلان‌شهر اصفهان)» است که تحت راهنمایی نویسنده دوم و با مشاوره نویسنده سوم در دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی دانشگاه اصفهان ارائه و دفاع شده است.

*نویسنده مسئول

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 فصول سرد سال به‌ویژه در نواحی صنعتی و کشاورزی بیشترین غلظت را تجربه کرده است. بررسی‌های مکانی نشان‌دهنده تشکیل خوشه‌های قابل توجهی از غلظت‌های بالا در مناطق شمالی، به‌ویژه مناطق ۴ و ۷، و همچنین مناطق شرقی، به‌ویژه مناطق ۱۲ و ۱۵، می‌باشد 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 به‌عنوان نقاط سرد با غلظت‌های پایین‌تر شناخته شدند. علاوه بر این، ارزیابی ارتباط پارامترهای اقلیمی نشان داد که دما و سرعت باد به‌طور معکوس با تغییرات غلظت متان در ارتباط بوده‌اند، در حالی که فشار هوا نشان‌دهنده رابطه‌ی مثبت و معناداری با تغییرات غلظت این گاز بود.

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 فصول سرد سال و تمرکز بر مناطق شناسایی‌شده به‌عنوان نقاط داغ انجام گیرد. در این راستا، بهینه‌سازی فرآیندهای 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 به‌طور مؤثری در کاهش این آلاینده نقش ایفا کند. علاوه بر این، استفاده از داده‌های سنجش از دور و مدل‌های پیش‌بینی پیشرفته برای پایش مداوم غلظت متان و اجرای راهکارهای کنترل آلودگی به‌صورت هدفمند، به‌عنوان یک راهبرد مؤثر توصیه می‌شود.

کلیدواژه: آلاینده‌ی 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 (CH_4) به‌عنوان یکی از قوی‌ترین گازهای گلخانه‌ای با توان گرمایش جهانی بالا و پتانسیل تأثیرگذاری در تغییرات اقلیمی، نقشی مهم در ایجاد عدم تعادل در سیستم اقلیمی جهانی دارد (Orsetti et al., ۲۰۲۲). مطالعات علمی نشان می‌دهند که متان دومین گاز گلخانه‌ای مهم پس از دی‌اکسیدکربن است (Skeie et al., ۲۰۲۳). از سال ۲۰۰۷، سطح متان جوی به‌طور مداوم در حال افزایش بوده و هم‌اکنون به حدود ۲.۵ برابر سطح اولیه خود رسیده است (Basu et al., ۲۰۲۲).

برخلاف دی‌اکسیدکربن، متان باوجود غلظت پایین‌تر، تأثیر چشمگیری برافزایش دمای زمین و کاهش کیفیت هوا دارد و از منابع مختلفی به اتمسفر وارد می‌شود. منابع جوی متان تنوع و پیچیدگی قابل توجهی دارند و به‌طور کلی به دودسته طبیعی و انسانی تقسیم می‌شوند. منابع طبیعی انتشار متان شامل تالاب‌ها، اقیانوس‌ها، پوشش گیاهی، موریانه‌ها و حیات‌وحش می‌باشند. درمقابل، منابع انسانی شامل فعالیت‌هایی نظیر کشت برنج، دفن زباله، دام‌پروری، سوزاندن زیست‌سوخت، استخراج سوخت‌های فسیلی و احتراق می‌شوند (Jin et al., ۲۰۲۴).

یکی از چالش‌های اصلی در مدیریت شهری و زیست‌محیطی، درک توزیع مکانی و زمانی این آلاینده‌ها به‌منظور کاهش اثرات منفی آن‌ها بر سلامت و محیط‌زیست است. ازاین‌رو، تحلیل زمانی و مکانی توزیع آلاینده‌ها، ابزاری حیاتی برای شناسایی الگوهای پراکندگی، نقاط داغ و سرد آلاینده‌ها و اثرات فصلی و سالانه است (Vlasov et al., ۲۰۲۲).

ایستگاه‌های سنجش آلودگی به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین روش‌های اندازه‌گیری آلودگی شناخته شده‌اند بااین‌حال، اندازه‌گیری‌ها به منطقه اطراف ایستگاه‌ها محدود می‌شود و به‌دلیل هزینه‌های بالای نصب و نگهداری، به‌طور گسترده‌ای در مدیریت و پایش آلودگی هوا استفاده نمی‌شود (Filonchyk et al., ۲۰۱۸; Batur et al., ۲۰۲۲). اندازه‌گیری‌های ایستگاه‌های آلودگی اغلب تحت تأثیر خطاهای مهم مرتبط با آنها قرار می‌گیرند و اغلب منجر به الگوهای فضایی غیرعادی می‌شوند (Gharajeh & Feizizadeh, ۲۰۲۱).

در همین راستا، سنجنش‌ازدور به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در پایش و اندازه‌گیری آلودگی هوا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌توان مناطق وسیعی را پوشش داده و تغییرات آلودگی هوا را در مقیاس‌های بزرگ و به‌صورت پیوسته رصد کرد. علاوه بر این، سنجنش‌ازدور امکان شناسایی منابع آلودگی، ارزیابی اثرات 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 به‌عنوان یک روش کم‌هزینه برای پایش آلودگی هوا در نظر گرفته شود. به‌طور کلی، سنجنش‌ازدور به‌عنوان یک مکمل ارزشمند برای ایستگاه‌های زمینی، دید جامعی از وضعیت آلودگی هوا در مناطق مختلف ارائه می‌دهد و در تصمیم‌گیری‌های مرتبط با مدیریت کیفیت هوا بسیار موثر است (Mukundan et al., ۲۰۲۳; Naboureh et al., ۲۰۲۲).

سنجنده‌های اصلی ماهواره‌ای که قابلیت شناسایی و اندازه‌گیری غلظت متان را دارند، شامل چندین سنجنده‌ی مهم می‌باشند. یکی از این سنجنده‌ها، SCIAMACHY است که بر روی ماهواره ENVISAT نصب شده و به‌طور گسترده‌ای برای تحلیل ترکیبات جوی به کار می‌رود. همچنین، سنجنده TANSO-FTS که توسط ماهواره GOSAT طراحی شده، به شناسایی و تجزیه و تحلیل گازهای گلخانه‌ای از جمله متان کمک می‌کند. در کنار این‌ها، سنجنده‌ی AIRS که بر روی ماهواره Aqua قرار دارد، نیز به ارائه اطلاعات دقیق از وضعیت جوی و انتشار گازهای گلخانه‌ای از جمله متان می‌پردازد. از طرف دیگر، سنجنده (TROPOMI) که بر روی ماهواره Sentinel-۵P نصب شده است، به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین سنجنده‌ها در شناسایی و ردیابی غلظت متان و دیگر آلاینده‌ها در جو عمل می‌کند و اطلاعات حیاتی در مورد تغییرات کیفیت هوا و اثرات زیست‌محیطی را فراهم می‌آورد (Aumann et al., ۲۰۰۳; Alexe et al., ۲۰۱۵; De Gouw et al., ۲۰۲۰; Sadavarte et al., ۲۰۲۱; Pei et al., ۲۰۲۳).

ماهواره‌های سنتینل، اطلاعات حیاتی در زمینه‌های مختلف پایش جهانی برای برنامه‌های مدیریت زیست‌محیطی، درک و مقابله با اثرات تغییرات اقلیمی، مدیریت منابع آب، هیدرولوژی، نظارت بر گسترش و تغییر ابرشهرها، جنگل‌ها و مناطق کشاورزی و نظارت بر بهره‌وری و سلامت گیاه ارائه کرده‌اند (Kazemi Gharajeh et al., ۲۰۲۳). همچنین، استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در کنار داده‌های سنجنش‌ازدور، امکان تحلیل پیشرفته و شناسایی مناطق حساس و مستعد انتشار بیشتر متان را فراهم کرده و به سیاست‌گذاران در اتخاذ تصمیمات دقیق‌تر کمک می‌کند (Ma et al., ۲۰۲۳).

پژوهش‌های پیشین نیز به‌طور گسترده به بررسی نقش فناوری سنجنش‌ازدور در تحلیل‌های مکانی و زمانی آلاینده‌های مختلف هوا، از جمله گاز متان، پرداخته‌اند. از نمونه مطالعات انجام‌شده در این زمینه می‌توان به پژوهش‌هایی که در ادامه ارائه شده است، اشاره کرد. موسوی و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی به پایش تغییرات ماهانه و فصلی گاز متان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ی GOSAT در کشور ایران در سال ۲۰۱۳ پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد گاز متان دارای افزایشی به مقدار ppb ۳۵/۰۹ در این دوره بوده است. چریانوا و همکاران^۱ (۲۰۲۰)، در پژوهشی به بررسی تغییرات مکانی و زمانی غلظت آلاینده‌ی متان و ارتباط آن با مناطق دچار حریق پرداختند. آن‌ها با استفاده از داده‌های روزانه سنجنده TROPOMI به این نتیجه رسیدند که غلظت متان در مناطقی که به‌تازگی دچار آتش‌سوزی شده‌اند، به‌طور قابل‌توجهی از مناطقی که سوختگی آن‌ها مربوط به سال گذشته است، بیشتر است. ساداوارته و همکاران^۲ (۲۰۲۱)، در پژوهشی جامع به بررسی و تعیین کمیت انتشار گاز متان از معادن زغال‌سنگ در استرالیا پرداختند. آن‌ها از داده‌های سنجنده TROPOMI بهره‌گرفته و به تجزیه و تحلیل دقیق میزان انتشار متان در مناطق مورد مطالعه اقدام کردند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که برای دو مورد خاص، میزان تخمین‌های ماهانه انتشار متان، به‌طور چشمگیری بالاتر از مقادیر گزارش‌شده توسط دولت استرالیا بوده است.

^۱ Cherepanova et al

^۲ Sadavarte et al

پلانت و همکاران^۱ (۲۰۲۲)، در پژوهشی به ارزیابی انتشار متان شهری در فضا با استفاده از داده‌های سنجنده‌ی TROPOMI در ۸ شهر ایالات متحده پرداختند. نتایج نشان داد استفاده از داده‌های ماهواره‌ای بادقت بالا، نظیر سنجنده‌ی TROPOMI، به‌طور موثری برای پایش و تحلیل الگوهای انتشار آلاینده‌های جوی از جمله متان در مناطق شهری به‌کار می‌رود. محمدی و آخوندزاده هنزائی (۲۰۲۲) در پژوهشی دیگر، به‌منظور پایش و آشکارسازی گاز متان در شهر تهران، از داده‌های سنجنده‌ی TROPOMI قابل‌دسترس در سامانه گوگل ارث انجین استفاده نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که در سال ۱۴۰۱، مقدار متوسط غلظت متان در جنوب تهران بالا و در حدود ۱۹۷۰ ppm بوده است. سانگ و همکاران^۲ (۲۰۲۳)، باهدف تعیین الگوهای مکانی و زمانی متان از سال ۲۰۹۹ تا ۲۰۲۱، از مشاهدات TROPOMI و GOSAT استفاده نمودند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده‌ی افزایش غلظت متان با مقدار رشد ۸/۴ ppb در سال بوده است. جین و همکاران^۳ (۲۰۲۴)، به‌منظور پایش غلظت متان با وضوح فضایی بالا در کشور چین، از داده‌های سنجنده‌ی TROPOMI و مدل جنگل تصادفی^۴ استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که غلظت متان در کشور چین به‌طور کلی در شرق و جنوب بالا و در غرب و شمال پایین هستند. مناطق با غلظت بالا شامل چین مرکزی، حوضه سیچوان، دلتا رودخانه مروارید و دلتا رودخانه یانگ‌تسه می‌شوند. همچنین از نظر مقیاس زمانی، غلظت متان تغییرات فصلی مشخصی دارد؛ به‌طوری‌که فصل‌های تابستان و پاییز بیشترین میزان غلظت این آلاینده را در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۱ به خود اختصاص دادند.

