Kharazmi University

Spatial Analysis Environmental Hazards

Online ISSN: 2588-5146
Homepage: https://khu.ac.ir

Analysis and Assessment of Greenhouse Gas Emissions in Iran

Vahid Safarian[1]✉

1. Corresponding Author, Department of Climatology, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.
E-mail: V.Safarian@uok.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 27 August 2025
Accepted 29 November 2025
Published online 07 January 2025

Keywords:
PCA,
Sentinel-5P,
Iran,
Remote Sensing,
Greenhouse gases.

ABSTRACT

Objective: This study aims to analyze greenhouse gas variations across Iran and to identify the gases that exert the greatest influence on their overall dynamics. The findings enhance understanding of atmospheric pollution patterns and support the development of effective mitigation strategies. These results provide a scientific basis for climate-change mitigation planning in Iran. The study relies on satellite-based remote sensing datasets.

Methods: This study analyzes the temporal and spatial variations of major greenhouse gases including carbon monoxide, nitrogen dioxide, ozone, water vapor, and methane across Iran from 2019 to 2024. Sentinel-5P satellite data were extracted via the Google Earth Engine platform, and after filtering and removing low-quality observations, the data were standardized using the Z-Score method to enhance comparability and correlation analysis. Principal Component Analysis (PCA) was applied to reduce data dimensionality and identify dominant variation patterns. Temporal and spatial trends were then quantified using complementary statistical techniques.

Results:

Methane exhibited a consistent increasing trend from late 2021 through 2024 and accounted for the largest share of total variance ($R^2 = 0.87$), likely reflecting intensified anthropogenic activities and regional climatic shifts. CO, NO_2, and O_3 were mainly affected by seasonal fluctuations and nonlinear factors, and no clear long-term increasing or decreasing trends were observed. Water vapor showed a direct relationship with temperature variations, water sources, and atmospheric patterns, with its lowest concentrations recorded during the cold months and increases observed in the warm months. PCA analysis indicated that the first two principal components explained more than 70% of the total data variance, with CH_4, O_3, and NO_2 contributing the most to the overall variations.

Conclusions: The study results indicated that greenhouse gas variations in Iran are simultaneously influenced by natural factors and human activities. The combination of satellite data, statistical analysis, and PCA enabled a precise assessment of the temporal and spatial trends of greenhouse gases, providing valuable information for planning pollutant reduction and developing strategies to combat climate change.

Cite this article: Safarian, V. (2025 Analysis and Assessment of Greenhouse Gas Emissions in Iran. *Spatial Analysis Environmental Hazards*, 12 (3), 101-118. http//doi.org/10.66224/jsaeh.12.3.7

© The Author(s)
Publisher: Kharazmi University
DOI: http//doi.org/10.66224/jsaeh.12.3.7

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.6.7]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.7]

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Global warming and climate change resulting from increased greenhouse gas concentrations have underscored the urgent need for a precise understanding of their spatial distribution across different atmospheric layers. Lidar systems, recognized as advanced and effective remote sensing tools, enable accurate monitoring, tracking, and analysis of greenhouse gas emissions (Sadovnikov et al., 2024). Despite the critical role of greenhouse gases in climate change, the main sources and sinks of carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4), and nitrous oxide (N_2O) remain insufficiently understood. Improved knowledge of these sources is essential for predicting climate trends and greenhouse gas fluxes in the 21st century (Bréon and Ciais, 2010). Understanding emission patterns supports the assessment of environmental and public-health risks and provides a foundation for developing evidence-based mitigation strategies. Accordingly, this study examines spatial and temporal patterns of greenhouse-gas concentrations across Iran using satellite-derived datasets and established scientific evidence.

Methods

This study evaluated monthly greenhouse-gas variations across Iran from 2019 to 2024 to characterize their spatial and temporal patterns. Initially, to estimate greenhouse gases including carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO_2), ozone (O_3), and water vapor (H_2O) in units of moles per square meter, and methane (CH_4) in terms of dry-air volume mixing ratio (unitless fraction), Level-3 products from the Sentinel-5P satellite were used. These data were corrected for systematic errors and resampled in Google Earth Engine (GEE) to a spatial resolution of approximately 1,113.2 meters, with a temporal resolution of roughly every 1–2 days, ensuring near-daily coverage of each region. To facilitate comparison of the trends in greenhouse gas parameters, the acquired data were normalized using the Z-Score method. Remote-sensing and atmospheric datasets were processed in Google Earth Engine (GEE) using satellite-image analysis algorithms implemented through the JavaScript API. Furthermore, to better examine the greenhouse gas variables, Principal Component Analysis (PCA) was applied using XLSTAT software. PCA, as a multivariate statistical technique and a branch of machine learning, is effective in dimensionality reduction. In this method, the principal components are linear combinations of the original variables that explain the maximum variance in the data, thereby preserving the most information. Finally, for enhanced visual interpretation, the greenhouse gas maps extracted from Sentinel-5P via GEE were prepared and visualized in ArcGIS software

Results

The results indicated that the highest concentration of carbon monoxide was observed in August 2021. The 2019 values were close to the mean, while an increasing trend was recorded in 2024. Moreover, the linear trend of CO revealed that its variations were influenced by multiple nonlinear factors. The highest nitrogen dioxide concentrations occurred in April 2023, with the coefficient of determination further confirming the impact of several nonlinear drivers on NO_2 changes. Similarly, the maximum ozone concentration was detected in August 2024. During the initial years, the standardized ozone values (Z-Score normalized) were near zero or slightly negative, reflecting lower deviations from the mean and lower retrieval sensitivity in the early observations, rather than negative actual ozone concentrations. These values showed an increasing trend in later years, and the coefficient of determination indicated that ozone variations were largely influenced by nonlinear factors. The highest concentration of water

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.6.7]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.7]

vapor was recorded in January 2020. Water-vapor fluctuations were primarily controlled by temperature changes and large-scale atmospheric circulation patterns. No clear linear trend was observed in the study area during the investigated years. A marked increasing trend in methane concentrations was recorded from late 2021 through the end of 2024, with the maximum value observed in May 2024. The coefficient of determination (R^2 = 0.87) indicated a significant linear trend in the rise of methane, which can be attributed to anthropogenic activities and climatic changes. The results of the Principal Component Analysis (PCA) showed that the first two principal components (PCA_1 and PCA_2) accounted for approximately 71.27% of the total data variation, with methane, ozone, and nitrogen dioxide contributing the most to the overall variability

Conclusion

Considering the increasing trend of methane and the monthly and annual variations of other gases, it can be concluded that Iran—particularly its urban and industrial regions—faces significant challenges related to air pollution and climate change. The rise in greenhouse gases, especially methane, is likely to intensify local warming and influence precipitation patterns. Furthermore, the seasonal fluctuations of CO and NO_2, in association with stable winter atmospheric conditions, can deteriorate air quality and pose risks to urban populations. The results of this study demonstrated that variations in greenhouse gases in the study area are simultaneously influenced by natural factors and human activities. The integration of satellite data, statistical analysis, and PCA enabled a precise assessment of the temporal and spatial trends of greenhouse gases, providing valuable insights for pollution mitigation planning and the development of strategies to address climate change. Ultimately, the findings of this study emphasize that greenhouse gas mitigation measures, fuel consumption optimization, water resource management, and urban planning can play a crucial role in reducing the adverse impacts of climate change in Iran.

Keywords: PCA, Sentinel-5P, Iran, Remote Sensing, Greenhouse gases

Author Contributions

The author has participated in data collection, preparation of the research report, and data analysis.

Data Availability Statement

“The data used in this study are publicly available from Google Earth Engine. The scripts used for processing and analysis are not publicly shared due to extensive development time.”

Acknowledgements

The esteemed reviewers are thanked for providing their structural and scientific feedback.

Ethical considerations

The author has adhered to ethical principles in conducting and publishing this scientific research, and this has been confirmed by them.

Funding

This article was conducted with the financial support of the Research Deputy of the University.

Conflict of interest

According to the author, this article has no conflict of interest.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.6.7]

[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.7]

دانشگاه خوارزمی

تحلیل فضایی مخاطرات محیطی

شاپا الکترونیکی: **۵۱۴۶– ۲۵۸۸**

Homepage: https://khu.ac.ir

تحلیل و ارزیابی انتشار گازهای گلخانه‌ای در ایران

وحید صفریان [۱]✉

۱. نویسنده مسئول، گروه آب و هواشناسی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: V.Safarian@uok.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷

کلیدواژه‌ها:
PCA،
Sentinel-5P،
ایران،
سنجش از دور،
گازهای گلخانه‌ای.

چکیده

هدف: هدف این پژوهش بررسی تغییرات گازهای گلخانه‌ای در ایران و شناخت گازهای اثرگذارتر می‌باشد. هم‌چنین یافته‌های تحقیق به شناخت بهتر وضعیت آلودگی و تدوین راهکارهای کاهش آن کمک خواهد کرد. این یافته‌ها می‌تواند مبنای برنامه‌ریزی برای کاهش اثرات تغییر اقلیم در کشور قرار گیرد. در تحقیق حاضر از داده‌های سنجش از دور استفاده شد.

روش پژوهش: در پژوهش حاضر به بررسی تغییرات زمانی و فضایی گازهای گلخانه‌ای شامل مونوکسیدکربن، دی‌اکسید نیتروژن، اُزن، بخار آب و متان در ایران طی سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ اقدام شد. داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-5P با استفاده از سامانه تحت وب GEE استخراج شدند و پس از فیلتر کردن و حذف داده‌های دارای کیفیت پایین، با استفاده از روش Z-Score برای بهبود مقایسه و تحلیل همبستگی استانداردسازی شدند. برای کاهش ابعاد داده‌ها و شناسایی مؤلفه‌های مؤثر بر تغییرات گازها، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) انجام شد و روندهای زمانی و مکانی گازها با استفاده از تحلیل آمار بررسی گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که متان دارای روند افزایشی پایدار از اواخر ۲۰۲۱ تا پایان ۲۰۲۴ بوده و با ضریب تعیین R^2 = ۰/۸۷ بیش‌ترین تأثیر را بر واریانس کل داده‌ها دارد که احتمالاً ناشی از فعالیت‌های انسانی و تغییرات اقلیمی منطقه می‌باشد. CO، NO_2 و O_3 بیش‌تر تحت تأثیر نوسانات فصلی و عوامل غیرخطی قرار داشته و الگوهای افزایشی یا کاهشی طولانی‌مدت مشخصی از آن‌ها مشاهده نشد. بخار آب نیز با تغییرات دما، منابع آب و الگوهای جوی رابطه مستقیم دارد و کم‌ترین غلظت آن در ماه‌های سرد ثبت شد، در حالی که در ماه‌های گرم افزایش نشان می‌دهد. تحلیل PCA نشان داد که دو مؤلفه اصلی بیش از ۷۰ درصد واریانس کل داده‌ها را توضیح می‌دهند و گازهای CH_4، O_3 و NO_2 بیش‌ترین سهم را در تغییرات کل دارند.

نتیجه‌گیری: نتایج مطالعه نشان داد که تغییرات گازهای گلخانه‌ای در ایران هم‌زمان تحت تأثیر عوامل طبیعی و فعالیت‌های انسانی است. ترکیب داده‌های ماهواره‌ای، تحلیل آماری و PCA امکان ارزیابی دقیق روندهای زمانی و فضایی گازهای گلخانه‌ای را فراهم کرده و اطلاعات ارزشمندی برای برنامه‌ریزی کاهش آلاینده‌ها، و تدوین راهبردهای مقابله با تغییر اقلیم ارائه می‌دهد.

استناد: صفریان، وحید (۱۴۰۴). تحلیل و ارزیابی انتشار گازهای گلخانه‌ای در ایران. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۱۲ (۳)، ۱۰۱–۱۱۸.
http//doi.org/10.66224/jsaeh.12.3.7

ناشر: دانشگاه خوارزمی

© نویسندگان

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.6.7]

[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.7]

مقدمه

گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای، ضرورت درک دقیق توزیع فضایی این گازها در لایه‌های مختلف جو را بیش از پیش آشکار کرده است. برای این منظور، سیستم‌های لیدار به‌عنوان ابزارهای پیشرفته و مؤثر در پایش از راه دور گازهای گلخانه‌ای شناخته می‌شوند و امکان ردیابی و تحلیل دقیق انتشار آن‌ها را فراهم می‌آورند (سادوونیکوف[1] و همکاران، ۲۰۲۴). با وجود نقش کلیدی گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن (CO_2)، متان (CH_4) و اکسید نیتروژن (N_2O) در تغییرات اقلیمی، هنوز شناخت دقیقی از منابع و مخازن اصلی آن‌ها وجود ندارد. درک بهتر این منابع برای پیش‌بینی روند تغییرات اقلیمی و جریان‌های گازهای گلخانه‌ای در قرن ۲۱ ضروری است (برئون و سیاس[2]، ۲۰۱۰). گازهای گلخانه‌ای (GHG[3]) نقش کلیدی در تغییرات اقلیمی ایفا می‌کنند و منابع متنوعی از جمله سوخت‌های فسیلی، فعالیت‌های کشاورزی و فرآیندهای صنعتی دارند. افزایش غلظت این گازها، به‌ویژه دی‌اکسید کربن، متان و اکسید نیتروژن عمدتاً ناشی از انقلاب صنعتی و استفاده گسترده و بی‌رویه از سوخت‌های فسیلی است (فیلونچیک[4] و همکاران، ۲۰۲۴). با افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی در جهان صنعتی امروز، غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو در حال افزایش است و نیازمند کنترل دقیق می‌باشد. انتشار گازهای خودروها به‌عنوان یکی از منابع اصلی آلودگی هوا و گازهای گلخانه‌ای، تأثیر چشم‌گیری بر محیط‌زیست و تغییرات اقلیمی دارد. مطالعات نشان می‌دهند که استفاده از خودروهای برقی می‌تواند به کاهش انتشار این گازها کمک کند (الرشیده[5] و همکاران، ۲۰۲۵). اقتصاد جهانی در سال‌های اخیر با تغییرات سریع و رویدادهای مهمی مواجه شده است که نگرانی‌ها درباره تغییرات آب و هوایی و عدم قطعیت‌ها را افزایش داده است. انتشار گازهای گلخانه‌ای طی چند دهه گذشته به‌عنوان یکی از عوامل اصلی گرمایش زمین شناخته شده و منجر به تغییرات اقلیمی شده است. بنابراین، بررسی عوامل مؤثر بر افزایش انتشار دی‌اکسید کربن، یکی از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (رضوانی و همکاران، ۱۴۰۴: ۱). در دهه‌های اخیر، با گسترش جوامع و فشرده‌تر شدن فرآیند صنعتی شدن، و هم‌چنین افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی مانند نفت، گاز و زغال‌سنگ برای تولید کالاها و ارائه خدمات، میزان مصرف این منابع به‌شدت افزایش یافته است. احتراق این سوخت‌ها موجب افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در جو زمین شده است (آماده و همکاران، ۱۳۸۸: ۲۱۱). متان پس از دی‌اکسید کربن، مهم‌ترین گاز گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی است. این گاز حدود ۱۸ درصد از اثرات تابشی جو را به خود اختصاص داده و در افزایش غلظت آن در جو نقش مهمی دارد (کرباسی و همکاران، ۱۴۰۱: ۱). گازهای گلخانه‌ای ناشی از کشاورزی در آفریقا از جمله سریع‌ترین منابع انتشار در جهان هستند و بخش دامداری به‌عنوان اصلی‌ترین عامل این انتشار شناخته می‌شود (ناتوریندا[6] و همکاران، ۲۰۲۵). تغییرات اقلیمی بدون کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به سطوح ایمن، قابل کنترل نیست. در دو دهه اخیر، تغییرات آب‌وهوا به یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی بشر تبدیل شده و پیامدهای منفی گسترده‌ای را برای بسیاری از کشورها و مناطق جهان به همراه داشته است (توکلی، ۱۳۹۸: ۷۸). امروزه پالایشگاه‌های گاز طبیعی با هدف خالص‌سازی گاز و بهینه‌سازی خواص آن برای مصارف مختلف، به‌ویژه مصارف خانگی، با سرعت فزاینده‌ای در حال توسعه هستند. هر پالایشگاه شامل مجموعه‌ای از واحدهای فرآیندی است که هر یک می‌توانند منبع انتشار گازهای گلخانه‌ای به محیط‌زیست باشند (کاشفی و همکاران، ۱۳۹۷: ۶۷). کاهش انتشار گازهای غیر CO_2 در بخش کشاورزی نیازمند شناخت دقیق مسیرهای تولید هر مؤلفه است، به‌ویژه انتشار N_2O از محصولات زراعی که می‌تواند اهداف اقلیمی و امنیت غذایی را تحت تأثیر قرار دهد (گائو[7] و همکاران، ۲۰۲۵). گازهای گلخانه‌ای موجب گرم‌شدن سطح زمین و جو می‌شوند و تأثیرات مهمی بر الگوهای بارش، عقب‌نشینی یخچال‌ها و یخ‌های دریایی، سطح دریا و سایر عوامل محیطی دارند. حدود سه دهه پیش مشخص شد که افزایش اُزن تروپوسفری ناشی از آلودگی هوا، از جمله گازهای NOx و CO، نقش مهمی در تقویت اثر گلخانه‌ای

[1] - Sadovnikov
[2] - Bréon & Ciais
[3] - Greenhouse Gases (GHGs)
[4] - Filonchyk
[5] - Alrashydah
[6] - Naturinda
[7] - Gao

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.6.7]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.7]

ایفا می‌کند. علاوه بر این، شناخت تأثیر کلروفلوئوروکربن‌ها (CFCها) بر لایه اوزون استراتوسفری و پیامدهای آن برای اقلیم، ارتباط نزدیک بین فرآیندهای شیمیایی و تغییرات اقلیمی را آشکار ساخت (راماناتان و فنگ[1]، ۲۰۰۸). افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای اثرات قابل ملاحظه‌ای بر تغییرات اقلیمی، محیط‌زیست و سلامت انسان دارد. دی‌اکسید کربن، متان و نیتروس اکسید مهم‌ترین این گازها هستند. فعالیت‌های میکروبی، تنفس ریشه‌ها، تجزیه شیمیایی و تنفس هتروتروف‌ها در خاک منجر به انتشار این گازها می‌شوند و میزان آن تحت تأثیر عوامل محیطی و مدیریتی قرار دارد. جریان کربن از خاک به اتمسفر عمدتاً از طریق تنفس و فعالیت‌های موجودات خاکی انجام می‌شود (میرزایی و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۸۷). با توجه به افزایش قابل توجه گازهای گلخانه‌ای و دیگر آلاینده‌های هوا، تغییرات اقلیمی در ایران به ویژه در کلان شهرها به یک چالش جدی زیست‌محیطی تبدیل شده است. شناخت الگوهای انتشار و میزان تأثیر آن‌ها بر بخش‌های مختلف، امکان ارزیابی مخاطرات احتمالی را فراهم می‌کند و می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی مؤثر برای کاهش اثرات این آلاینده‌ها در ایران باشد. بنابراین، در این تحقیق با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای جمع‌آوری‌شده و شواهد علمی موجود، وضعیت انتشار گازهای گلخانه‌ای در ایران مورد بررسی قرار گرفت.

پیشینه پژوهش

۱. پیشینه تجربی

بررسی ادبیات و تحقیقات پیشین حاکی از گستردگی و تنوع مطالعات در زمینه پایش، تحلیل و ارزیابی گازهای گلخانه‌ای است. این تنوع نشان‌دهنده اهمیت و توجه ویژه محافل علمی و اجرایی به این موضوع می‌باشد. در راستای پیشینه تحقیق حاضر، مجموعه‌ای از مطالعات مرتبط مورد بررسی قرار گرفته است که برخی از آن‌ها عبارتند از: شاورینا و ولس[2] (۲۰۰۴) به پایش از دور برخی گازهای گلخانه‌ای با استفاده از طیف‌سنجی فوریِر[3] در کی‌یف اقدام کردند نتیجه تحقیق نشان داد که دقت اندازه‌گیری مقدار ستون N_2O و O_3 در جو کی‌یف بسیار خوب است و با پروفایل استاندارد جو تابستانی میانه‌عرض‌ها هم‌خوانی دارد. گولفالک و باستویکن[4](۲۰۱۸) به سنجش از دور شار متان و نیتروس اکسید ناشی از زباله‌سوزی اقدام کردند و به این نتیجه رسیدند که انتشار N_2O (معادل ۳۰ تا ۴۰ تُن در سال) ناشی از استفاده از عامل کاهنده اورهٔ برای کاهش انتشار NOx به‌دلیل مقررات مربوط به NOx است. کاشفی و همکاران (۱۳۹۷) به برآورد میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در دو پالایشگاه شهید هاشمی‌نژاد و فجر جم و ارائه راهکارهای عملیاتی جهت کاهش انتشار در آن‌ها اقدام کردند و نتایج برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای در این دو پالایشگاه نشان می‌دهند که فلر کردن گازها، دی‌اکسید کربن موجود در گاز خام ورودی به پالایشگاه و مصرف سوخت در تجهیزات تبدیل انرژی، منبع عمده انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌حساب می‌آیند. مرادی‌مجد و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای به مدل‌سازی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در باغات استان خوزستان اقدام کردند مطابق نتایج مدل دی‌سی‌نت، بی‌شتری‌ن میانگین شار متان مدل شده در ایستگاه دزفول (تن در هکتار در سال ۰/۴۴۸) و شار نیتروس اکسید مدل شده در ایستگاه آبادان (۰/۰۱۴ تن در هکتار در سال) و شار اکسید نیتریک مدل شده در ایستگاه دزفول (تن در هکتار در سال ۰/۱۵۲) تعیین شد. احمدی ارکمی (۱۴۰۱) به برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای و بررسی سناریوهای کاهش انتشار سازگار با منطقه در افق ۲۰۳۰ میلادی در گیلان اقدام کرد و به این نتیجه رسید که انتشار ناخالص گازهای گلخانه‌ای در استان بالغ بر ۱۸/۵ مگاتن (Mt) و سرانه تولید برابر با ۷/۳۱ تن در سال است به طوری‌که ظرفیت اکولوژیکی جنگل‌ها جهت جذب گازهای گلخانه‌ای بالغ بر ۲ مگاتن در سال برآورد شد. کرباسی و همکاران (۱۴۰۱) به مطالعه غلظت ستونی CH_4 در ایران با بکارگیری مشاهدات ماهواره‌ای GOSAT و شبیه‌سازی‌های عددی WRF-GHG اقدام کردند و به این نتیجه رسیدند که خطای اریبی در شبیه‌سازی غلظت متان، به طور متوسط در هر دو فصل گرم و سرد به ترتیب، ۴۶/۰۵ و ۱۵/۱۶ ppb می‌باشد. مقدار غلظت متان شبیه‌سازی شده برای فوریه و اوت

[1] - Ramanathan & Feng
[2] - Shavrina & Veles
[3] - Fourier
[4] - Gålfalk & Bastviken

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.6.7]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.7]