اگرچه تحلیل مکانی و زمانی گازهای آلاینده به‌ویژه متان به‌طور گسترده در سطح جهانی بررسی شده است، اما در ایران، به‌ویژه در کلان‌شهر اصفهان، مطالعات جامعی در این زمینه وجود ندارد. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از داده‌های سنجنده‌ی TROPOMI ماهواره‌ی Sentinel-۵p در بستر سامانه گوگل ارث انجین، به تحلیل زمانی و مکانی توزیع گاز متان در سطح کلان‌شهر اصفهان طی سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲ پرداخته است. این تحلیل‌ها شامل بررسی روند تغییرات سالانه، فصلی و ماهانه غلظت متان در بخش‌های مختلف کلان‌شهر اصفهان بوده و هدف اصلی آن شناسایی الگوهای پراکنش این آلاینده و تعیین نقاط با 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

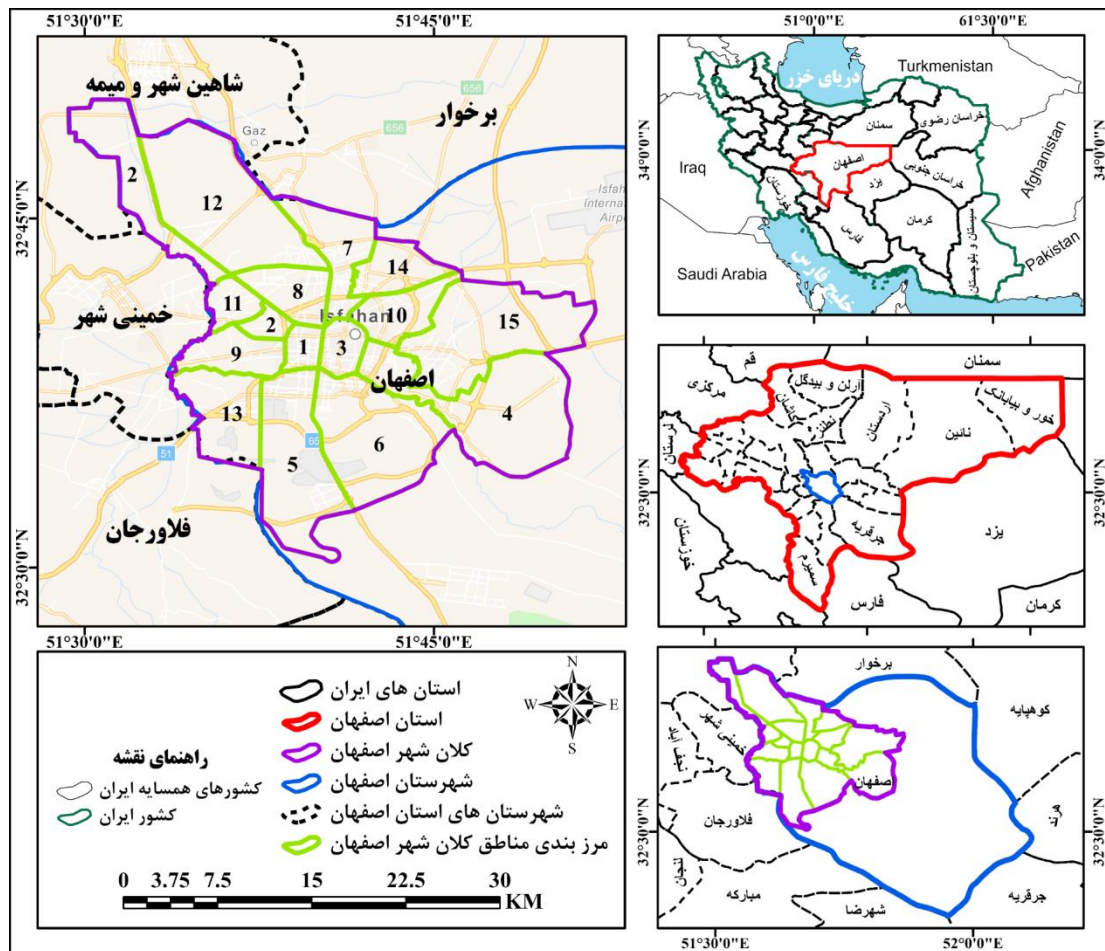
کلان‌شهر اصفهان با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳۹ دقیقه و ۴۰ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۸ دقیقه و ۳۰ ثانیه شمالی، سومین شهر بزرگ ایران پس از تهران و مشهد است. محدوده شهری اصفهان از شاهین‌شهر در شمال تا سپاهان‌شهر در جنوب، خمینی‌شهر و نجف‌آباد در غرب و دشت سجزی در شرق امتداد می‌یابد (شکل ۱). در سال ۱۳۹۵، شهر اصفهان شامل ۱۵ منطقه شهری و در مجموع ۱۹۳ محله است که ۲۵ محله در شهر گنجانده شده است (Bagheri et al., ۲۰۲۲). جهت توسعه شهر، طی دوره‌های مختلف، باتوجه‌به وجود آب فراوان و کمتر بودن آلودگی، به‌سمت جنوب غربی گسترش یافته است (Nooraei and Shokrani, ۲۰۲۱).

^۱ Plant et al

^۲ Song et al

^۳ Jin et al

^۴ Random Forest



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی کلان‌شهر اصفهان

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

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

۲-۲-۱- داده‌های ماهواره‌ی سنیتینل ۵P

در پژوهش حاضر، برای دستیابی به داده‌های آلاینده‌ی متان در بازه‌ی زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲، از تصاویر سنجنده‌ی TROPOMI ماهواره‌ی سنیتینل ۵P استفاده شده است. Sentinel-۵P، اولین ماموریت کوپرنیک برای کنترل آلودگی هوا است. با استفاده از سنجنده‌ی TROPOMI که در تاریخ ۱۳ اکتبر سال ۲۰۱۷ به‌منظور پایش تروپوسفر به فضا پرتاب شد، می‌توان گازهای مختلفی مانند ازن، متان، فرمالدئید، آئروسول، مونوکسید کربن، نیتروژن دی‌اکسید و گوگرد دی‌اکسید را شناسایی کرد (Loyda et al., ۲۰۱۸). تصاویر سنجنده‌ی TROPOMI از ماهواره‌ی Sentinel-۵P به‌دلیل قدرت تفکیک مکانی مناسب و مشاهدات گسترده و جهانی از سطح زمین می‌توانند در بررسی توزیع فضایی آلاینده‌ها مؤثر باشند. این سنجنده روزانه داده‌های آلودگی هوا را به‌صورت تقریباً آنی در عرض سه ساعت ارائه می‌دهد و داده‌های آفلاین نیز چند روز پس از تصویربرداری در دسترس هستند (Virghileanu et al., ۲۰۲۰; Shikwambana et al., ۲۰۲۰). 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 طول‌موجی بین ۲۷۰ تا ۴۹۰ نانومتر، باند مادون‌قرمز نزدیک (NIR) در محدوده طول‌موجی ۶۷۵ تا ۷۷۵ نانومتر، و باند مادون‌قرمز کوتاه (SWIR) با طول‌موجی از ۲۳۰۵ تا ۲۳۸۵ نانومتر است (Hadian & Moradizadeh, ۲۰۲۴). جزئیات کامل باندهای ماهواره‌ی سنیتینل ۵P در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. اطلاعات باندهای سنجنده‌ی سنتینل ۵P

آشکار ساز	UV	UVIS	NIR	SWIR
باند	۱	۲	۳	۴
دامنه طیفی	۲۳۰-۳۰۰	۳۰۰-۳۲۰	۳۱۰-۴۰۵	۴۰۵-۵۰۰
توان تفکیک طیفی (نانومتر)	۱	۰.۵۰	۰.۵۵	۰.۵۰
توان تفکیک مکانی (کیلومتر)	۲۸*۲۱	۷*۷	۷*۷	۷*۷

(Hadian & Moradizadeh, ۲۰۲۴)

این تنوع در پوشش طیفی به سنجنده امکان می‌دهد تا ترکیبات مختلف جوی را در طیف‌های مختلف بادقت بالایی ثبت و بررسی کند. توانایی ثبت داده‌ها در این باندهای گسترده به سنجنده امکان می‌دهد تا تغییرات جزئی و دینامیکی در ترکیب و غلظت گازها و ذرات معلق در جو را شناسایی و تحلیل کرده و درنهایت به بهبود شناخت و مدیریت مسائل محیط‌زیستی و کیفیت هوا کمک کند.

برای دستیابی به تصاویر آلاینده‌ی متان، از محصولات ارائه‌شده توسط سامانه‌ی گوگل ارث انجین استفاده‌شده است که اطلاعات مرتبط با باند مورد استفاده از سنجنده‌ی TROPOMI ماهواره‌ی سنتینل ۵P در این پژوهش به همراه تعداد تصاویر فراخوانی شده برای بازه‌ی زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲، در جدول ۲ ارائه‌شده است.

جدول ۲. اطلاعات مربوط به باند مورد استفاده از تصاویر سنجنده‌ی (TROPOMI) ماهواره‌ی سنتینل ۵P برای پایش متان

آلاینده	مجموعه داده	توضیحات/حداکثر/حداقل / واحد/باند	توان تفکیک مکانی (متر)	تعداد تصاویر فراخوانی شده
متان (CH ₄)	COPERNI CUS/S ^{OP} /OFFL/L ^۳ _CH ₄	CH ₄ column volume mixing ratio dry air / Mol Fraction / ۱۲۸۵ / ۲۴۰۵ / Column-averaged dry air mixing ratio of methane, as parts-per-billion.	۱۱۱۳.۲	سال تعداد ۱۳۹۸ ۴۹۷۷ ۱۳۹۹ ۴۹۶۸ ۱۴۰۰ ۵۰۳۷ ۱۴۰۱ ۴۶۶۸ ۱۴۰۲ ۴۶۰۲

(earthengine.google.com, ۲۰۲۴)

۲-۲-۲- داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی

برای بررسی رابطه‌ی بین پارامترهای جوی و نوسانات مقادیر آلاینده‌ی متان در کلان‌شهر اصفهان، داده‌های میانگین ماهانه پارامترهای دما، فشار هوا، بارش و سرعت متوسط باد از ایستگاه‌های هواشناسی سازمان هواشناسی استان اصفهان برای بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲ گردآوری گردید. این مقادیر پس از محاسبه و تنظیم، به منظور تحلیل‌های آماری و بررسی‌های دقیق‌تر در قسمت‌های بعدی به کار گرفته شدند.

۲-۳- روش تحقیق

پژوهش حاضر از نوع غیر مداخله‌ای و تحلیلی توصیفی می‌باشد که به منظور 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 شدند. در این پژوهش، تصاویر ماهواره‌ای مرتبط با غلظت آلاینده متان در محدوده کلان‌شهر اصفهان برای دوره زمانی اول فروردین ۱۳۹۸ تا ۲۹ اسفند ۱۴۰۲ استخراج گردیدند. به منظور محدود کردن داده‌ها به منطقه جغرافیایی مورد نظر، فیلترهای مکانی بادقت بالا براساس مرزهای جغرافیایی کلان‌شهر اصفهان اعمال شد. همچنین، برای

تجزیه و تحلیل دقیق تر تغییرات زمانی آلاینده متان، فیلترهای زمانی شامل بازه های ماهانه، فصلی و سالانه به طور جداگانه اعمال گردید تا روند و نوسانات غلظت آلاینده در این دوره پنج ساله بررسی شود. این فرآیندها با استفاده از زبان برنامه نویسی جاوا اسکریپت در محیط Google Earth Engine به انجام رسید و داده های استخراج شده به طور دقیق پردازش و آماده تحلیل های بعدی شدند.

در مرحله بعد، به منظور تحلیل روند تغییرات زمانی غلظت متان، مقادیر متوسط ماهانه، فصلی و سالانه استخراج و مورد بررسی قرار گرفتند. در این بخش، نمودارهای تغییرات زمانی آلاینده متان برای هریک از بازه های زمانی مذکور ترسیم شدند و روند تغییرات غلظت این آلاینده تحلیل گردید. تحلیل های انجام شده در این مرحله، امکان شناسایی الگوهای فصلی، سالانه و میان مدت در غلظت متان را فراهم آورد. همچنین، این داده ها برای بررسی تأثیر عوامل اقلیمی و محیطی بر تغییرات زمانی آلاینده مورد استفاده قرار گرفتند.

به منظور تحلیل های مکانی توزیع آلاینده های متان، از مجموعه ابزار آمار فضایی در محیط GIS بهره گرفته شده است. آمار فضایی به منظور شناسایی و بررسی الگوهای توزیع مکانی، شناسایی خوشه های فضایی و تحلیل روابط بین پدیده های هم جوار مورد استفاده قرار گرفت. این تحلیل ها بر مبنای فرض وجود ارتباطات مکانی میان پدیده ها، به ویژه در حوزه هایی که آلودگی هوا نقش محوری دارد، انجام شدند. بدین منظور داده های غلظت متان در بازه زمانی پنج ساله با استفاده از اعمال فیلتر زمانی ۵ ساله در گوگل ارث انجین، به صورت میانگین محاسبه شد. تصویر متوسط ۵ ساله، به عنوان مبنایی برای بررسی الگوهای توزیع مکانی این آلاینده استفاده شد. در این مرحله، تصویر به دست آمده با استفاده از توابع تبدیل GIS به فرمت وکتور و به صورت نقاط مجزا درآمد. تبدیل تصویر رستری به وکتوری با ابزار Raster to Point انجام شد و مختصات دقیق مکانی داده ها به همراه مقادیر مربوط به آن ثبت گردید.