عموماً در مقایسه با اندازه‌گیری‌های GOSAT بیش‌برآورد شده است و نتایج ارزیابی نشان داد که مدل WRF-Chem در فصل سرد (ماه فوریه) با توجه به خطاهای آماری بهتر از فصل گرم (ماه اوت) عمل می‌کند. حیدری و همکاران (۱۴۰۲) در مطالعه‌ای به رابطه شاخص‌های خشکسالی با انتشار گازهای گلخانه‌ای بخش کشاورزی ایران پرداختند، نتایج نشان داد که متغیر اقلیمی بارش ارتباط معنی‌داری با افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در اقلیم‌های مختلف ایران ندارد. در صورتی که مقادیر تبخیروتعرق پتانسیل در طی سال‌های مورد بررسی در این مطالعه روند معنی‌داری را نشان داد. هم‌چنین بیش‌ترین انتشار گازهای گلخانه‌ای در سال ۲۰۱۹ معادل ۴۴۳ میلیون تن گزارش شد. پارک[1] و همکاران (۲۰۲۴) عملکرد ماهواره‌های پایش گازهای گلخانه‌ای در سئول با استفاده از طیف‌سنج زمینی قابل حمل را مطالعه کردند نتایج مطالعه نشان داد که طیف‌سنج‌های EM27/SUN در پایش گازهای گلخانه‌ای در کلان‌شهر سئول، جایی که داده‌های ماهواره‌ای به دلیل طولانی بودن زمان بازدید مجدد یا پوشش ابر محدود هستند، بسیار مؤثر عمل می‌کنند اگرچه اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای عموماً دقیق هستند، اما برای ثبت دقیق غلظت‌های محلی گازهای گلخانه‌ای نیاز به بهبود دارند. سادوونیکوف[2] و همکاران (۲۰۲۴) در تحقیقی به طراحی سیستم اپتیکی لیدار OPO مادون‌قرمز دوکاناله برای پایش از راه دور گازهای گلخانه‌ای در جو اقدام کردند، یافته‌ها نشان داد سیستم لیدار طراحی‌شده قادر است سیگنال‌های بازتاب CO_2 را با دقت بالا در محدوده طیفی ۱۹۶۰–۲۰۸۳ نانومتر شناسایی کند و آزمایش‌های آزمایشگاهی و میدانی عملکرد موفق آن را تأیید کردند. این سیستم می‌تواند برای پایش جوی در سایت‌های آزمایش کربن، مراکز صنعتی و مناطق باتلاقی استفاده شود. الرشیده[3] و همکاران (۲۰۲۵) در تحقیقی به ارزیابی مقایسه‌ای پایداری، انتشار گازهای گلخانه‌ای خودروهای معمولی و برقی اقدام کردند، نتایج نشان می‌دهد که سناریو A دارای حجم انتشار قابل ملاحظه‌ای بیش‌تر از سناریو B است. برای ICEVها، انتشار PM۲/۵ در مناطق روستایی تا ۵۰ درصد بیش‌تر از مناطق شهری بود، اما برای شرایط بدون محدودیت نسبت به محدود، ۴۵ درصد کم‌تر بود. انتشار CO_2 به شدت تحت تأثیر تغییرات فصلی قرار داشت و از زمستان تا تابستان ۵۱ درصد کاهش یافت. استفاده کامل ازBEV ها می‌تواند انتشار CO_2 و N_2O را به ترتیب تا ۹۹ درصد و ۵۸ درصد به ازای هر کیلومتر به ویژه در صورت استفاده از منابع نیروگاه گاز طبیعی کاهش دهد. بنابراین، خودروهای برقی با باتری نقش مهمی در کاهش انتشار گازها از بخش حمل و نقل ایفا می‌کنند. دینه[4] و همکاران (۲۰۲۵) در تحقیقی به برآورد مبتنی بر پرسشنامه انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از تولید برنج در زمین‌های مجتمع در دلتای رودخانه سرخ ویتنام اقدام کردند و به این یافته رسیدند که انتشار گازهای گلخانه‌ای (مثل متان و دی‌اکسیدکربن) در کشت تابستانه برنج بیش‌تر از کشت بهاره است. متان، بیش‌ترین سهم را در انتشار گازهای گلخانه‌ای از شالیزارها دارد و استفاده از کود و انتشار گاز N_2O هم بخشی از انتشارها را تشکیل می‌دهد، ولی کم‌تر از متان است. ناتوریندا[5] و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که استفاده از سنجش از راه دور و هوش مصنوعی به‌عنوان رویکردی قدرتمند و کارآمد، امکان برآورد و گزارش‌دهیِ مقیاس‌پذیرِ جمعیت دام و انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از این دام‌ها را فراهم می‌کند؛ رویکردی که می‌تواند در پیشبرد کشاورزی پایدار و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی مؤثر باشد. شوتزه[6] و همکاران (۲۰۲۵) به مطالعه سنجش از دور زمینی با طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریِر مسیر باز (OP-FTIR) برای پایش گسترده گازهای گلخانه‌ای پرداختند، و نشان دادند که فناوری OP-FTIR توانایی پایش نشت CO_2 در مقیاس وسیع را دارد و می‌تواند توزیع فضایی گاز و نحوه انتشار آن در نزدیکی منافذ خروجی را شناسایی کند. وان[7] و همکاران (۲۰۲۵) به تفکیک سهم تغییرات اقلیمی ناشی از فعالیت‌های انسانی، گازهای گلخانه‌ای و آئروسل‌ها در مرگ‌ومیر ناشی از گرما در بریتانیا اقدام کردند، نتایج نشان داد که بین سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰، به دلیل اثرات ترکیبی افزایش گازهای گلخانه‌ای و کاهش چشم‌گیر آئروسل‌ها، افزایش شدیدی در مرگ‌های ناشی از گرما مشاهده

[1] - Park
[2] - Sadovnikov
[3] - Alrashydah
[4] - Dinh
[5] - Naturinda
[6] - Schütze
[7] - Wan

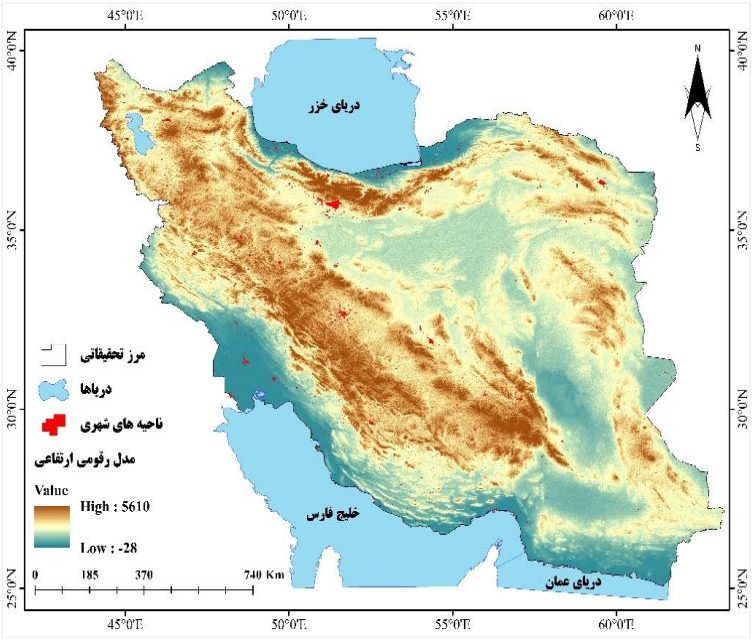
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.6.7]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.7]

شد. گائو[1] و همکاران (۲۰۲۵) به انتشار گازهای گلخانه‌ای غیر CO_2 ناشی از محصولات غلات جهانی و پتانسیل کاهش آن‌ها با ادغام سناریوهای امنیت غذایی و تغییرات اقلیمی پرداختند، از جمله نتیجه این مطالعه این بود که برای کاهش انتشار N_2O در کشاورزی، نمی‌توان به یک راهکار واحد جهانی بسنده کرد، بلکه باید راهبردهای خاص هر منطقه و هر محصول طراحی شود. کاهش انتشار باید به گونه‌ای انجام شود که هم تولید غذایی حفظ شود و هم اهداف اقلیمی برآورده شود. در صورت عدم اقدام، انتشار N_2O تا سال ۲۰۵۰ هم‌چنان افزایش خواهد یافت. ژنگ[2] و همکاران (۲۰۲۵) به تغییرات فصلی در تولید گازهای گلخانه‌ای در رسوبات ساحلی شنی اقدام کردند نتایج نشان داد که دما مهم‌ترین عامل فصلی است و به‌طور مستقیم فعالیت میکروب‌ها را که تولید گازهای گلخانه‌ای را کنترل می‌کنند، تنظیم می‌کند. هم‌چنین تحلیل همبستگی نشان داد که یون آهن دوظرفیتی با تولید گازهای گلخانه‌ای رابطه مثبت دارد، یعنی هرچه آهن بیش‌تر باشد تولید GHG هم بیش‌تر می‌شود، و یون نیترات با تولید دی‌اکسید کربن رابطه منفی دارد، یعنی هرچه نیترات بیش‌تر باشد تولید CO_2 کم‌تر می‌شود. با توجه به مطالعات انجام شده، در پژوهش حاضر به بررسی الگوهای زمانی و فضایی گازهای گلخانه‌ای در ایران با استفاده از داده‌های سنجش از دور در محیط سامانه تحت وب گوگل ارث انجین اقدام شد. این مطالعه تلاش می‌کند با تحلیل داده‌های ماهواره‌ای و تحلیل‌های آماری مرتبط، انتشار گازهای گلخانه‌ای در بازه‌های زمانی مختلف را شناسایی کند.

روش شناسی پژوهش

۱. قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

در تحقیق حاضر به ارزیابی، پایش و تحلیل گازهای گلخانه‌ای در کشور ایران به منظور به دست آوردن الگوهای فضایی و زمانی و هم‌چنین رفتار آن‌ها با هم‌دیگر در بازه زمانی ۲۰۲۴-۲۰۱۹ به صورت ماهانه اقدام شد. محدوده تحقیقاتی مطالعه در قلمرو جغرافیایی ایران واقع شده است (شکل ۱).



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه در پژوهش

۲. داده‌ها و روش کار

[1] - Gao

[2] - Zheng

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.6.7]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.7]

ابتدا برای برآورد گازهای گلخانه‌ای مونوکسید کربن، دی‌اکسید نیتروژن، اُزن، بخار آب با واحد مول بر متر مربع[1] در ستون جو (از سطح زمین تا بالا) و برای متان از داده‌های ستون حجمی نسبت متان به هوای خشک پس از اعمال تصحیح خطاهای سیستماتیک با واحد کسری مول[2] در ستون جو، در قالب محصولات Level-3 از ماهواره Sentinel-5P[3] با مقیاس قدرت تفکیک مکانی با اندازه پیکسل شبکه‌ای با نمونه‌برداری مجدد در GEE[4] برابر با تقریباً ۱۱۱۳/۲ متر و با مقیاس زمانی تقریباً هر ۱ تا ۲ روز[5] (هر ۱ تا ۲ روز یک‌بار از هر منطقه خاص روی زمین داده‌برداری انجام می‌شود) استفاده شد.

شایان ذکر است که محصول COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_CH4، که داده‌های گاز متان (CH_4) را از ماهواره Sentinel-5P ارائه می‌دهد، یک محصول سطح ۳[6] است که بر اساس داده‌های سطح ۲[7] پردازش و بازنمونه‌گیری شده است. یکی از ویژگی‌های مهم این محصول، حذف بخش‌هایی از داده‌ها می‌باشد که کیفیت اندازه‌گیری آن‌ها پایین است یا شرایط اتمسفری و سطحی اجازه استخراج داده‌های دقیق را نمی‌دهد. این حذف داده‌ها به ویژه در مناطق خاصی از جمله مناطق کوهستانی، پوشیده از برف، فراساحلی و مناطقی با شرایط سطحی خاص بیش‌تر مشاهده می‌شود (ویفکیند[8] و همکاران، ۲۰۱۲؛ اشنایزینگ[9] و همکاران، ۲۰۱۴). در نتیجه، در مناطقی که کیفیت داده کم‌تر است، پیکسل‌ها به طور کامل حذف می‌شوند و شکاف یا نواحی فاقد داده در نقشه خروجی متان دیده می‌شود. این فرآیند حذف در مرحله سطح ۲ به سطح ۳ ($L2 \rightarrow L3$) انجام می‌شود و دائمی است (S5P-PAL، ۲۰۲۵).