در این مرحله، از آماره موران جهانی^۱ برای بررسی توزیع مکانی استفاده شد. این آماره امکان شناسایی و تعیین الگوهای خوشه ای یا تصادفی توزیع آلاینده ها را فراهم می آورد. این روش که به عنوان یکی از ابزارهای قدرتمند در تحلیل های جغرافیایی شناخته می شود، به بررسی میزان همبستگی بین مقادیر یک متغیر در مکان های مجاور می پردازد. به دنبال آن، آماره G برای تحلیل شدت خوشه ها به کار گرفته شد و در نهایت آماره Gi برای شناسایی مناطق پرخطر و کم خطر از نظر میزان غلظت آلاینده متان استفاده شد. این تحلیل با بررسی الگوهای فضایی انتشار آلودگی، نقاط بحرانی و مناطق کم خطر را مشخص می سازد.

در گام بعد، به منظور رتبه بندی و سطح بندی مناطق ۱۵ گانه کلان شهر اصفهان بر اساس متوسط ۵ ساله غلظت آلاینده های متان، از ابزارهای آمار ناحیه ای^۲ در محیط GIS استفاده شد. این ابزارها امکان تقسیم بندی و رتبه بندی نواحی مختلف بر اساس غلظت آلاینده را فراهم ساخت و در نهایت نقشه ها و نمودارهای سطح بندی شده از مناطق کلان شهر اصفهان تولید گردید.

پس از تکمیل تحلیل های مکانی و زمانی، برای بررسی ارتباط میان تغییرات زمانی و مکانی غلظت آلاینده متان و پارامترهای جوی در محدوده مورد مطالعه، داده های هواشناسی شامل دمای هوا، سرعت باد، فشار هوا و میزان بارش برای یک دوره زمانی پنج ساله ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲ گردآوری و تحلیل شد. داده های هواشناسی از ایستگاه های مختلف در منطقه مورد مطالعه استخراج و برای دستیابی به توزیع پیوسته این داده ها در کل منطقه، از روش درون یابی وزنی معکوس فاصله^۳ استفاده شد. این روش امکان برآورد مقادیر پارامترهای جوی را در نقاط فاقد ایستگاه هواشناسی فراهم کرده و نقشه هایی با دقت مکانی مناسب برای هر پارامتر جوی تولید نمود. در ادامه، میانگین های ماهانه هریک از پارامترهای جوی برای کل منطقه محاسبه شدند تا شاخصی از شرایط جوی غالب در پهنه مورد مطالعه ایجاد شود. این فرآیند به کاهش تأثیر نوسانات محلی و ارائه دیدگاهی جامع از شرایط جوی کمک کرد. برای استخراج غلظت آلاینده متان، داده های ماهانه مربوط به این آلاینده برای کل پهنه منطقه مورد مطالعه فراخوانی شد و میانگین گیری مشابهی برای غلظت های ماهانه انجام گرفت. هدف از این مرحله، تهیه یک پایگاه داده جامع برای

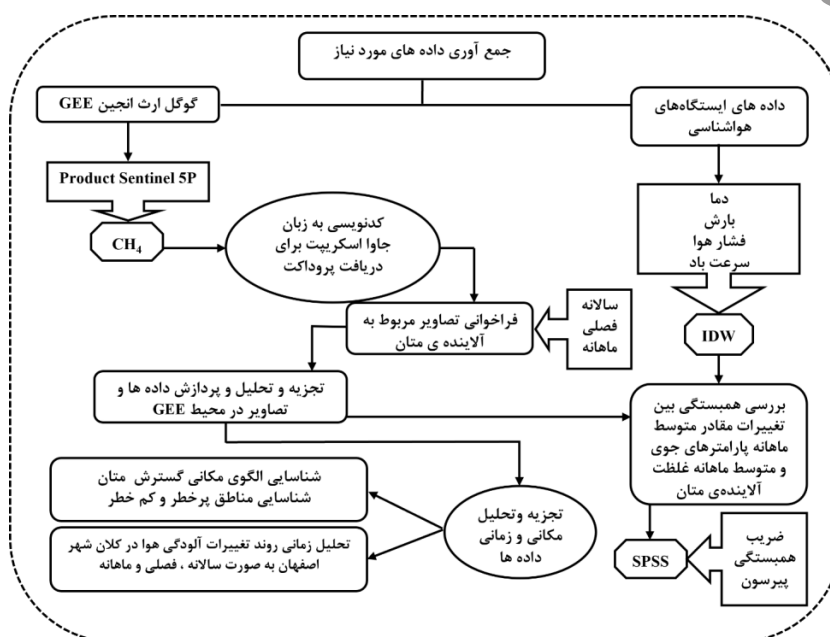
^۱ Global Moran's I

^۲ Zonal Statistics

^۳ IDW

بررسی تغییرات زمانی و مکانی غلظت متان و ارتباط آن با پارامترهای جوی بود. داده‌های به‌دست‌آمده بادقت پردازش شده و نتایج حاصل به‌صورت کمی ارائه شدند.

در مرحله بعد، از روش آماری ضریب همبستگی پیرسون برای تحلیل روابط میان متغیرهای جوی و غلظت متان استفاده شد. این روش امکان سنجش شدت و جهت ارتباط خطی میان متغیرها را فراهم می‌کند. تحلیل‌های همبستگی برای هریک از پارامترهای جوی (شامل دما، سرعت باد، فشار هوا و بارش) و غلظت متان به‌صورت جداگانه انجام شد. مقادیر ضریب همبستگی در بازه‌ی -۱ تا +۱ قرار دارند؛ به‌گونه‌ای که مقادیر نزدیک به +۱ نشان‌دهنده‌ی وجود رابطه‌ی مستقیم و قوی، مقادیر نزدیک به -۱ بیانگر رابطه‌ی معکوس و قوی، و مقادیر نزدیک به صفر دلالت بر نبود رابطه‌ی خطی معنادار بین دو متغیر دارند. نتایج این تحلیل‌ها به‌صورت جداول و نمودارهای گرافیکی ارائه شدند تا روندها و الگوهای غالب در ارتباط میان متغیرهای جوی و غلظت آلاینده متان به‌طور شفاف به تصویر کشیده شود. روش انجام پژوهش در شکل ۲ به‌صورت کلی ارائه شده است.



شکل ۲. روند نمای مراحل مختلف انجام پژوهش

۳- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج حاصل از پژوهش به تفکیک تحلیل‌های زمانی و مکانی به‌طور کامل ارائه شده است. ابتدا، تحلیل‌های زمانی به‌تفصیل بررسی شدند و سپس، جزئیات تحلیل‌های مکانی موردبررسی قرار گرفتند. در ادامه، یافته‌ها به‌صورت جامع توضیح داده شده‌اند تا روند تغییرات و الگوهای مشاهده‌شده به‌طور کامل برای خوانندگان روشن گردد.

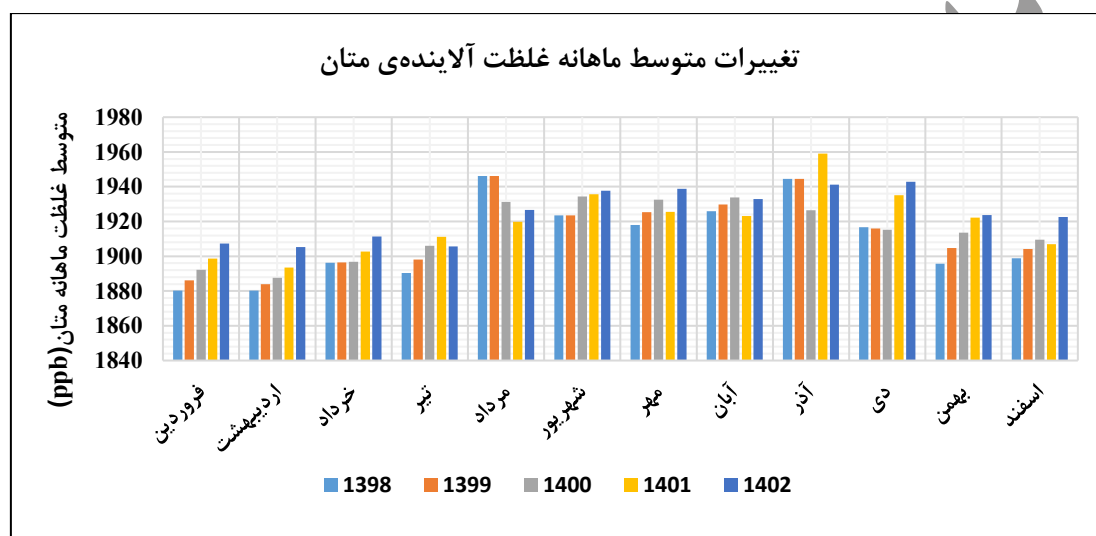
۳-۱- نتایج تحلیل زمانی

۳-۱-۱- تحلیل تغییرات ماهانه

برای بررسی تغییرات ماهانه غلظت آلاینده متان در کلان‌شهر اصفهان، نمودار تغییرات ماهانه طی سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲ ترسیم و در شکل ۳ ارائه شده است. نمودار شکل ۳ نمایانگر نوسانات قابل‌توجه در میزان این آلاینده در طول سال‌های مذکور بود. در سال ۱۳۹۸، غلظت متان روندی افزایشی را نشان داد، به‌طوری‌که پایین‌ترین مقادیر آن در ماه‌های فروردین، اردیبهشت و تیر ثبت شد، درحالی‌که بالاترین غلظت‌ها در ماه‌های آبان و دی مشاهده گردید. این روند افزایشی با ثبت بالاترین سطح آلودگی در دی‌ماه بارزتر شد و الگوی خاصی از تجمع آلاینده متان را در این مقطع زمانی برجسته ساخت.

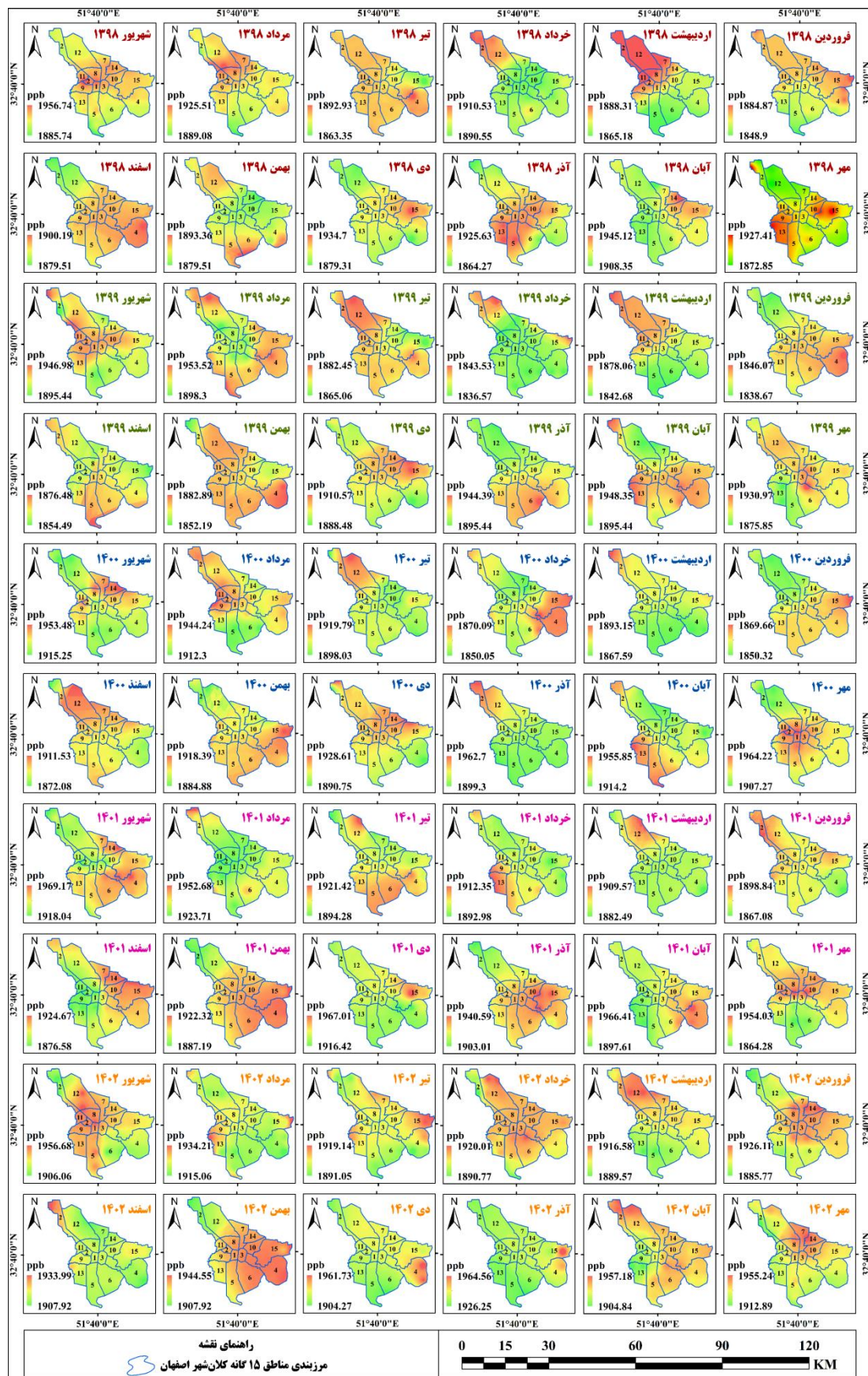
در سال ۱۳۹۹، این روند افزایشی تداوم یافت؛ بیشترین میزان غلظت در ماه‌های مرداد و آذر به ثبت رسید، و در مقابل، فروردین و اردیبهشت کمترین غلظت‌ها را به خود اختصاص دادند. این نتایج نشان‌دهنده رشد تدریجی غلظت متان در اصفهان بود، به‌ویژه در ماه‌های مرداد و آذر که به‌عنوان نقاط اوج این سال ثبت شدند. در سال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

در سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ نیز غلظت متان به افزایش خود ادامه داد. در سال ۱۴۰۱، بالاترین میزان این آلاینده در ماه‌های آذر و شهریور ثبت شد، درحالی‌که فروردین و اردیبهشت کمترین میزان غلظت را داشتند، و آذرماه بار دیگر به‌عنوان ماهی با بیشترین آلودگی شناخته شد. در سال ۱۴۰۲، الگوی صعودی غلظت متان ادامه یافت و این آلاینده در ماه‌های دی و آذر به اوج خود رسید، درحالی‌که کمترین غلظت‌ها در اردیبهشت و تیر ثبت شدند. این تحلیل‌ها به‌طور کلی نشان دادند که غلظت ماهانه متان در اصفهان طی این پنج سال روندی صعودی و مستمر داشته است.