ماهواره Sentinel-5P متغیرهای گازهای گلخانه‌ای را با دو روش (NRT[10]) و Offline[11] ارائه می‌هد، در روش Offline چون زمان بیش‌تری برای تصحیح و بهبود داده‌ها وجود دارد، داده‌های مذکور با پردازش کامل، کیفیت بالاتر و خطاهای کم‌تر جمع‌آوری شدند روش Offline مناسب برای مطالعات دقیق و تحلیل‌های بلندمدت می‌باشد در این تحقیق نیز از روش Offline استفاده شد. لازم به ذکر است که مقادیر ستونی گازهای NO_2 ، O_3، CO، CH_4 و H_2O به‌صورت تعداد مولکول یا نسبت حجمی در کل ستون جو، از سطح زمین تا بالای جو اندازه‌گیری شده‌اند و توزیع این گازها در ارتفاع متفاوت است (کوپرنیکوس سنتینل–۵ پرکورسر[12]، a۲۰۲۲ ؛ کوپرنیکوس سنتینل–۵ پرکورسر، b۲۰۲۲).

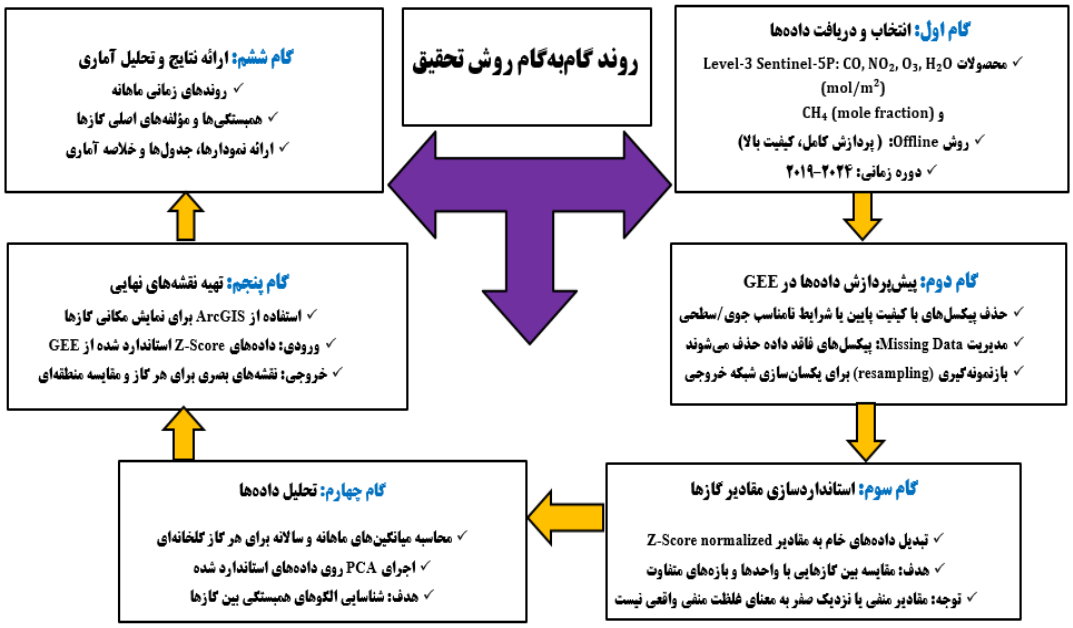
به منظور مقایسه بهتر روندهای تغییرات پارامترهای گازهای گلخانه‌ای، تمام مقادیر گازهای مورد بررسی (O_3، NO_2، CO، H_2O و CH_4) با استفاده از روش Z-Score استانداردسازی شدند تا امکان مقایسه بین گازهایی با واحدها و بازه‌های متفاوت فراهم شود. بنابراین، ممکن است برخی مقادیر استاندارد شده کمی منفی یا نزدیک صفر ظاهر شوند که این حالت به دلیل انحراف از میانگین، حساسیت اندازه‌گیری یا پردازش داده‌ها است و به هیچ وجه به معنی منفی بودن غلظت واقعی گازها نیست. برای اجرای این بخش از پژوهش، از داده‌های سنجش از دور و داده‌های جوی با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پردازش تصاویر ماهواره‌ای و پیاده‌سازی آن‌ها از طریق کدنویسی در محیط GEE[13] و با بهره گرفتن از زبان برنامه‌نویسی JavaScript API[14] استفاده شد.

هم‌چنین برای بررسی بهتر متغیرهای گازهای گلخانه‌ای در پژوهش حاضر از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA[15]) در محیط نرم‌افزار XLSTAT استفاده شد. روش (PCA) به عنوان یک روش آماری و شاخه‌ای از علم یادگیری ماشین چند متغیره، در کاهش

1 - mol/m^2
2 - Mol fraction
3 - Sentinel-5 Precursor
4 - Google Earth Engine
5 - Revisit Interval 2 Days
6 - Level-3
7 - Level-2
8 - Veefkind
9 - Schneising
10 - Near Real-Time
11 - Offline Processed
12 - Copernicus Sentinel-5 Precursor
13 - Google Earth Engine
14 - Application Programming Interface
15 - Principal Component Analysis

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.6.7]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.7]

بُعد داده‌ها موثر است. در این روش مؤلفه‌ها ترکیبات خطی از متغیرهای اصلی هستند که حداکثر واریانس داده‌ها را توضیح می‌دهند و بیش‌ترین اطلاعات را در داده‌ها حفظ می‌کنند. در نهایت برای دید بصری بهتر نقشه‌های تصاویر ماهواره‌ای گازهای گلخانه‌ای مورد مطالعه در این پژوهش بعد از استخراج از ماهواره Sentinel-5P توسط GEE در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شدند. روش تحقیق به صورت گام‌به‌گام در (شکل ۲) ارائه شد.



شکل ۲. روند گام‌به‌گام روش تحقیق

یافته‌های پژوهش

در این پژوهش، روند تغییرات زمانی و مکانی گازهای گلخانه‌ای در محدوده مطالعاتی ایران طی سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ به‌صورت جامع مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌منظور دستیابی به نتایج دقیق، داده‌های سنجش از دور ماهواره‌ای به همراه روش‌های تحلیل آماری پیشرفته به‌کار گرفته شد. بررسی‌ها در مقیاس زمانی ماهانه انجام شد تا بتوان نوسانات اخیر، کوتاه‌مدت و میان‌مدت انتشار گازها را به‌طور هم‌زمان شناسایی و تحلیل کرد. یافته‌های حاصل از این تحلیل‌ها در قالب جدول و نمودارهای متنوع ارائه گردید تا امکان مقایسه و تبیین بهتر نتایج فراهم شود. افزون بر این، از بازنمایی‌های بصری و نقشه‌های تحلیلی نیز استفاده شد تا تغییرات مکانی غلظت گازهای گلخانه‌ای به شکلی روشن و قابل‌فهم نمایش داده شود. براساس یافته‌های به دست آمده از تحلیل آمار توصیفی، میانگین داده‌های همه پارامترهای گازهای گلخانه‌ای در این تحقیق تقریباً نزدیک به صفر یا برابر صفر بوده است. هم‌چنین، انحراف معیار برای گازهای مونوکسیدکربن، دی‌اکسید نیتروژن و بخار آب برابر با ۱/۰۰۷ و برای اُزن و متان برابر با ۱/۰۰۶ به دست آمد. از لحاظ مقدار درصد، ۷۵ درصد داده‌های گاز مونوکسید کربن کم‌تر یا مساوی ۰/۷۳۴، بخار آب کم‌تر یا مساوی ۰/۵۷۲، دی‌اکسید نیتروژن کم‌تر یا مساوی ۰/۶۰۱، متان کم‌تر یا مساوی ۰/۷۲۱ و اُزن کم‌تر یا مساوی ۰/۳۴۷ می‌باشند. این توزیع داده‌ها تقریباً از یک روند نرمال تبعیت می‌کند (جدول ۱).

جدول ۱. آمار توصیفی گازهای گلخانه‌ای (مونوکسیدکربن، دی‌اکسید نیتروژن، اُزن، بخارآب و متان) در طی دوره ۲۰۲۴– ۲۰۱۹

	مونوکسیدکربن (CO)	دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)	اُزن (O_3)	بخارآب (H_2O)	متان (CH_4)
فراوانی یا تعداد	۷۲/۰۰۰	۷۲/۰۰۰	۷۲/۰۰۰	۷۲/۰۰۰	۷۲/۰۰۰
میانگین	– ۰/۰۰۰	– ۰/۰۰۰	– ۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
انحراف معیار	۱/۰۰۷	۱/۰۰۷	۱/۰۰۶	۱/۰۰۷	۱/۰۰۶
حداقل	– ۲/۲۴۷	– ۲/۸۱۳	– ۳/۱۱۲	– ۲/۴۱۱	– ۲/۱۱۷

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.6.7]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.7]

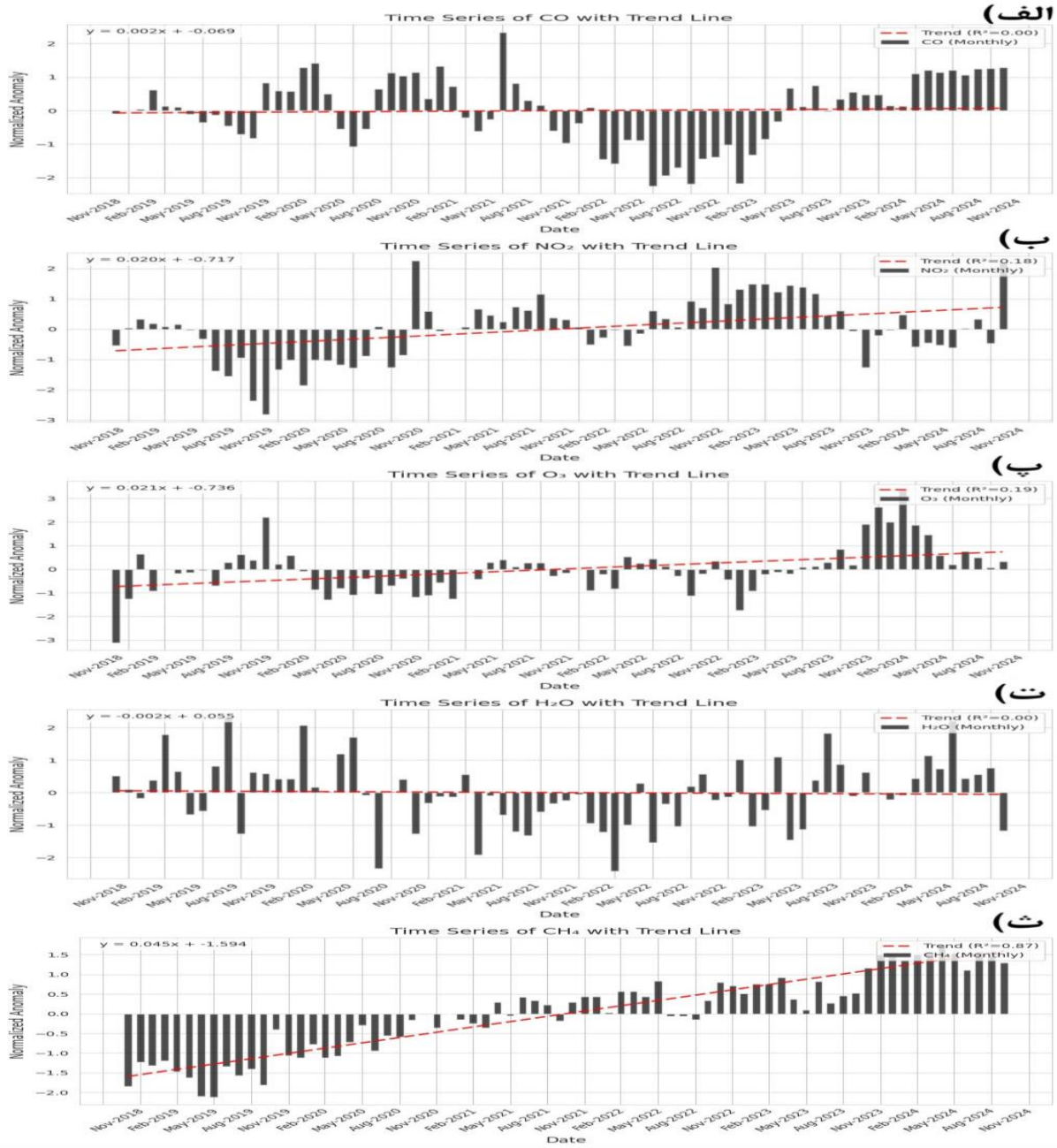
	مونوکسیدکربن (CO)	دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)	اُزن (O_3)	بخارآب (H_2O)	متان (CH_4)
Percent 25	- ۰/۶۳۹	- ۰/۵۶۶	- ۰/۶۰۱	- ۰/۶۱۱	- ۰/۷۳۹
Percent 50	۰/۱۱۲	۰/۰۵۲	- ۰/۰۰۹	- ۰/۰۳۷	۰/۰۵۷
Percent 75	۰/۷۳۴	۰/۶۰۱	۰/۳۴۷	۰/۵۷۲	۰/۷۲۱
حداکثر	۲/۳۳۷	۲/۲۶۰	۳/۴۰۳	۲/۳۱۸	۱/۷۳۹

براساس یافته‌های به دست آمده از بررسی ماهانه روند تغییرات غلظت گاز گلخانه‌ای مونوکسیدکربن در سال‌های مورد مطالعه (۲۰۲۴ – ۲۰۱۹)، باتوجه به نتایج نرمال‌سازی Z-Score، بیش‌تر ماه‌هایی که کم‌تر و نزدیک به میانگین هستند در سال ۲۰۱۹ به دست آمد که این نشان دهنده این می‌باشد که مقدار اندازه‌گیری شده تفاوت زیادی با مقدار متوسط داده‌ها ندارد. بالاترین مقدار مثبت در حوالی ماهای جولای و آگوست ۲۰۲۱، و پایین‌ترین مقدار منفی در اواسط ۲۰۲۲ می‌باشد. این مقدار افزایش‌های مثبت می‌تواند ناشی از آتش‌سوزی‌های گسترده، فعالیت‌های صنعتی بیش‌تر یا شرایط جوی خاص باشد. مقادیر پایین مانند اکثر ماه‌های سال ۲۰۲۲ می‌تواند به دلیل کاهش منابع تولید مونوکسیدکربن یا شرایط جوی که تجزیه و پخش مونوکسیدکربن را تسهیل می‌کنند، ارتباط داشته باشد. روند بازگشت رو به بالا (مثبت) در سال ۲۰۲۴ شاید به تغییرات اقلیمی منطقه مورد تحقیق، افزایش فعالیت‌های انسانی پس از محدودیت‌ها، یا شرایط آب‌وهوایی خاص مرتبط باشد. با توجه به مقدار R^2 روندی در سری زمانی این گاز مشاهده نشد (شکل الف – ۳). با توجه به نتایج اخذ شده از بررسی متغیرگاز دی‌اکسید نیتروژن از داده‌های سنجش از دور و یافته‌های مقدار خروجی نرمال‌سازی Z-Score حاکی از آن است که در بازه زمانی مورد مطالعه دوره‌هایی با کاهش شدید دی‌اکسید نیتروژن (Z-Score منفی زیاد، مانند از ماه سپتامبر سال ۲۰۱۹ تا اوایل ۲۰۲۰) و دوره‌هایی با افزایش شدید (مانند ماه‌های ژانویه ۲۰۲۱، ژانویه ۲۰۲۳ و دسامبر ۲۰۲۴) مشاهده شد. علت افزایش دی‌اکسید نیتروژن می‌تواند به دلیل افزایش فعالیت‌های فصول سرد مانند استفاده بیش‌تر از وسایل گرمایشی، رویدادهای خاص صنعتی و هم‌چنین به دلیل استفاده از سوخت‌های فسیلی برای گرمایش، باشد. افزون بر این امکان وارونگی دما در زمستان تجمع آلاینده‌ها را تشدید می‌کند. براساس نمودار سری زمانی مربوط به دی‌اکسید نیتروژن در طول سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴، مقدار ضریب تعیین آن R^2 = ۰/۱۸ به دست آمد. یعنی تنها ۱۸ درصد از تغییرات دی‌اکسید نیتروژن توسط روند خطی (گذشت زمان) قابل توضیح است و ۸۲ درصد از تغییرات تحت تأثیر عوامل دیگر است (شکل ب – ۳). بنا بر نتایج تحقیق تغییرات غلظت گاز اُزن در دوره آماری مورد مطالعه ماه‌های سال ۲۰۱۹ مقدار نرمال‌شده اُزن عمدتاً منفی یا نزدیک به صفر است و مقادیر میانی گاز مذکور از ماه مارس سال ۲۰۲۰ تا ماه می ۲۰۲۲ مقادیر منفی و کمی کم‌تر از صفر و در بعضی از ماه‌ها به پایین‌تر از ۱- می‌رسد که نشان‌دهنده کاهش نسبی اُزن نسبت به میانگین است و از ماه نوامبر سال ۲۰۲۳ تا آوریل سال ۲۰۲۴ روند افزایش قابل توجهی مشاهده می‌شود که اوج آن در اوایل ۲۰۲۴ است، به طوری که مقادیر انحراف به بیش از ۳ واحد Z-Score می‌رسد. بعد از اوج ۲۰۲۴، مقادیر به سمت صفر و کمی مثبت تمایل دارند. کاهش‌های مشاهده شده در برخی دوره‌ها می‌تواند به دلیل کاهش منابع تولید آلاینده‌های اُزن یا شرایط جوی نامساعد برای تولید اُزن باشد. افزایش‌های قابل توجه در ماه‌های پایانی سال ۲۰۲۳ و اکثر ماه‌های سال ۲۰۲۴ ممکن است ناشی از افزایش تابش خورشید، شرایط جوی مساعد، و افزایش فعالیت‌های انسانی یا وقوع رویدادهای خاصی باشد که منجر به تجمع زیاد اُزن می‌شوند. هم‌چنین نمودار سری زمانی مربوط به اُزن در طول سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ رسم شد که مقدار ضریب تعیین آن R^2 = ۰/۱۹ حاصل شد یعنی تنها ۱۹ درصد از تغییرات اُزن توسط روند خطی (گذشت زمان) قابل توضیح است و ۸۱ درصد از تغییرات تحت تأثیر عوامل دیگر است (شکل پ – ۳). براساس نتایج به دست آمده از تحلیل روند بخار آب با نرمال‌سازی Z-Score ، بخار آب نشان دهنده این می‌باشد که برخی ماه‌ها و سال‌ها مانند اکتبر ۲۰۱۹، آوریل ۲۰۲۰، آگوست ۲۰۲۴ دارای مقدار زیاد بخار آب با مقادیری بالای ۲ می‌باشد. برخی ماه‌ها و سال‌ها مانند اکتبر ۲۰۲۰، ژوئن ۲۰۲۱ و می ۲۰۲۲ مقدار بسیار کم یا کاهش قابل توجه بخار آب با مقادیر پایین‌تر از ۲ – مشاهده شد. این شرایط بیان‌گر این می‌باشد که بخار آب اتمسفری به طور طبیعی نوسان دارد و تحت تأثیر عوامل متعددی است. مسیر کلی نشان‌دهنده نوسانات طبیعی بخار آب جو می‌باشد که تحت تأثیر دما، منابع آب و الگوهای جوی قرار دارد. افزایش بخار آب عمدتاً به دلیل افزایش دما و تبخیر بالاتر و کاهش بخار آب معمولاً به دلیل کاهش دما، خشکسالی یا شرایط جوی خشک

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.6.7]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.7]

اتفاق می‌افتد. با توجه به مقدار R^2 روندی در سری زمانی آن مشاهده نمی‌شود (شکل ت – ۳). با توجه به خروجی نتایج بررسی روند تغییرات غلظت گاز متان براساس یافته‌های نرمال‌سازی Z-Score بیان‌گر این می‌باشد که از ماه ژانویه سال ۲۰۱۹ تا ژوئن ۲۰۲۱ اکثراً مقدار Z-Score منفی یا نزدیک به صفر دارند که نشان‌دهنده مقدار کم‌تر یا نزدیک به میانگین متان در این دوره‌ها است. از اواخر ماه‌های سال ۲۰۲۱ به بعد روند به سمت مقادیر مثبت حرکت می‌کند، به ویژه در ماه‌های سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ که مقدار Z-Score بسیار مثبت و حتی بیش‌تر از مقدار ۱ مشاهده می‌شود، این روند نشان‌دهنده افزایش نسبی و مستمر مقدار متان در جو طی این سال‌ها نسبت به میانگین بلندمدت می‌باشد. این افزایش تدریجی و نسبتاً پایدار به ویژه از سال ۲۰۲۲ به بعد کاملاً محسوس می‌باشد و اوج مقدار در اواخر دوره سال ۲۰۲۴ در ماه جولای با مقدار ۱/۷۳ اتفاق افتاده است. روند کلی بیان‌گر افزایش تدریجی و قابل ملاحظه متان در جو طی سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ است. افزایش متان به طور کلی می‌تواند ناشی از فعالیت‌های انسانی و تأثیرات تغییرات آب و هوایی باشد.کاهش مقادیر متان در برخی بازه‌های کوتاه‌مدت می‌تواند ناشی از تغییرات فصلی، کاهش منابع انتشار باشد. نمودار سری زمانی مربوط به متان در طول سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ ترسیم شد که مقدار ضریب تعیین آن R^2 = ۰/۸۷ به دست آمد. یعنی تنها ۸۷ درصد از تغییرات متان توسط روند خطی (گذشت زمان) قابل توضیح است و ۱۳ درصد از تغییرات تحت تأثیر عوامل دیگر است (شکل ث – ۳).