شکل ۳. نمودار تغییرات متوسط ماهانه غلظت آلاینده‌ی متان

همچنین برای نمایش چگونگی تغییرات مکانی زمانی آلاینده‌ی متان در سطح مناطق ۱۵ گانه کلان‌شهر اصفهان، نقشه‌ی تغییرات متوسط ماهانه این آلاینده در ماه‌های مختلف سال، طی بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲ در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴. تغییرات مکانی - زمانی متوسط ماهانه آلاینده‌ی متان در بازه‌ی زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲ در کلان شهر اصفهان

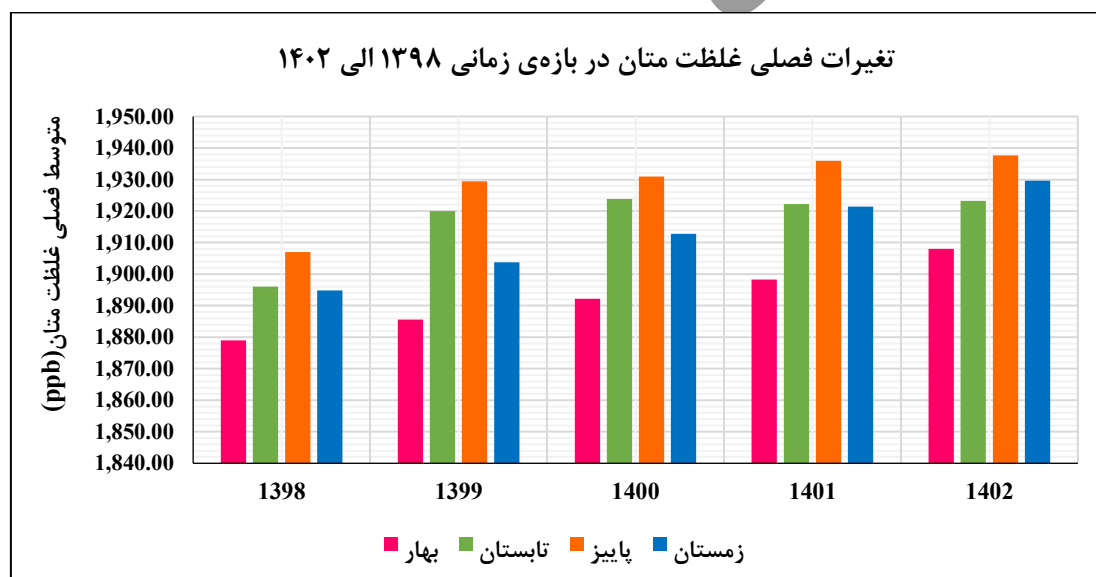
۳-۱-۱- تحلیل تغییرات فصلی

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

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

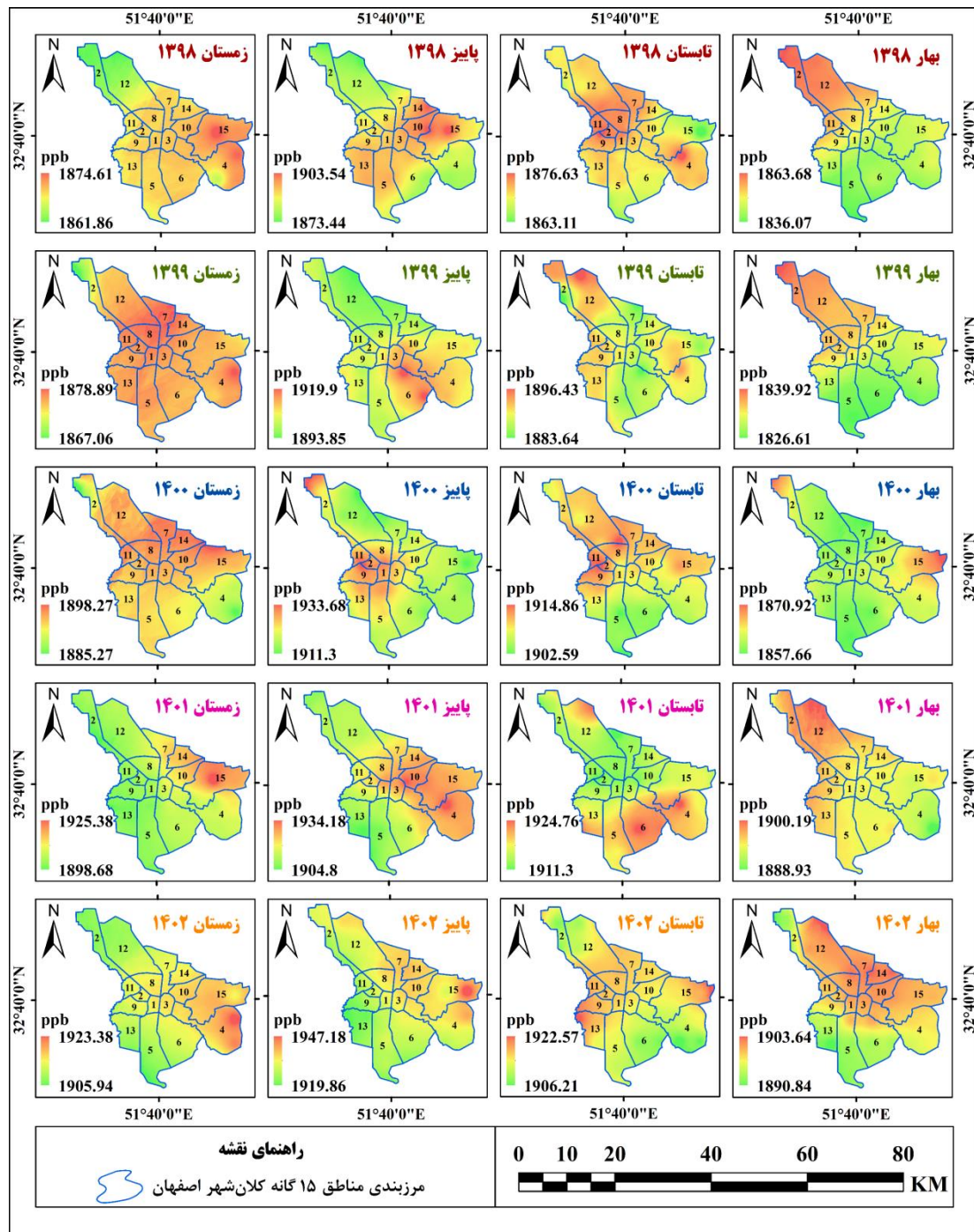
بر اساس داده‌های موجود، سال ۱۴۰۲ به‌طور خاص به‌عنوان سالی با بیشترین میزان غلظت متان در فصل پاییز، در مقایسه با سایر سال‌های دوره ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲، شناسایی شده است. در مقابل، فصل بهار سال ۱۳۹۸ کمترین میزان غلظت این آلاینده را در بازه زمانی مذکور به خود اختصاص داده است. این اختلاف قابل توجه در مقادیر غلظت متان میان فصول و سال‌های مختلف، نمایانگر تأثیر پذیری بالای این آلاینده از شرایط فصلی و تغییرات زمانی می‌باشد که تحلیل و تفسیر دقیق‌تر آن می‌تواند به روشن‌تر شدن نقش عوامل گوناگون کمک کند.

این پژوهش با مقایسه نتایج خود با تحقیقاتی همچون محمدی و آخوندزاده هنزائی (۲۰۲۲) در تهران، شباهت‌هایی را در خصوص افزایش غلظت متان در فصول سرد و کاهش آن در فصول گرم نشان داد. همچنین، این نتایج با مطالعات ساداورت و همکاران (۲۰۲۱) که نقش فعالیت‌های انسانی در افزایش غلظت متان را تأیید کرده‌اند، همخوانی داشت.



شکل ۵. نمودار تغییرات متوسط فصلی غلظت آلاینده‌ی متان

همچنین برای نمایش چگونگی تغییرات مکانی زمانی آلاینده‌ی متان در سطح مناطق ۱۵ گانه کلان‌شهر اصفهان، نقشه‌ی تغییرات متوسط فصلی این آلاینده طی بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲ در شکل ۶ ارائه شده است.



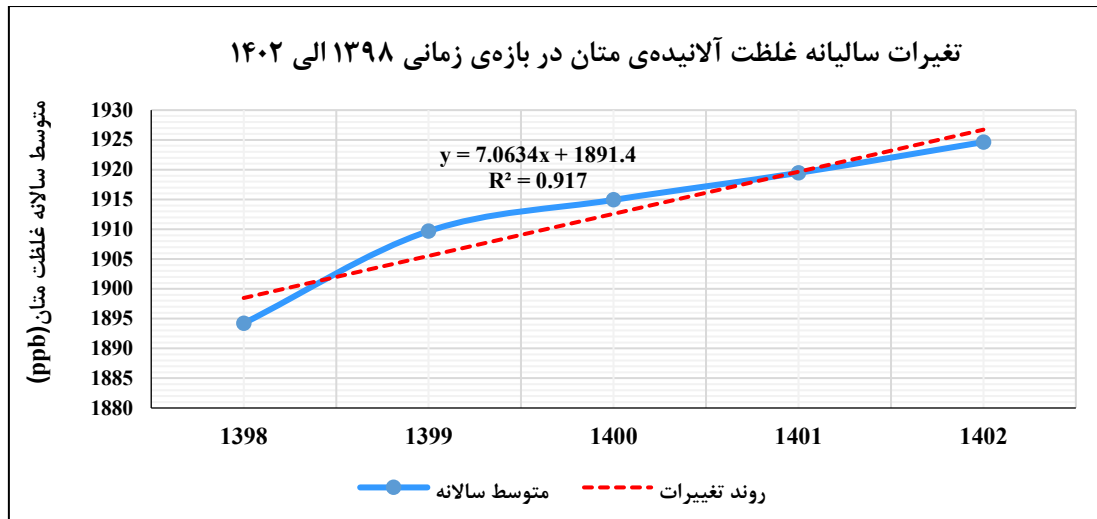
شکل ۶. تغییرات مکانی - زمانی متوسط فصلی آلاینده‌ی متان در بازه‌ی زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲ در کلان‌شهر اصفهان

۳-۱-۱- تحلیل تغییرات سالانه

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

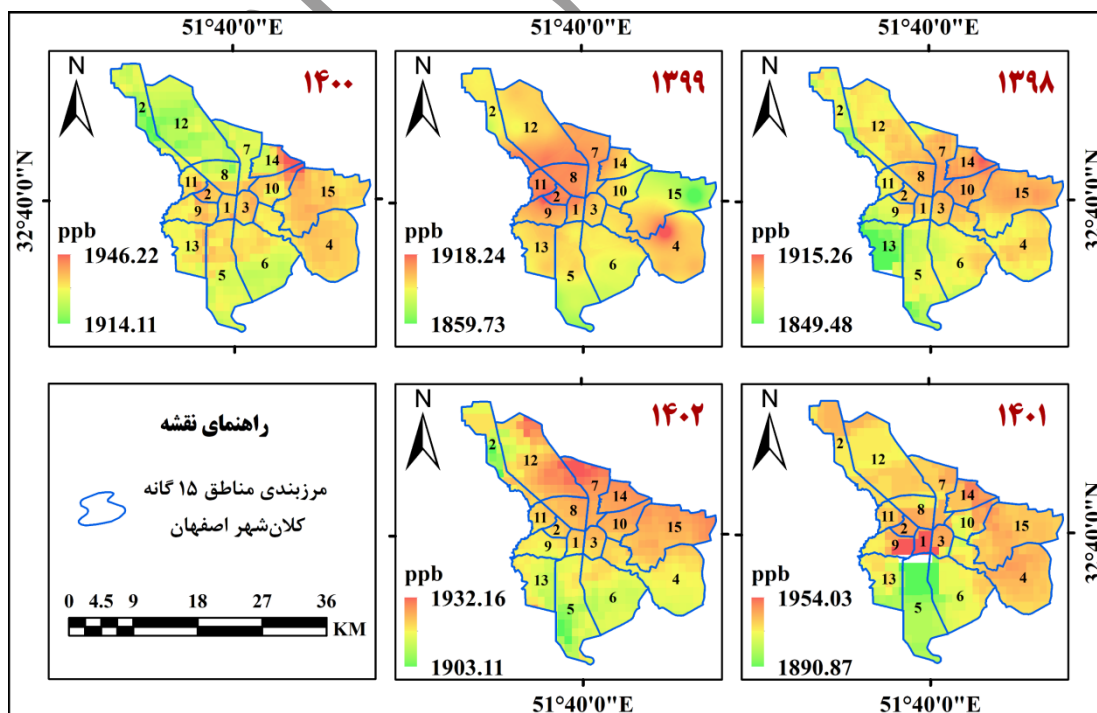
به‌طورکلی، نمودار نشان‌دهنده یک‌روند صعودی در غلظت آلاینده‌ی متان در طول دوره موردبررسی است. این بدان معناست که غلظت متان در هوا به‌طور پیوسته در حال افزایش بوده است، به‌نحوی که کمترین میزان متان در سال ۱۳۹۸ و بیشترین آن در سال ۱۴۰۲ مشاهده‌شده است. شیب‌خط رگرسیون نشان‌دهنده سرعت این افزایش است. باتوجه‌به معادله رگرسیون، هر سال به‌طور متوسط حدود ۷/۰۶۳۴ واحد به غلظت متان اضافه می‌شود.

از آن جایی که متان یک گاز گلخانه‌ای قدرتمند است که نقش مهمی در گرمایش جهانی دارد، در نتیجه افزایش غلظت متان در جو به تشدید تغییرات اقلیمی و بروز پدیده‌های شدید آب‌وهوایی مانند افزایش دما، خشکسالی، سیل و طوفان کمک می‌کند. این افزایش ناشی از علل متعددی است که از جمله محتمل‌ترین آن‌ها می‌توان به فعالیت‌های انسانی مانند انتشار متان از صنایع نفت و گاز، کشاورزی (به‌ویژه تولید شالیزار و دامداری)، و دفع پسماندها اشاره کرد. همچنین، تغییرات اقلیمی و افزایش دما نیز می‌توانند با افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌های تولیدکننده متان در منابع طبیعی مانند باتلاق‌ها، بر شدت این پدیده بیفزایند.



شکل ۷. نمودار تغییرات متوسط سالانه غلظت آلانیدی متان

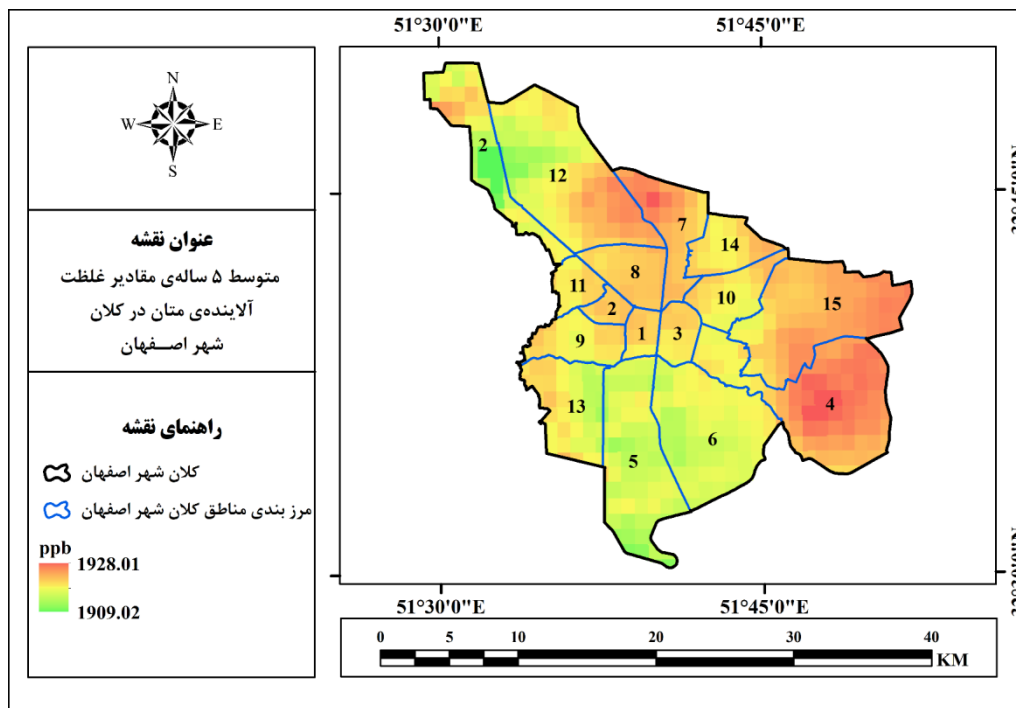
همچنین برای نمایش چگونگی تغییرات مکانی زمانی آلانیدی متان در سطح مناطق ۱۵ گانه کلان‌شهر اصفهان، نقشه‌ی تغییرات متوسط سالانه این آلانیدی طی بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲ در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۸. تغییرات مکانی - زمانی متوسط سالانه آلانیدی متان در بازه‌ی زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲ در کلان‌شهر اصفهان

۲-۳- تحلیل مکانی

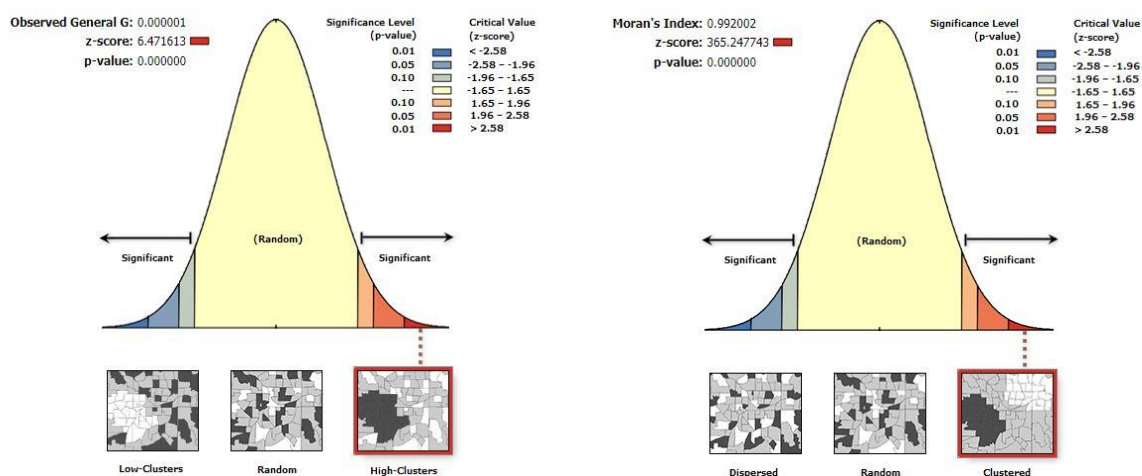
برای تجزیه و تحلیل الگوهای فضایی و روابط بین مقادیر آلاینده متان در کلان شهر اصفهان، متوسط ۵ ساله تمامی تصاویر فراخوانی شده در سامانه گوگل ارث انجین برای این آلاینده محاسبه شد و برای تجزیه و تحلیل های این بخش به کار گرفته شد که نتیجه ی آن در شکل ۹ ارائه شده است.



شکل ۹. تغییرات مکانی - زمانی متوسط ۵ ساله آلاینده ی متان در کلان شهر اصفهان

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

در این قسمت، باهدف شناسایی و تحلیل الگوهای مکانی پراکنش آلاینده متان در سطح مناطق شهری کلان شهر اصفهان، از روش آماری خودهمبستگی فضایی موران استفاده شده است. نتایج حاصل از محاسبه شاخص موران برای آلاینده متان در شکل ۱۰ به صورت گرافیکی نمایش داده شده است.



شکل ۱۱. نتیجه ی شاخص HLC برای آلاینده ی متان

شکل ۱۰. نتیجه ی شاخص خودهمبستگی موران برای آلاینده ی متان

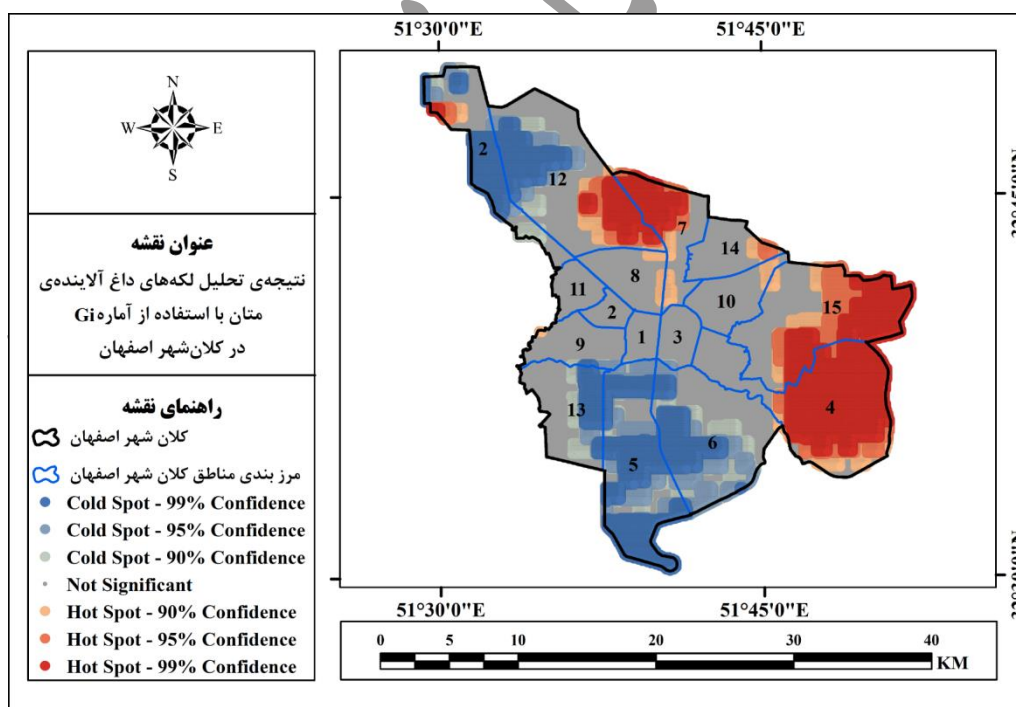
همان‌طور که از شکل ۱۰ قابل مشاهده است، نتایج شاخص موران برای کلان‌شهر اصفهان نشان می‌دهد که مقادیر آلاینده متان به شدت خود هم‌پسته هستند و الگوی فضایی بسیار معناداری دارند. مقدار شاخص موران نزدیک به ۱، Z-score بسیار بالا و p-value نزدیک به صفر، همگی نشان می‌دهند که مقادیر آلاینده متان به صورت خوشه‌ای توزیع شده‌اند و این خوشه‌بندی به هیچ‌عنوان تصادفی نیست.

باتوجه به نتایج حاصل از شاخص موران برای آلاینده متان و شناسایی الگوی پراکنش مکانی خوشه‌ای، برای تشخیص شدت خوشه‌ای بودن این توزیع، از شاخص آماره Gi استفاده شده است که نتایج حاصل از آن در شکل ۱۱ ارائه شده است. نتایج ارائه شده در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که در کلان‌شهر اصفهان، مقادیر غلظت آلاینده متان به صورت High-Clusters خوشه‌بندی و توزیع شده است. این موضوع نشان‌دهنده این مطلب است که این خوشه‌بندی بیشتر برای مقادیر زیاد این متغیر اتفاق افتاده است و با توجه به مقدار بالای Z-score و مقدار بسیار پایین p-value می‌توان گفت ادعان داشت که این خوشه‌بندی به هیچ‌عنوان تصادفی نیست و از نظر آماری با سطح اطمینان ۹۹ درصد معنادار شده است. همچنین مقدار عددی شاخص عمومی G، عددی بسیار کوچک است که این موضوع نشان‌دهنده قوی بودن این خوشه‌بندی در داده هاست.

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 جهت کاهش آلودگی هستند.