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.6.7]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.7]



شکل ۳. نمودارهای سری زمانی گازهای گلخانه‌ای (مونوکسیدکربن، دی‌اکسید نیتروژن، اُزن، بخارآب و متان) در طی دوره ۲۰۲۴- ۲۰۱۹

براساس نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، اکثر متغیرهای گازهای گلخانه‌ای از الگویی با پراکنش یکنواخت و روند افزایشی در طول ماه‌های سال‌های مورد مطالعه پیروی می‌کنند. پارامترهای متان، اُزن و دی‌اکسید نیتروژن بیش‌ترین سهم را در تغییرات واریانس کل در تجزیه و تحلیل آماری به خود اختصاص داده‌اند. نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشان داد که حدود ۷۱/۲۷ درصد از تغییرات کل، با دو مؤلفه‌ی (PCA_1) و (PCA_2) قابل توجیه است. هم‌چنین، تغییرات پارامترهای گازهای گلخانه‌ای در طول ماه‌های سال‌های متوالی، بر اساس یافته‌ها و خروجی PCA، در قالب گروه‌های مختلف ارائه شد. گروه الف: در ماه‌های (ژانویه، فوریه، جولای، آگوست، آوریل، مارس و نوامبر) سال ۲۰۱۹، ماه‌های (سپتامبر و اکتبر) ۲۰۲۰ و ماه‌های (آوریل، فوریه، دسامبر، ژانویه و ژوئن) ۲۰۲۱ کم‌ترین مقادیر غلظت گازهای گلخانه‌ای در کل ستون جو، از سطح زمین تا بالای جو مشاهده شد. در این گروه یک ارتباط تقریباً منظم در رفتار غلظت گازها در طی ماه‌های مذکور دیده شد یعنی با توجه به این که هر چه از ماه‌های سرد به سمت ماه‌های گرم (تقریباً اواخر زمستان تا اوایل تابستان)، غلظت برخی از گازهای گلخانه‌ای روندی اندک افزایشی

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.6.7]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.7]

نشان داد، بنابراین در این گروه کم‌ترین مقدار گازهای گلخانه‌ای در کل ستون جو قابل مشاهده هستند (شکل الف-۴). گروه ب: ماه‌های (ژوئن، سپتامبر، می، دسامبر و اکتبر) سال ۲۰۱۹، ماه‌های (ژوئن، جولای، آگوست، می، نوامبر، دسامبر، مارس، فوریه، آوریل، ژانویه) ۲۰۲۰ و ماه‌های (می و مارس) ۲۰۲۱، این گروه نیز کم‌ترین میزان تغییرات غلظت گازهای گلخانه‌ای را پس از گروه الف در کل ستون جو، از سطح زمین تا بالای جو به خود اختصاص داد. گازهای گلخانه‌ای مخصوصاً بخارآب با افزایش دما از ماه‌های نسبتاً سرد به سمت ماه‌های گرم روندی تقریباً افزایشی به خود گرفته است بنابراین در گروه مذکور مقدار گازهای گلخانه‌ای تا حدی نسبت به گروه الف بیش‌تر می‌باشد. هم‌چنین بیش‌ترین غلظت بخار آب، در ماه ژانویه سال ۲۰۲۰ در این گروه مشاهده شد (شکل الف-۴) و تصویر ماهواره‌ای بخار آب در این ماه به عنوان نمونه ارائه شد. نتایج تحلیل انتشار مکانی بخار آب برای ماه ژانویه سال ۲۰۲۰ در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که در نواحی جنوبی ایران، به‌ویژه استان‌های هرمزگان، بوشهر، خوزستان، سیستان و بلوچستان و جنوب کرمان، به دلیل نزدیکی به منابع آبی و دماهای بالا، غلظت بخار آب بیش‌تر است. در مقابل، مناطق شمال‌غربی و شمال‌مرکزی ایران، شامل استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، کردستان، همدان و تهران، به دلیل دماهای پایین‌تر، فاصله بیش‌تر از منابع آبی و شرایط جوی خشک‌تر، دارای غلظت کم‌تر بخار آب هستند (شکل ب-۴). گروه پ: طبق خروجی نمودار PCA در این گروه به ترتیب بیش‌ترین مقادیر، دو گاز مونوکسیدکربن و بخارآب در ماه آگوست سال ۲۰۲۱ مشاهده شد. این موضوع بیان‌گر این است که مقدار غلظت مولکول یا نسبت حجمی مونوکسیدکربن در کل ستون جو (از سطح زمین تا بالای جو) در مقایسه با سایر گازهای گلخانه‌ای طی سال‌های مورد مطالعه پایین می‌باشد. هم‌چنین بیش‌ترین مقدار مونوکسیدکربن در ماه آگوست سال ۲۰۲۱ مشاهده شد (شکل الف-۴) و تصویر ماهواره‌ای این ماه، مونوکسیدکربن برای نمونه ارائه شد. بر اساس نتایج حاصل از داده‌های ماهواره‌ای، نقشه‌ی انتشار مکانی مونوکسید کربن در ماه آگوست ۲۰۲۱ نشان می‌دهد که مناطق ساحلی، نواحی صنعتی، اسکله‌ها، تأسیسات و بنادر نفتی در جنوب و جنوب‌غرب کشور، هم‌چنین برخی نواحی شرقی و کلان‌شهرها و حاشیه‌های شهری، با رنگ تیره‌تر (نشان‌دهنده‌ی حجم و غلظت بیشتر مونوکسید کربن) مشخص شده‌اند. در مقابل، بخش‌هایی از فلات مرکزی، قسمت‌هایی از شمال‌غرب و برخی نواحی مرتفع، با رنگ روشن‌تر (نشان‌دهنده‌ی غلظت پایین این گاز) دیده می‌شوند (شکل پ-۴). تمرکز صنایع نفت، پالایشگاه‌ها، پتروشیمی‌ها، پایانه‌های صادرات نفت و گاز، به همراه ترافیک سنگین، سوخت ناقص در صنایع، نیروگاه‌ها، کوره‌ها و تراکم بالای جمعیت شهری، از مهم‌ترین عوامل افزایش غلظت مونوکسید کربن در این مناطق به شمار می‌روند (هندریک[1] و همکاران، ۲۰۲۳؛ تاولا[2] و همکاران، ۲۰۲۵). گروه ت: این گروه بیان‌گر وجود غلظت متان و اُزن، در کل ستون جو، تقریباً از اواخر ماه‌های سال ۲۰۲۳ تا یازده تا ماه سال ۲۰۲۴ است (شکل الف-۴). که براساس خروجی نمودار PCA بیش‌ترین مقدار متان در ماه می سال ۲۰۲۴ و بیش‌ترین مقدار اُزن در ماه آگوست ۲۰۲۴ ثبت شد که تصاویر ماهواره‌ای این متان و اُزن در دو ماه مذکور برای نمونه در پژوهش نمایش داده شد. بر اساس داده‌های تصاویر ماهواره‌ای، نقشه انتشار فضایی متان برای ماه می سال ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که غلظت بالای این گاز در مناطقی هم‌چون نوار شمالی استان گلستان، بخش‌هایی از سواحل دریای خزر (به‌ویژه شرق مازندران)، سواحل جنوبی خلیج فارس (استان‌های بوشهر و هرمزگان)، بخش‌هایی از سواحل دریای عمان، نواحی مرزی غرب خوزستان و جنوب ایلام، و نیز در استان‌هایی مانند تهران، قزوین، قم، سمنان، اصفهان و آذربایجان شرقی مشاهده شده است. لازم به ذکر است که بخش‌هایی از نقشه که با رنگ سیاه مشخص شده‌اند (مانند مناطق وسیعی در زاگرس میانی و غربی، بخش‌هایی از شمال‌غرب، بخش‌هایی از رشته‌کوه البرز و بخش‌هایی از ایران مرکزی) فاقد داده بوده‌اند. در مقابل، ارتفاعات سردسیر (غرب و شمال‌غرب) منطقه مورد مطالعه به دلیل دمای پایین و کاهش فعالیت میکروبی و تجزیه بی‌هوازی، نبود صنایع بزرگ نفت و گاز، دارای غلظت پایین‌تری از متان هستند (شکل ت-۴). یافته‌های مربوط به گاز اُزن در ماه آگوست ۲۰۲۴ نشان داد که بخش‌های مرکزی و جنوبی، بخش‌هایی از خوزستان شرقی، نوار مرکزی و جنوب‌شرقی، زاگرس میانی و غربی، و هم‌چنین نقاط پراکنده‌ای در شرق کشور، دارای غلظت پایین اُزن هستند. در مقابل، گستره‌ای وسیع از شمال‌شرق، مناطق مرکزی، زاگرس شمالی و بخشی از جنوب‌غرب کشور، غلظت متوسط این گاز را نشان می‌دهند. بیش‌ترین غلظت اُزن در

[1] - Hendrick
[2] - Tavella

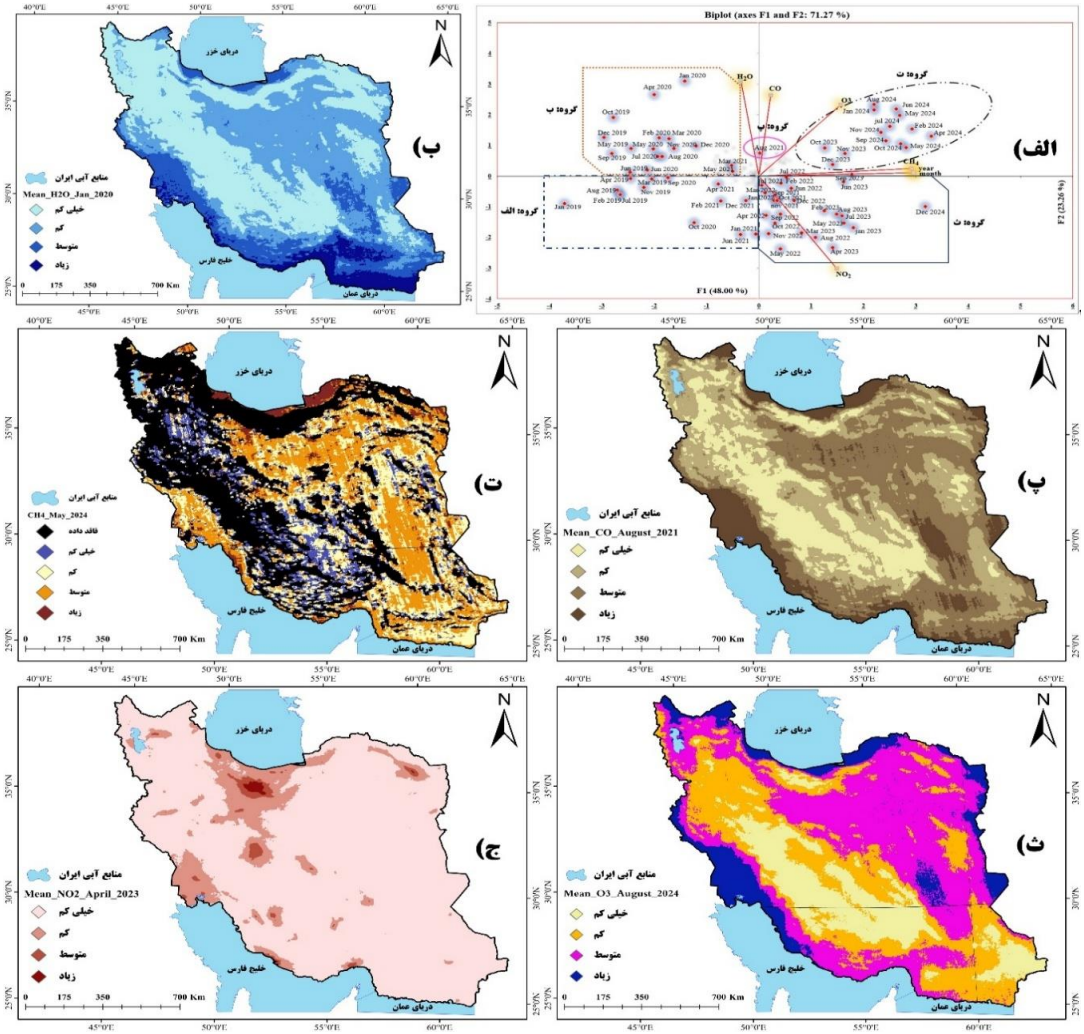
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.6.7]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.7]