۳-۲-۲- شناسایی مناطق کم خطر و پر خطر کلان‌شهر اصفهان با استفاده از تحلیل لکه‌های داغ (آماره Gi)

در این بخش برای شناسایی مناطق کم خطر و پر خطر از نظر مقدار آلودگی متان، از تحلیل لکه‌های داغ بر اساس آماره Gi استفاده شد که نتیجه حاصل از این تحلیل در شکل ۱۲ ارائه شده است.



شکل ۱۲. نتیجه‌ی تحلیل لکه‌های داغ آلاینده‌ی متان در کلان‌شهر اصفهان

همان‌طور که شکل ۱۲ نشان می‌دهد، مناطق ۴، ۷ و قسمت‌هایی از مناطق ۱۲، ۱۵ و بخش شمالی منطقه ۲ به عنوان نقاط داغ با سطوح اطمینان ۹۹٪، ۹۵٪ و ۹۰٪ مشخص شده‌اند. این مناطق عمدتاً در قسمت‌های شرق و شمال شرقی کلان‌شهر اصفهان واقع شده‌اند و نشان‌دهنده تراکم بالای متان هستند. از جمله مهم‌ترین عوامل موثر در این امر می‌توان به تمرکز بالای اراضی

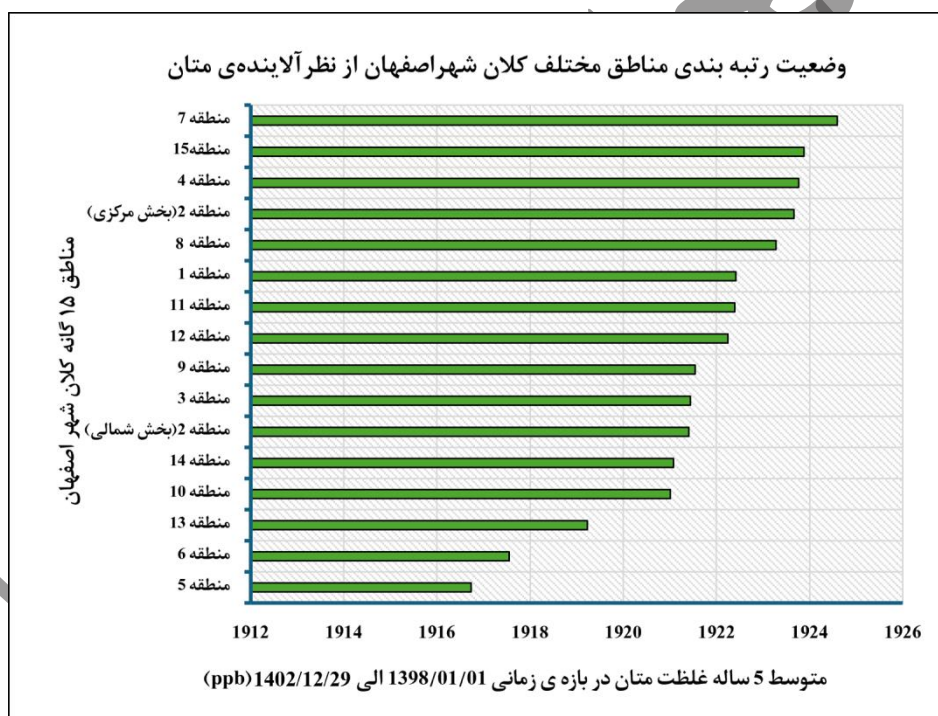
کشاورزی و فعالیت‌های دامداری در مناطق ۷، ۱۵ و بخش‌هایی از منطقه ۴، فعالیت پالایشگاه اصفهان در بخش شمالی منطقه ۲، واقع شدن سایت دفن پسماند در قسمت شرقی اصفهان و منطقه ۴ اشاره کرد.

همچنین مناطق ۵، ۶، بخش‌های از مناطق ۱۲، ۱۳ و قسمت‌های کوچکی از بخش شمالی منطقه ۲ به‌عنوان نقاط سرد با هوای پاک‌تر متان با سطوح اطمینان ۹۹٪، ۹۵٪ و ۹۰٪ مشخص شده‌اند که نشان‌دهنده تراکم پایین متان در این مناطق است و شرایط بهتری از نظر کیفیت هوا دارند. این مناطق عمدتاً در جنوب کلان‌شهر اصفهان قرار دارند.

سایر مناطق نیز که بیشتر به رنگ خاکستری دیده می‌شوند، نشان‌دهنده عدم وجود تغییرات معنی‌دار در تراکم آلاینده متان در این مناطق هستند که تراکم یکنواخت‌تری دارند.

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

وضعیت سطح‌بندی مناطق مختلف کلان‌شهر اصفهان از نظر متوسط ۵ ساله‌ی غلظت آلاینده متان در شکل ۱۳ ارائه شده است. باتوجه به شکل ۱۳ می‌توان استنباط کرد که منطقه‌ی ۷ در کلان‌شهر اصفهان بیشترین میزان آلودگی متان و منطقه ۵ نیز کمترین میزان آلودگی متان را طی بازه زمانی مورد مطالعه در این پژوهش، به خود اختصاص داده‌اند.



شکل ۱۳. وضعیت سطح بندی مناطق مختلف کلان شهر اصفهان از نظر غلظت آلایندهی متان

۳-۳- بررسی رابطه زمانی میان مقادیر متوسط آلایندهی متان و عوامل مختلف آب‌وهوایی

پدیده‌های جوی و آب‌وهوایی تأثیرات عمیقی بر کیفیت هوا و مقادیر آلاینده‌های مختلف دارند. تغییرات در دما، فشار هوا، متوسط سرعت باد و مقدار بارش می‌تواند به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر وضعیت آلاینده‌های جوی تأثیر بگذارد و در نتیجه بر سلامت انسان و محیط‌زیست تأثیرات قابل توجهی بگذارد (Giovannini et al., ۲۰۲۰). در این بخش، به‌منظور بررسی ارتباط بین پارامترهای جوی و تغییرات مقادیر آلایندهی متان در کلان‌شهر اصفهان، با استفاده از داده‌های دریافت‌شده از سازمان هواشناسی استان اصفهان، مقادیر متوسط ماهانه چهار پارامتر مهم آب‌وهوایی شامل دمای هوا، فشار جو، میزان بارش و سرعت متوسط باد و همچنین مقادیر متوسط ماهانه غلظت آلایندهی متان مستخرج از سامانه گوگل اِرتِث انجین برای دوره پنج‌ساله‌ی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲ محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. مقادیر متوسط ماهانه‌ی پارامترهای جوی به همراه مقادیر متوسط ماهانه غلظت آلاینده‌ی متان

Date	CH ₄ (ppb)	T _I (°C)	Wind (m/s)	Pr ₂ (mm)	P ₃ (mBar)	Date	CH ₄ (ppb)	T _I (°C)	Wind (m/s)	Pr ₂ (mm)	P ₃ (mBar)
۱۳۹۸/۰۱	۱۸۸۰.۲۳۶	۱۳.۸۴۳	۲.۴۰۴	۱۸.۶۸۶	۸۳۶.۲۰۰	۱۴۰۰/۰۷	۱۹۳۳.۶۱	۱۷.۴۶۲	۲.۰۵۷	۱	۸۴۰.۲۰۴
۱۳۹۸/۰۲	۱۸۸۰.۳۰۸۵	۲۱.۹۰۹	۲.۵۶۵	۱۲.۱۷۳	۸۳۷.۴۶۵	۱۴۰۰/۰۸	۱۹۳۳.۷۸	۸.۸۶۲	۱.۶۲۹	۳۸.۲۲۶	۸۴۰.۵۴۳
۱۳۹۸/۰۳	۱۸۹۶.۱۷۳۵	۲۸.۸۲۹	۲.۰۵۱	۰.۱۵۳	۸۳۴.۹۴۷	۱۴۰۰/۰۹	۱۹۲۶.۴۹	۵.۶۷۶	۱.۷۵۸	۱۵.۳۶۸	۸۳۹.۵۵۵
۱۳۹۸/۰۴	۱۸۹۰.۳۸۴	۳۱.۷۵۲	۱.۷۶۶	۰	۸۳۱.۱۲۴	۱۴۰۰/۱۰	۱۹۱۵.۱۷	۲.۸۵۴	۲.۱۷	۱۲.۴۳	۸۳۶.۱۰۹
۱۳۹۸/۰۵	۱۹۴۶.۰۸۵	۲۹.۰۶۲	۲.۱۶۸	۰.۸۱۹	۸۳۴.۸۳۰	۱۴۰۰/۱۱	۱۹۱۳.۵۸	۶.۴۷۳	۲.۵۹۸	۸.۰۶۲	۸۳۶.۸۸۴
۱۳۹۸/۰۶	۱۹۲۳.۴۵	۲۵.۴۲۵	۱.۶۱	۰	۸۳۷.۰۳۰	۱۴۰۰/۱۲	۱۹۰۹.۵	۱۱.۷۰۹	۳.۸۸۶	۱۳.۱۷۸	۸۳۵.۶۷۰
۱۳۹۸/۰۷	۱۹۱۷.۹۱۳۵	۱۸.۱۴۹	۱.۱۷۳	۱۶.۰۸۴	۸۴۰.۵۴۳	۱۴۰۱/۰۱	۱۸۹۸.۷۱	۱۸.۹۶۷	۳.۲۷۷	۱۴.۳۹۵	۸۳۶.۱۹۱
۱۳۹۸/۰۸	۱۹۲۵.۸۱۳۵	۷.۳۶۷	۱.۰۲۷	۳۱.۷۳۶	۸۴۱.۳۹۷	۱۴۰۱/۰۲	۱۸۹۳.۵۳	۲۱.۶	۳.۶۰۳	۴.۱۶	۸۳۵.۱۱۱
۱۳۹۸/۰۹	۱۹۴۴.۵۳۳	۴.۰۹۲	۰.۷۵۶	۴۳.۵۲۱	۸۳۹.۵۹۶	۱۴۰۱/۰۳	۱۹۰۲.۶۸	۲۸.۷۴۲	۳.۱۹۸	۰.۰۹۴	۸۳۳.۴۷۶
۱۳۹۸/۱۰	۱۹۱۶.۷۴۹۵	۲.۳۲۷	۲.۰۲۴	۸.۸۲	۸۳۶.۸۶۱	۱۴۰۱/۰۴	۱۹۱۱.۲۴	۲۹.۷۴۷	۳.۱۶۱	۷.۹۴	۸۳۱.۳۸۱
۱۳۹۸/۱۱	۱۸۹۵.۷۴۹	۶.۴۸۵	۳.۱۳۴	۱۷.۱۳۵	۸۳۷.۳۳۲	۱۴۰۱/۰۵	۱۹۱۹.۷۵	۲۷.۵۷۴	۲.۷۳۹	۰.۲۲۴	۸۳۵.۰۰۷
۱۳۹۸/۱۲	۱۸۹۸.۸۷۲	۱۰.۱۴۴	۳.۲۳۳	۳۴.۱۶۸	۸۳۵.۸۱۳	۱۴۰۱/۰۶	۱۹۳۵.۷۵	۲۵.۳۰۵	۲.۳۶۱	۰	۸۳۶.۷۳۶
۱۳۹۹/۰۱	۱۸۸۶.۱۹۸	۱۵.۱۳۱	۳.۲۷۷	۳۸.۶۴۷	۸۳۶.۰۰۴	۱۴۰۱/۰۷	۱۹۲۵.۵۵	۱۹.۲۳۱	۱.۹۰۳	۰.۰۱۱	۸۴۱.۱۲۷
۱۳۹۹/۰۲	۱۸۸۳.۹۲۹۲۵	۲۲.۶۱۶	۳.۰۶۵	۶.۵۹۸	۸۳۷.۱۲۴	۱۴۰۱/۰۸	۱۹۲۳.۰۶	۱۰.۰۸۹	۱.۶۲۲	۲۶.۷۵۵	۸۴۰.۶۰۰
۱۳۹۹/۰۳	۱۸۹۶.۴۶۶۷۵	۲۸.۱۴۳	۳.۱۱	۰.۹۸۸	۸۳۳.۳۰۱	۱۴۰۱/۰۹	۱۹۵۹.۱۳	۴.۴۳	۱.۵۵۱	۲۴.۵۲۸	۸۴۰.۴۴۵
۱۳۹۹/۰۴	۱۸۹۸.۱۸۲	۲۹.۷۲۳	۳.۰۵۶	۱.۲۳۲	۸۳۲.۷۹۷	۱۴۰۱/۱۰	۱۹۳۵.۱۲	۰.۱۶	۱.۵۷۹	۵۳.۸۲۲	۸۴۰.۶۹۴
۱۳۹۹/۰۵	۱۹۴۶.۰۸۵	۲۸.۹۹۵	۲.۹۸۳	۰	۸۳۱.۱۷۳	۱۴۰۱/۱۱	۱۹۲۲.۱۸	۳.۸۲	۲.۵	۵۶.۸۷۷	۸۳۷.۵۴۷
۱۳۹۹/۰۶	۱۹۲۳.۴۵	۲۳.۶۵۲	۲.۲۶۲	۰	۸۳۸.۳۹۷	۱۴۰۱/۱۲	۱۹۰۶.۹۴	۱۱.۴۵۶	۳.۰۹۲	۱۸.۶۳۱	۸۳۵.۹۵۹
۱۳۹۹/۰۷	۱۹۲۵.۲۶۱۷۵	۱۵.۹۷۹	۱.۷۹	۰.۰۰۱	۸۴۱.۵۸۷	۱۴۰۲/۰۱	۱۹۰۷.۲۸	۱۶.۸۲۶	۳.۱۰۳	۱۰.۶۱۱	۸۳۵.۸۱۸
۱۳۹۹/۰۸	۱۹۲۳.۷۹۶۷۵	۱۰.۱۲۱	۱.۶۹۵	۴۵.۳۳۶	۸۴۰.۶۸۱	۱۴۰۲/۰۲	۱۹۰۵.۲۴۵	۲۲.۷۲	۳.۲۶۶	۲.۷۶۱	۸۳۶.۴۵۷
۱۳۹۹/۰۹	۱۹۴۴.۵۳۳	۳.۷۰۴	۱.۵۳۱	۲۳.۴۶	۸۴۰.۵۱۱	۱۴۰۲/۰۳	۱۹۱۱.۴۴۲	۲۸.۲۶۴	۲.۹۵۳	۵.۵۰۳	۸۳۲.۵۶۹
۱۳۹۹/۱۰	۱۹۱۵.۹۵۹۷۵	۲.۸۴۱	۱.۸۱۸	۰	۸۴۰.۱۹۷	۱۴۰۲/۰۴	۱۹۰۵.۶۲۴	۳۱.۰۲۶	۳.۳۴۱	۰	۸۳۲.۳۹۹
۱۳۹۹/۱۱	۱۹۰۴.۶۶۴۵	۷.۴۲	۲.۵۶۲	۱۴.۳۰۲	۸۳۸.۵۹۱	۱۴۰۲/۰۵	۱۹۲۶.۵۶۶	۲۸.۵۹۱	۲.۸۵۱	۰.۲۲۴	۸۳۵.۷۵۹
۱۳۹۹/۱۲	۱۹۰۴.۱۸۶	۱۲.۱۸۲	۳.۶۶۱	۱۵.۸۱۸	۸۳۵.۸۲۴	۱۴۰۲/۰۶	۱۹۳۷.۶۱۶	۲۵.۴۷۹	۲.۵۷۹	۰	۸۳۷.۱۳۱
۱۴۰۰/۰۱	۱۸۹۲.۱۶	۱۹.۴۲	۲.۹۹۲	۶.۰۳۹	۸۳۷.۷۶۱	۱۴۰۲/۰۷	۱۹۳۸.۸۴۵	۱۹.۰۴۷	۲.۱۸۷	۷.۸۹	۸۴۰.۴۹۳
۱۴۰۰/۰۲	۱۸۸۷.۵۵	۲۲.۵۳	۲.۹۴۱	۲۰.۲۱۵	۸۳۵.۸۳۱	۱۴۰۲/۰۸	۱۹۳۲.۹۵۸	۱۱.۴۴۸	۱.۶۶	۲۲.۸۶	۸۳۹.۸۳۹
۱۴۰۰/۰۳	۱۸۹۶.۷۶	۲۹.۶۴۸	۲.۹۷۱	۰	۸۳۴.۴۱۶	۱۴۰۲/۰۹	۱۹۴۱.۱۷۴	۷.۲۱۴	۱.۶۱	۹.۴۵۴	۸۴۰.۸۲۹
۱۴۰۰/۰۴	۱۹۰۵.۹۸	۳۰.۹۰۲	۳.۱۶۴	۰	۸۳۱.۵۸۹	۱۴۰۲/۱۰	۱۹۴۲.۷۷۸	۶.۳۴۲	۱.۸۱۸	۱۷.۱۲۵	۸۳۸.۱۷۰
۱۴۰۰/۰۵	۱۹۳۱.۱۶	۲۸.۵۴۶	۲.۸۱۵	۱.۴۶۸	۸۳۴.۹۱۹	۱۴۰۲/۱۱	۱۹۲۳.۶۳۲	۵.۱۸	۲.۵۶۲	۳۴.۱۶۸	۸۳۷.۶۵۵
۱۴۰۰/۰۶	۱۹۳۴.۴۳	۲۵.۲۵	۲.۳	۰	۸۳۵.۵۸۶	۱۴۰۲/۱۲	۱۹۲۲.۵۴۲	۹.۱۶۴	۳.۶۶۱	۳۸.۶۴۷	۸۳۶.۸۹۸

۱. Temperature
۲. Precipitation
۳. Pressure

نتایج تحلیل همبستگی پیرسون بین شاخص‌های مختلف جوی و مقادیر غلظت متوسط ماهانه متان در جدول ۶ ارائه شده‌اند. تحلیل داده‌های جدول ۴ بیانگر آن است که بین تغییرات دمایی و غلظت متوسط ماهانه آلاینده‌ی متان، یک رابطه‌ی معکوس و قوی وجود دارد که این ارتباط با سطح اطمینان ۹۵ درصد، از نظر آماری معنی‌دار است. به بیان دیگر، افزایش دما منجر به کاهش قابل توجه در غلظت متان می‌شود. این پدیده را می‌توان به دو عامل کلیدی نسبت داد: نخست، افزایش پراکندگی آلاینده‌ها در دماهای بالاتر که ناشی از کاهش پایداری لایه‌های جو و افزایش توربولانس است؛ و دوم، تسریع واکنش‌های شیمیایی که منجر به تجزیه‌ی سریع‌تر برخی آلاینده‌ها از جمله متان می‌شود. در مقابل، کاهش دما به تشکیل لایه‌های جوی پایدارتر منجر شده که مانع از اختلاط عمودی هوا می‌شود. در این شرایط، آلاینده‌ها در لایه‌های نزدیک به سطح زمین تجمع یافته و غلظت آن‌ها افزایش می‌یابد.

CH₄ Temperature Wind Precipitation pressure

۴. نتایج آزمون	جدول حاصل از	CH ^۲					
			Pearson Correlation	۱	-.۲۸۰*	-.۵۷۰**	.۱۳۳
			Sig. (۲-tailed)		.۰۳۰	.۰۰۰	.۳۲۳
			N	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰
Temperature			Pearson Correlation	-.۲۸۰*	۱	.۳۹۷**	-.۶۸۳**
			Sig. (۲-tailed)	.۰۳۰		.۰۰۲	.۰۰۰
			N	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰
Wind			Pearson Correlation	-.۵۷۰**	.۳۹۷**	۱	-.۳۱۳*
			Sig. (۲-tailed)	.۰۰۰	.۰۰۲		.۰۱۸
			N	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰
Precipitation			Pearson Correlation	.۱۳۳	-.۶۸۳**	-.۳۱۳*	۱
			Sig. (۲-tailed)	.۳۲۳	.۰۰۰	.۰۱۸	.۰۰۱
			N	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰
Pressure			Pearson Correlation	.۴۴۹**	-.۶۸۳**	-.۶۶۹**	.۴۴۳**
			Sig. (۲-tailed)	.۰۰۰	.۰۰۰	.۰۰۰	.۰۰۱
			N	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰

** همبستگی در سطح ۰.۰۱ معنی دار است.

* همبستگی در سطح ۰.۰۵ معنی دار است.

همبستگی پیرسون

نتایج همچنین نشان می‌دهند که بین میانگین بارش ماهانه و غلظت متان، یک رابطه‌ی مثبت اما ضعیف وجود دارد که این ارتباط، با توجه به مقدار Sig به‌دست‌آمده، از نظر آماری معنادار نیست. این یافته‌ها نشان می‌دهند که احتمالاً این رابطه تصادفی بوده و تأثیر بارش بر غلظت متان از اهمیت قابل‌توجهی برخوردار نیست. با این حال، ممکن است علت این رابطه‌ی ضعیف، وجود منابع محلی ثابت تولیدکننده‌ی آلاینده‌ی متان در منطقه باشد.

درمورد سرعت باد، داده‌های جدول ۴ حاکی از وجود یک رابطه‌ی معکوس و معنادار بین میانگین سرعت باد ماهانه و غلظت متان است. به عبارت دیگر، با افزایش سرعت باد، غلظت متان به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. این پدیده که با سطح اطمینان ۹۹ درصد تأیید شده است، به نقش کلیدی باد در پراکنده‌سازی ذرات آلاینده و کاهش غلظت آن‌ها در جو مرتبط است. باد، با افزایش سرعت خود، قادر است آلاینده‌ها را در سطوح بالاتر و نواحی گسترده‌تر توزیع کرده و اثرات تجمعی آن‌ها را کاهش دهد.

درنهایت، تحلیل‌ها نشان می‌دهند که بین میانگین فشار هوا و غلظت متوسط ماهانه متان، یک رابطه‌ی مثبت و معنادار وجود دارد. افزایش فشار هوا به‌طور کلی با افزایش غلظت این آلاینده همراه است. این رابطه احتمالاً ناشی از اثرات فشار بالا بر پایداری جو، کاهش سرعت باد، و تغییرات در الگوهای انتشار و پراکندگی آلاینده‌ها می‌باشد. فشار بالاتر می‌تواند به تقویت پایداری لایه‌های جوی کمک کرده و از پراکندگی آلاینده‌ها جلوگیری کند که این امر موجب افزایش غلظت متان در جو می‌شود. نتایج آماری مربوط به همبستگی پارامترهای جوی و تغییرات متان حاصل از پژوهش حاضر با مطالعات مشابه مانند جین و همکاران (۲۰۲۴) در چین و پلنت و همکاران (۲۰۲۲) در ایالات متحده همخوانی داشت.

۳-۴- صحت سنجی نتایج پژوهش

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

مطالعات مشابهی که در سایر مناطق و با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای انجام شده‌اند، نتایج مشابهی را در خصوص الگوهای انتشار متان ارائه داده‌اند. به‌عنوان نمونه، تحقیقاتی که توسط (Mohammadi and Akhoundzadeh Henzaei, ۲۰۲۲) در شهر تهران انجام شد، الگوی فصلی افزایش غلظت متان در ماه‌های سرد سال و کاهش آن در فصول گرم را به‌وضوح نشان داده است. این الگوها به‌طور قابل‌توجهی با نتایج پژوهش حاضر تطابق دارند. علاوه بر این، نتایج به‌دست‌آمده در رابطه با ارتباط دما و سرعت باد ببا تغییرات غلظت متان، با مطالعات انجام‌شده توسط (Sadavarte et al., ۲۰۲۱) در چین و (Plant et al., ۲۰۲۲) در ایالات متحده همخوانی دارد.

این تطابق میان نتایج پژوهش حاضر و مطالعات مشابه در مقیاس‌های جغرافیایی و اقلیمی مختلف، نه‌تنها اعتبار این تحقیق را افزایش می‌دهد، بلکه بر اهمیت استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای تحلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه در مناطق فاقد ایستگاه‌های زمینی، تأکید می‌کند. چنین مطالعاتی می‌توانند چارچوبی علمی برای پایش و مدیریت انتشار گازهای گلخانه‌ای در شرایط مختلف اقلیمی و محیطی فراهم آورند و به سیاست‌گذاران در اتخاذ تصمیمات مؤثر برای کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی کمک کنند.

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 به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. همچنین، مناطق شمالی و شرقی اصفهان به‌عنوان کانون‌های اصلی انتشار متان شناسایی شدند. بررسی‌های انجام‌شده نشان داد که این مناطق تحت تأثیر فعالیت‌های گسترده صنعتی و کشاورزی هستند که سهم عمده‌ای در افزایش میزان انتشار این گاز دارند.

در راستای کاهش آلودگی متان، تقویت زیرساخت‌های مدیریت پسماند از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. 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. علاوه بر این، اصلاح روش‌های کشاورزی و دامداری، شامل توسعه فناوری‌های نوین

کاهش انتشار متان از دامداری‌ها مانند استفاده از افزودنی‌های غذایی خاص برای کاهش تخمیر معده‌ای دام‌ها و همچنین مدیریت اصولی پسماندهای کشاورزی، راهکاری اثربخش برای مقابله با این معضل زیست‌محیطی است. پایش مستمر و سیستماتیک انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه متان، از واحدهای صنعتی و اعمال الزامات سختگیرانه زیست‌محیطی برای کنترل انتشار این گازها، اقدامی ضروری به شمار می‌آید. علاوه بر این، جنگل‌کاری و توسعه فضای سبز در مناطق با غلظت بالای متان، با کاشت گونه‌های گیاهی باقابلیت جذب بالای کربن، می‌تواند به کاهش این گاز در جو کمک شایانی کند. در این راستا، برنامه‌های آموزشی گسترده برای ارتقای سطح آگاهی عمومی درباره اثرات انتشار متان و نقش رفتارهای انسانی در کاهش این آلودگی، از اهمیت بالایی برخوردار است.