سواحل دریای خزر، نوار ساحلی خلیج فارس، و برخی نقاط مرتفع شرق و شمال‌شرق مشاهده شده است. عوامل مؤثر در افزایش انتشار اُزن می‌تواند شامل ترکیب انتشار مواد اولیه تشکیل‌دهنده، تابش شدید خورشید، و شرایط جوی محلی باشد. ماه آگوست در منطقه مورد مطالعه معمولاً با شدت بالای تابش فرابنفش (UV) همراه است که سرعت واکنش‌های فتوشیمیایی را افزایش می‌دهد (هودزیک و مادرونیک[1]، ۲۰۱۸؛ وانگ[2] و همکاران، ۲۰۲۴). غلظت بالاتر اُزن در شرق ایران احتمالاً نتیجه ترکیب انتقال آلودگی از کشورهای همسایه، تابش شدید، دمای بالا و شرایط جوی آرام است که هم تولید و هم ماندگاری اُزن را تقویت می‌کند. در مقابل، غلظت پایین اُزن در مناطقی مانند بیابان‌ها و فلات مرکزی ممکن است ناشی از نبود منابع آلاینده، شرایط جوی متفاوت، تراکم کم جمعیت و کم‌صنعتی بودن این مناطق باشد. هم‌چنین، تضعیف واکنش‌های شیمیایی به دلیل ویژگی‌های خاص جوی، می‌تواند علت کاهش انتشار اُزن در این نواحی باشد (شکل ث-۴). گروه ث: تعداد مولکول یا نسبت حجمی دی‌اکسید نیتروژن در کل ستون جو، از سطح زمین تا بالای جو در ماه‌های (جولای، سپتامبر، اکتبر و نوامبر) سال ۲۰۲۱، ماه‌های (فوریه، ژوئن، مارس، ژانویه، دسامبر، سپتامبر، اکتبر، نوامبر، آگوست و می) ۲۰۲۲ و ماه‌های (آوریل، ژانویه، مارس، می، جولای، آگوست، فوریه، ژوئن و سپتامبر) ۲۰۲۳ و ماه دسامبر سال ۲۰۲۴ ثبت شد. در همین ماه‌ها، کم‌ترین مقدار غلظت بخار آب مشاهده گردید که نشان‌دهنده‌ی وجود رابطه معکوس بین دی‌اکسید نیتروژن با بخار آب و مونوکسید کربن است (شکل الف-۴). طبق نتایج نمودار PCA که بیش‌ترین مقدار غلظت دی‌اکسید نیتروژن در ماه آوریل ۲۰۲۳ مشاهده شد که تصویر ماهواره‌ای همین ماه برای نمونه در تحقیق گزارش شد. یافته‌های مربوط به توزیع مکانی دی‌اکسید نیتروژن برای ماه آوریل ۲۰۲۳، بر اساس داده‌های تصاویر ماهواره‌ای، نشان داد که غلظت این گاز در کلان‌شهرها، مناطق شهری و نواحی صنعتی به‌طور قابل توجهی بالاتر است. استان‌هایی مانند تهران، اصفهان، خوزستان، گیلان، کرمان، و بخش‌هایی از استان فارس و خوزستان دارای غلظت‌های متوسط تا زیاد بوده‌اند. بیش‌تر این مناطق، شهرهای بزرگ و صنعتی با منابع اصلی انتشار دی‌اکسید نیتروژن؛ از جمله وسایل نقلیه، نیروگاه‌ها، صنایع سنگین و پالایشگاه‌ها هستند. کلان‌شهر تهران، به عنوان پایتخت و پرجمعیت‌ترین شهر کشور، با حجم بالای ترافیک و وجود صنایع متعدد، یکی از مهم‌ترین مراکز انتشار این گاز محسوب می‌شود. در مقابل، مناطق دورافتاده و کم‌جمعیت، نواحی کویری و بیابانی، و بسیاری از مناطق شرق، شمال‌شرق، غرب و شمال‌غرب کشور دارای غلظت بسیار کم یا فاقد دی‌اکسید نیتروژن هستند. این مناطق به دلیل جمعیت اندک و فعالیت صنعتی محدود، منابع انتشار ناچیزی دارند (شکل ج-۴).

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، به‌طور کلی غلظت گازهای گلخانه‌ای اُزن، متان و دی‌اکسید نیتروژن در طول ماه‌های مورد پژوهش روند افزایشی داشته است. با در نظر گرفتن شرایط دمایی ماه‌های مورد مطالعه در منطقه مورد تحقیق، می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به داده‌های ستونی NO_2 ، برخلاف آنچه در اندازه‌گیری‌های سطح زمین مشاهده می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که غلظت دی‌اکسید نیتروژن در ماه‌هایی با دمای بالاتر افزایش یافته است؛ این نتیجه مطابق با تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) حاصل از داده‌های ماهواره‌ای است و هم‌چنین در برخی ماه‌های، با رطوبت بالا همزمان با کاهش نسبی دما، تغییرات دی‌اکسید نیتروژن ستونی مشاهده شده است. در مقابل با افزایش یکنواخت در دما و رطوبت، مقدار بخار آب به‌طور چشم‌گیری افزایش پیدا کرده است. این پدیده را می‌توان در گروه پ و ب دید. هم‌چنین، داده‌ها نشان می‌دهد که با افزایش دما از سطوح متوسط به سطوح بالا، غلظت اُزن و متان نیز به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند. این موضوع بیان‌گر تأثیر مستقیم شرایط حرارتی بر تولید و ماندگاری این گازها در جو است.

[1] - Hodzic & Madronich
[2] - Wang

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.6.7]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.7]



شکل ۴. نمودار PCA و تغییرات فضایی غلظت گازهای گلخانه‌ای (مونوکسیدکربن، دی‌اکسید نیتروژن، اُزن، بخارآب و متان) در طی دوره ۲۰۱۹ -۲۰۲۴

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق به مطالعه و ارزیابی گازهای گلخانه‌ای شامل: مونوکسیدکربن، دی‌اکسید نیتروژن، اُزن، بخار آب و متان در ایران طی دوره آماری سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ با استفاده از محصولات ماهواره Sentinel-5P و روش آماری چندمتغیره (PCA) اقدام شد. نتایج ارزیابی گازهای گلخانه‌ای نشان داد که بیش‌ترین غلظت مونوکسیدکربن در آگوست ۲۰۲۱ مشاهده شد. مقادیر سال ۲۰۱۹ نزدیک به میانگین بوده و در سال ۲۰۲۴ روندی افزایشی مشاهده شد هم‌چنین روند خطی گاز مذکور نشان داد که تغییرات CO تحت تأثیر عوامل متعدد غیرخطی است. بالاترین مقادیر دی‌اکسید نیتروژن در ماه آوریل ۲۰۲۳ مشاهده شد و ضریب تعیین آن بیان‌گر تأثیر عوامل متعدد غیرخطی بر تغییرات NO_2 است. هم‌چنین حداکثر غلظت اُزن در ماه ماه آگوست سال ۲۰۲۴ بود که مقادیر Z-Score آن طی سال‌های اولیه منفی یا نزدیک صفر و در سال‌های پایانی روند افزایشی داشتند که ضریب تعیین آن نشان‌دهنده تأثیر عمده عوامل غیرخطی است. بیش‌ترین غلظت بخار آب در ماه ژانویه سال ۲۰۲۰ ثبت شد. نوسانات بخار آب عمدتاً تحت تأثیر تغییرات دما، منابع آب و الگوهای جوی است. روند خطی مشخصی در منطقه مورد مطالعه در سال‌های مورد تحقیق مشاهده نشد. روند افزایشی متان به‌طور مشخص از اواخر ۲۰۲۱ تا پایان ۲۰۲۴ ثبت شد. بیش‌ترین مقدار در می ۲۰۲۴ ثبت شد. ضریب تعیین گاز مذکور با مقدار R^2 = ۰/۸۷ نشان‌دهنده روند خطی قابل توجه در افزایش متان است، که می‌تواند ناشی از فعالیت‌های انسانی و تغییرات آب و هوایی باشد.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.6.7]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.7]

نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) نشان داد که دو مؤلفه‌ی اصلی (PCA_1) و (PCA_2) تقریباً ۷۱/۲۷ درصد از تغییرات کل داده‌ها را شامل شدند و گازهای متان، اُزن و دی‌اکسید نیتروژن بیش‌ترین سهم را در واریانس کل دارند. بنابراین این گازها نقش کلیدی در تغییرات اقلیمی و کیفیت هوا در منطقه دارند. کاهش یا افزایش هر یک از این گازها می‌تواند به شکل مستقیم یا غیرمستقیم بر دمای محلی، الگوهای بارش و رطوبت، و هم‌چنین خطر وقوع پدیده‌های هواشناسی شدید تأثیرگذار باشد. هم‌چنین تجزیه و تحلیل ماهانه گروه‌بندی شده نشان داد که کم‌ترین غلظت گازهای گلخانه‌ای در ماه‌های سرد و میانه سال‌های مورد مطالعه مشاهده شد و بخار آب به دلیل افزایش دما روند افزایشی از ماه‌های سرد به گرم داشت. تحلیل‌های آماری و داده‌های سنجش از دور نشان داد که تغییرات گازهای گلخانه‌ای در منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر عوامل طبیعی و فعالیت‌های انسانی قرار دارد و هر گاز الگوی رفتاری متفاوتی دارد. متان (CH_4) با روند افزایشی پایدار از اواخر ۲۰۲۱ تا پایان ۲۰۲۴، نشان‌دهنده تأثیر مستمر فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی، دامداری و سوخت‌های فسیلی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای است. سایر گازها مانند CO، NO_2، O_3 و H_2O بیش‌تر تحت تأثیر نوسانات فصلی و رویدادهای کوتاه‌مدت قرار دارند و روند مشخصی از نظر افزایشی یا کاهشی طولانی‌مدت ندارند. بررسی فصلی نشان داد که مقادیر CO و NO_2 در فصل‌های سرد افزایش می‌یابند، در حالی که غلظت O_3 و H_2O عمدتاً تحت تأثیر دما و تابش خورشیدی تغییر می‌کنند. با توجه به روند افزایشی متان و تغییرات ماهانه و سالانه سایر گازها، می‌توان نتیجه گرفت که ایران، به ویژه مناطق شهری و صنعتی، با چالش‌های قابل توجهی در زمینه آلودگی هوا و تغییر اقلیم روبرو است. افزایش گازهای گلخانه‌ای، به ویژه متان، می‌تواند باعث تشدید گرمایش محلی و تغییر در الگوهای بارشی شود. هم‌چنین، نوسانات فصلی گازهای CO و NO_2 می‌تواند با شرایط جوی پایدار زمستانی، کیفیت هوا را کاهش داده و خطراتی برای جمعیت شهری ایجاد کند.

با توجه به مطالعات انجام شده در تحقیقات پیشین در زمینه گازهای گلخانه‌ای و روش‌های مختلف پایش آن‌ها، در پژوهش حاضر به پایش، تحلیل و ارزیابی گازهای گلخانه‌ای در ایران پرداخته شد. یافته‌های به‌دست‌آمده در این تحقیق با نتایج سایر پژوهش‌گران مقایسه و ارزیابی شد و در چارچوب پیشینه علمی حوزه مورد بررسی، تحلیل و تبیین گردید. این پژوهش که با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-5P با محصولات سطح ۳ و پردازش کامل Offline، امکان تحلیل دقیق و بلندمدت گازهای گلخانه‌ای را فراهم کرده، دقت و کیفیت بالاتری دارد. اندازه‌گیری غلظت ستونی گازها در کل ستون جو و در ارتفاع‌های مختلف، بررسی روندهای فضایی و زمانی را بهبود می‌بخشد. به‌کارگیری محیط GEE همراه با پردازش برنامه‌نویسی شده، مدیریت حجم عظیم داده‌ها و سرعت تحلیل را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، ترکیب نرمال‌سازی داده‌ها، تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای کاهش ابعاد و الگوریتم‌های یادگیری ماشین چندمتغیره، امکان استخراج الگوهای پنهان و ارائه تحلیل جامع‌تر را فراهم می‌کند. این عوامل، پژوهش حاضر را از نظر روش‌شناسی و قابلیت تحلیل نسبت به مطالعات مشابه متمایز می‌سازد. این روش می‌تواند به عنوان یک ابزار کارآمد برای پایش مستمر آلودگی هوا و ارزیابی تأثیر فعالیت‌های انسانی بر تغییرات اقلیمی در منطقه مورد پژوهش، مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت، نتایج این مطالعه تأکید می‌کند که اقدامات کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، بهینه‌سازی مصرف سوخت، مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی شهری می‌توانند نقش مهمی در کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم در منطقه ایران ایفا کنند. ترکیب فعالیت‌های انسانی و شرایط طبیعی، به‌طور هم‌زمان بر آلودگی هوا و تغییرات اقلیمی کشور اثرگذار است و ضرورت مدیریت هوشمند و برنامه‌ریزی دقیق را برجسته می‌سازد. با توجه به یافته‌های به دست آمده از تحقیق حاضر راهکارها ذیل پیشنهاد می‌شود:

- پایش مستمر و هوشمند با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و الگوریتم‌های یادگیری ماشین.
- آموزش و آگاهی‌بخشی عمومی درباره اثرات انتشار گازها بر سلامت و اقلیم.
- توسعه سامانه‌های هشدار سریع برای آلودگی هوا و پدیده‌های شدید اقلیمی.
- مدیریت کاربری اراضی و توسعه فضای سبز شهری برای جذب گازهای آلاینده.