همچنین برای ارتقای دقت در داده‌های جمع‌آوری‌شده و اتخاذ تصمیم‌های علمی‌تر و مؤثرتر، ایجاد ایستگاه‌های زمینی پایش متان در مناطق آلوده پیشنهاد می‌شود. این ایستگاه‌ها، در تعامل با داده‌های ماهواره‌ای، می‌توانند ابزاری دقیق و کارآمد برای پایش بلندمدت انتشار متان فراهم کنند. چنین رویکردی نه تنها به بهبود کیفیت داده‌ها کمک می‌کند، بلکه 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 معنادار انتشار متان در کلان‌شهرها، بهبود کیفیت هوا، و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی کمک کند. این اقدامات درنهایت منجر به تحقق اهداف توسعه پایدار و ایجاد محیط‌زیستی سالم‌تر برای نسل‌های آینده خواهد شد.

۵- سپاس‌گزاری

نگارندگان با نهایت سپاس و قدردانی، حمایت مالی شهرداری اصفهان را که مسیر انجام این پژوهش را هموار ساخت، ارج می‌نهند. همچنین، از سازمان هواشناسی اصفهان که با در اختیار گذاشتن داده‌های ارزشمند نقش مهمی در پیشبرد این مطالعه ایفا نمود، صمیمانه تقدیر می‌شود. 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. (۲۰۱۵). Inverse modelling of CH₄ emissions for ۲۰۱۰-۲۰۱۱ using different satellite retrieval products from GOSAT and SCIAMACHY. *Atmospheric Chemistry and Physics*, ۱۵(۱), ۱۱۳-۱۳۳. <https://doi.org/10.5194/acp-15-113-2015>, ۲۰۱۵.
- Aumann, H. H., Chahine, M. T., Gautier, C., Goldberg, M. D., Kalnay, E., McMillin, L. M., ... & Susskind, J. (۲۰۰۳). AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: Design, science objectives, data products, and processing systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, ۴۱(۲), ۲۵۳-۲۶۴. doi: ۱۰.۱۱۰۹/TGRS.۲۰۰۲.۸۰.۸۳۵۶.
- Bagheri, R., Ebrahimi Bouzani, M., & Mokhtari Malekabadi, R. (۲۰۲۲). Spatial distribution and deprivation zoning in Isfahan city. *Geography (Scientific Quarterly of the Iranian Geographical Association)*, ۲۰(۷۳), ۳۷-۶۲.
- Basu, S., Lan, X., Dlugokencky, E., Michel, S., Schwietzke, S., Miller, J. B., ... & Manca, G. (۲۰۲۲). Estimating emissions of methane consistent with atmospheric measurements of methane and $\delta^{13}\text{C}$ of methane. *Atmospheric Chemistry and Physics*, ۲۲(۲۳), ۱۵۳۵۱-۱۵۳۷۷. <https://doi.org/10.5194/acp-22-15351-2022>.
- Batur, I., Markolf, S. A., Chester, M. V., Middel, A., Hondula, D., & Vanos, J. (۲۰۲۲). Street-level heat and air pollution exposure informed by mobile sensing. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, ۱۱۳, ۱۰۳۵۳۵. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103535>.

Cherepanova, E. V., Feoktistova, N. V., & Chudakova, M. A. (۲۰۲۰). Analysis of methane concentration anomalies over burned areas of the boreal and arctic zone of eastern Siberia in ۲۰۱۸-۲۰۱۹ using TROPOMI data. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, ۵۶, ۱۴۷۰-۱۴۸۱. <https://doi.org/۱۰.۱۱۳۴/S۰۰۰۱۴۳۸۲۰۱۲۰۳۸۰>.

De Gouw, J. A., Veefkind, J. P., Roosenbrand, E., Dix, B., Lin, J. C., Landgraf, J., & Levelt, P. F. (۲۰۲۰). Daily satellite observations of methane from oil and gas production regions in the United States. *Scientific reports*, ۱۰(۱), ۱۳۷۹. <https://doi.org/۱۰.۱۰۳۸۴/s۱۵۹۸۰۲۰۰۵۷۶۷۸۰۴>.

Filonchik, M., Yan, H., Yang, S., & Lu, X. (۲۰۱۸). Detection of aerosol pollution sources during sandstorms in Northwestern China using remote sensed and model simulated data. *Advances in Space Research*, ۶۱(۴), ۱۰۳۰-۱۰۴۶. <https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.asr.۲۰۱۷.۱۱.۰۳۷>.

Garajeh, M. K., & Feizizadeh, B. (۲۰۲۱). A comparative approach of data-driven split-window algorithms and MODIS products for land surface temperature retrieval. *Applied Geomatics*, ۱۳, ۷۱۵-۷۳۳. <https://doi.org/۱۰.۱۰۰۷/s۱۲۵۱۸۰۲۱۰۰۳۸۸۰۸>.

Giovannini, L., Ferrero, E., Karl, T., Rotach, M. W., Staquet, C., Trini Castelli, S., & Zardi, D. (۲۰۲۰). Atmospheric pollutant dispersion over complex terrain: Challenges and needs for improving air quality measurements and modeling. *Atmosphere*, ۱۱(۶), ۶۴۶. <https://doi.org/۱۰.۳۳۹۰/atmos۱۱۰۶۰۶۴۶>.

Hadian, A., & Moradizadeh, M. (۲۰۲۴). 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*, ۱۶(۲), ۸۵-۱۰۴. doi: ۱۰.۴۸۳۰۸/gisj.۲۰۲۳.۱۰۳۷۲۶.

Jin, Z., He, J., & Wang, W. (۲۰۲۴). Monitoring Methane Concentrations with High Spatial Resolution over China by Using Random Forest Model. *Remote Sensing*, ۱۶(۱۴), ۲۵۲۵. <https://doi.org/۱۰.۳۳۹۰/rs۱۶۱۴۲۵۲۵>.

Kazemi Garajeh, M., Laneve, G., Rezaei, H., Sadeghnejad, M., Mohamadzadeh, N., & Salmani, B. (۲۰۲۳). Monitoring Trends of CO, NO₂, SO₂, and O₃ Pollutants Using Time-Series Sentinel-۲ Images Based on Google Earth Engine. *Pollutants*, ۳(۲), ۲۵۵-۲۷۹. <https://doi.org/۱۰.۳۳۹۰/pollutants۳۰۲۰۰۱۹>.

Li, Y., & Fang, H. (۲۰۲۲). Real-Time Software for the Efficient Generation of the Clumping Index and Its Application Based on the Google Earth Engine. *Remote Sensing*, ۱۴(۱۵), ۳۸۳۷. <https://doi.org/۱۰.۳۳۹۰/rs۱۴۱۵۳۸۳۷>.

Loyola, D. G., Gimeno García, S., Lutz, R., Argyrouli, A., Romahn, F., Spurr, R. J., ... & Schüssler, O. (۲۰۱۸). The operational cloud retrieval algorithms from TROPOMI on board Sentinel-۲ Precursor. *Atmospheric Measurement Techniques*, ۱۱(۱), ۴۰۹-۴۲۷. <https://doi.org/۱۰.۵۱۹۴/amt-۱۱-۴۰۹-۲۰۱۸>.

Ma, L., Cui, Y., Liu, B., Liao, B., Wei, J., Han, H., & Tian, W. (۲۰۲۳). A GIS-based method for modeling methane emissions from paddy fields by fusing multiple sources of data. *Science of The Total Environment*, ۸۵۹, ۱۵۹۹۱۷. <https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.scitotenv.۲۰۲۲.۱۵۹۹۱۷>.

Mohammadi, M., & Akhoundzadeh Henzaei, M. (۲۰۲۲). Monitoring and detection of methane gas in Tehran using Google Earth Engine platform. *Geoinformatics in Civil Engineering*, ۱(۱), ۴۱-۵۲. doi: ۱۰.۲۲۰۶۱/jrsg.۲۰۲۲.۱۹۴۸.

Mousavi, S. M., Falahatkar, S., & Farajzadeh, M. (۲۰۱۷). Monitoring monthly and seasonal changes of methane gas using GOSAT satellite data. *Journal of Physical Geography Research*, ۴۹(۲), ۳۲۷-۳۴۰. doi: ۱۰.۲۲۰۵۹/jphgr.۲۰۱۷.۶۲۸۴۸.

Mukundan, A., Huang, C. C., Men, T. C., Lin, F. C., & Wang, H. C. (۲۰۲۲). Air pollution detection using a novel snap-shot hyperspectral imaging technique. *Sensors*, ۲۲(۱۶), ۶۲۳۱. <https://doi.org/۱۰.۳۳۹۰/s۲۲۱۶۶۲۳۱>.

Naboureh, A., Li, A., Bian, J., & Lei, G. (۲۰۲۳). National Scale Land Cover Classification Using the Semiautomatic High-Quality Reference Sample Generation (HRSQ) Method and an Adaptive Supervised Classification Scheme. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, ۱۶, ۱۸۵۸-۱۸۷۰. ۱۰.۱۱۰۹/JSTARS.۲۰۲۳.۳۲۴۱۶۲۰.

Nooraie, H., & Shokrani, S. M. (۲۰۲۱). Spatial analysis and classification of the fifteen regions of Isfahan metropolis based on air pollution distribution. *Geography and Environmental Planning*, ۲۲(۲), ۸۳-۱۰۲. doi: ۱۰.۲۲۱۰۸/gep.۲۰۲۱.۱۲۶۹۸۱.۱۳۹۴.

Orsetti, E., Tollin, N., Lehmann, M., Valderrama, V. A., & Morató, J. (۲۰۲۲). Building resilient cities: climate change and health interlinkages in the planning of public spaces. *International journal of environmental research and public health*, ۱۹(۳), ۱۳۵۵. <https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/ijerph۱۹۰۳۱۳۵۵>.

Pei, Z., Han, G., Mao, H., Chen, C., Shi, T., Yang, K., ... & Gong, W. (۲۰۲۳). Improving quantification of methane point source emissions from imaging spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, ۲۹۵, ۱۱۳۶۵۲. <https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.rse.۲۰۲۳,۱۱۳۶۵۲>.

Plant, G., Kort, E. A., Murray, L. T., Maasakkers, J. D., & Aben, I. (۲۰۲۲). Evaluating urban methane emissions from space using TROPOMI methane and carbon monoxide observations. *Remote Sensing of Environment*, ۲۶۸, ۱۱۲۷۵۶. <https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.rse.۲۰۲۱,۱۱۲۷۵۶>.

Sadavarte, P., Pandey, S., Maasakkers, J. D., Lorente, A., Borsdorff, T., Denier van der Gon, H., ... & Aben, I. (۲۰۲۱). Methane emissions from superemitting coal mines in Australia quantified using TROPOMI satellite observations. *Environmental Science & Technology*, ۵۵(۲۴), ۱۶۵۷۳-۱۶۵۸۰. <https://doi.org/۱۰,۱۰۲۱/acs.est.۱c۰۳۹۷۶>.

Shikwambana, L., Mhangara, P., & Mbatha, N. (۲۰۲۰). Trend analysis and first time observations of sulphur dioxide and nitrogen dioxide in South Africa using TROPOMI/Sentinel-۵ P data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, ۹۱, ۱۰۲۱۳۰.

Skeie, R. B., Hodnebrog, Ø., & Myhre, G. (۲۰۲۳). Trends in atmospheric methane concentrations since ۱۹۹۰ were driven and modified by anthropogenic emissions. *Communications Earth & Environment*, ۴(۱), ۳۱۷. <https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.jag.۲۰۲۰,۱۰۲۱۳۰>.

Song, H., Sheng, M., Lei, L., Guo, K., Zhang, S., & Ji, Z. (۲۰۲۳). Spatial and Temporal Variations of Atmospheric CH₄ in Monsoon Asia Detected by Satellite Observations of GOSAT and TROPOMI. *Remote Sensing*, ۱۵(۱۳), ۳۳۸۹. <https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/rs۱۵۱۳۳۳۸۹>.

Vîrghileanu, M., Săvulescu, I., Mihai, B. A., Nistor, C., & Dobre, R. (۲۰۲۰). Nitrogen Dioxide (NO₂) Pollution monitoring with Sentinel-۵P satellite imagery over Europe during the coronavirus pandemic outbreak. *Remote Sensing*, ۱۲(۲۱), ۳۵۷۵. <https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/rs۱۲۲۱۳۵۷۵>.

Vlasov, D., Ramírez, O., & Luhr, A. (۲۰۲۲). Road dust in urban and industrial environments: sources, pollutants, impacts, and management. *Atmosphere*, ۱۳(۴), ۶۰۷. <https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/atmos۱۳۰۴۰۶۰۷>.