ملاحظات اخلاقی

نویسنده اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده و این موضوع مورد تأیید ایشان می‌باشد.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.6.7]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.7]

مشارکت نویسندگان

نویسنده در جمع‌آوری داده‌ها، تهیه گزارش پژوهش، تحلیل داده‌ها مشارکت کرده است.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسنده این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه انجام شد.

سپاسگزاری

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

منابع

احمدی ارکمی، علی (۱۴۰۱). برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای و بررسی سناریوهای کاهش انتشار سازگار با منطقه در افق ۲۰۳۰ میلادی (مطالعه موردی: استان گیلان، ایران). *سلامت و محیط‌زیست*، ۱۵(۱)، ۱۲۱-۱۳۶. http://ijhe.tums.ac.ir/article-1-6617-fa.html

آماده، حمید؛ حق‌دوست، احسان و اعظمی، آرش (۱۳۸۸). بررسی رابطه حجم گازهای گلخانه‌ای و تولید ناخالص داخلی سرانه در ایران (مطالعه موردی دی‌اکسید کربن). *پژوهشنامه اقتصادی*، ۹(۳۵)، ۲۰۹-۳۳۷.

توکلی، آزاده (۱۳۹۸). تجزیه و تحلیل عوامل مؤثر بر انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHGs) و پتانسیل‌های کاهش انتشار در ایران. *فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی*، ۱۵(۶۰)، ۷۷-۱۰۵. http://iiesj.ir/article-1-985-fa.html

حیدری، فائزه؛ شرفی، سعید و محمدی قلعه‌نی، مهدی (۱۴۰۲). رابطه شاخص‌های خشکسالی با انتشار گازهای گلخانه‌ای بخش کشاورزی ایران. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۷(۲)، ۲۶۱-۲۷۵. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20087942.1402.17.2.6.2

رضوانی، محمد؛ پندار، مهدی و وفائی، الهام (۱۴۰۴). ارزیابی عوامل مؤثر بر انتشار دی‌اکسید کربن در ایران با تأکید بر عدم قطعیت سیاست اقتصادی. *مدیریت اکوسیستم‌های طبیعی*، ۳(۴)، ۱-۱۱. https://doi.org/10.22034/emj.2024.714147

کاشفی، کاظم؛ نودل، توحید؛ گودرزوند چگینی، فاطمه؛ زاجکانی‌ها، فاطمه و محجوبی، علی‌اصغر (۱۳۹۷). برآورد میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در دو پالایشگاه شهید هاشمی نژاد و فجر جم و ارائه راهکارهای عملیاتی جهت کاهش انتشار در آن‌ها. *مهندسی گاز ایران*، ۵(۲)، ۶۸-۸۰. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.25885251.1397.5.2.6.1

کرباسی، سمیرا؛ ملکوتی، حسین؛ رهنما، مهدی و آزادی، مجید (۱۴۰۱). مطالعه غلظت ستونی CH4 روی ایران: بکارگیری مشاهدات ماهواره‌ای GOSAT و شبیه‌سازی‌های عددی WRF-GHG. *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۱۴۰۱(۵۰)، ۱-۲۲.

مرادی‌مجد، نسرین؛ فلاح قالهری، غلامعباس و چترنور، منصور (۱۳۹۹). مدل‌سازی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در باغات استان خوزستان. *نشریه محیط زیست طبیعی*، ۷۳(۴)، ۸۱۹-۸۳۳. https://doi.org/10.22059/jne.2021.302857.1987

میرزایی، مراد؛ گرجی، منوچهر؛ مقیسه، ابراهیم؛ اسدی، حسین و رضوی طوسی، احسان (۱۴۰۰). مدیریت پایدار خاک و نقش آن در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای. *مدیریت اراضی*، ۹(۲)، ۱۸۷-۲۰۴. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23456205.1400.9.2.1.0

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.6.7]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.7]

References

Ahmadi Orkomi A. (2022). Greenhouse gas emission inventory and quantifying regional compatible mitigation plans-horizon 2030 (case study: Guilan province, Iran). *ijhe*; 15 (1), 121-136. (In persian) http://ijhe.tums.ac.ir/article-1-6617-fa.html.

Alrashydah, E., Alqahtani, T., & Al-Sabaeei, A. (2025). Emissions of conventional and electric vehicles: A comparative sustainability assessment. *Sustainability*, 17(15), 6839. https://doi.org/10.3390/su17156839

Amadeh, H. , Haghdoost, E. & Azami, A. (2009). Survey the Relationship between Greenhouse Gas and GDP Per Capital in Iran (Carbon Dioxide Gas). Economics Research, 9(35), 209-337. (In persian)

Bréon, F.-M., & Ciais, P. (2010). Spaceborne remote sensing of greenhouse gas concentrations. *Comptes Rendus Geoscience*, 342(4–5), 412–424. https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.09.012

Copernicus Sentinel-5 Precursor. (2022a). Algorithm Theoretical Baseline Document for Sentinel-5 Precursor/TROPOMI Methane Retrieval. https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/2476257/Sentinel-5P-TROPOMI-ATBD-Methane-retrieval.pdf

Copernicus Sentinel-5 Precursor. (2022b). Sentinel-5 Precursor/TROPOMI Ozone Profile Algorithm Theoretical Baseline Document. https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/2476257/Sentinel-5P-TROPOMI-ATBD-Ozone-Profile.pdf

Dinh Thi Hai Van, Oanh, N. T. K., & Yen, N. T. B. (2025). *A survey-based emission inventory of greenhouse gases released from rice production on consolidated land in the Red River Delta of Vietnam*. Atmosphere, 16(7), 794. https://doi.org/10.3390/atmos16070794

Filonchyk, M., Peterson, M. P., Zhang, L., Hurynovich, V., & He, Y. (2024). Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO2, CH4, and N2O. *Science of The Total Environment*, 114048. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173359

Gålfalk, M., & Bastviken, D. (2018). Remote sensing of methane and nitrous oxide fluxes from waste incineration. *Waste Management*, 75, 319–323. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.031

Gao, Y., Han, Z., Li, Z., & Deng, X. (2025). Global grain crops non-CO_2 greenhouse gas emissions and mitigation potential integrating food security and climate change scenarios. *Resources, Conservation and Recycling*, 212, 108543. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108543

Hendrick, C. D., et al. (2023). Within-City Variation in Ambient Carbon Monoxide Concentrations. *Environmental Health Perspectives*, 131(5), 057009. https://doi.org/10.1289/EHP10889

Heydari, F. , Sharafi, S. & Mohammadi Ghaleni, M. (2023). The relationship between drought indicators and greenhouse gas emissions in Iran's agricultural sector. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 17(2), 261-275. (In persian) https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20087942.1402.17.2.6.2

Hodzic, A., & Madronich, S. (2018). Response of surface ozone over the continental United States to UV radiation declines from the expected recovery of stratospheric ozone. *npj Climate and Atmospheric Science*, 1(1), 45. https://doi.org/10.1038/s41612-018-0045-5

Karbasi, S. , Malakooti, H. , Rahnama, M. & Azadi, M. (2022). Study of CH4 column concentration on Iran: Application of GOSAT satellite observations and WRF-GHG numerical simulations. *Journal of Climate Research*, 1401(50), 1-22. (In persian)

Kashefi, K. , Nodle, T. , Goodarzvand-Chegini, F. , Zajakaniha, F. & Asghar Mahjoubi, A. (2019). Estimation of Greenhouse Gas Emissions in two Refineries of Hasheminejad and Fajr Jam and Providing Operational Solutions to Reduce Emissions. *Iranian Journal of Gas Engineering*, 5(2), 68-80. (In persian) https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.25885251.1397.5.2.6.1

Mirzai, M. , Gorji, M. , Moghiseh, E. , Asadi, H. & Razavi toosi, E. (2022). Sustainable soil management and its role in mitigating greenhouse emissions. *Land Management Journal*, 9(2), 187-204. (In persian) https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23456205.1400.9.2.1.0

Moradimajd, N. , Fallahghalhari, G. A. & Chatrenour, M. (2021). Modeling the amount of greenhouse gas emissions of gardens in Khuzestan province. *Journal of Natural Environment*, 73(4), 819-833. (In persian) https://doi.org/10.22059/jne.2021.302857.1987

Naturinda, E., Kemigyisha, F., Gidudu, A., Kabenge, I., Omia, E., & Aboth, J. (2025). Quantification

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.6.7]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.7]

of greenhouse gas emissions from livestock using remote sensing & artificial intelligence. *Artificial Intelligence in Geosciences*, 5, 100147. https://doi.org/10.1016/j.aiig.2025.100147

Park, H., Jeong, S., Sha, M. K., Lee, J., & Frey, M. M. (2024). Comparisons of greenhouse gas observation satellite performances over Seoul using a portable ground-based spectrometer. *Geophysical Research Letters*, 51(14), e2024GL109334. https://doi.org/10.1029/2024GL109334

Ramanathan, V., & Feng, Y. (2008). Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. *Atmospheric Environment*, 42(34), 834–840. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.063

Rezvani, M. , Pendar, M. & Vafaei, E. (2025). Evaluating factors affecting carbon dioxide emissions in Iran by emphasis on Economic Policy Uncertainty. *Management of Natural Ecosystems*, 3(4), 1-11. (In persian) https://doi.org/10.22034/emj.2024.714147

S5P-PAL. (2025). *Methane (CH_4) maps based on Sentinel-5P L2 products* [Data set]. Copernicus Data Space Ecosystem. Retrieved August 11, 2025, from https://maps.s5p-pal.com/ch4/

Sadovnikov, S. A., Yakovlev, S. V., Kravtsova, N. S., Romanovskii, O. A., & Tuzhilkin, D. A. (2024). Dual-channel infrared OPO lidar optical system for remote sensing of greenhouse gases in the atmosphere: Design and characteristics. *Sensors and Instrumentation*, 2024, 100307. https://doi.org/10.1016/j.sintl.2024.100307

Schneising, O., Burrows, J. P., Buchwitz, M., Reuter, M., Bovensmann, H., Notholt, J., & Franco, R. (2014). Remote sensing of atmospheric methane by SCIAMACHY on board ENVISAT: Methods and first results. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(15), 10653–10665. https://doi.org/10.5194/acp-14-10653-2014

Schütze, C., Lau, S., Reiche, N., Sauer, U., Borsdorf, H., & Dietrich, P. (2025). Ground-based remote sensing with open-path Fourier-transform infrared (OP-FTIR) spectroscopy for large-scale monitoring of greenhouse gases. *Sensors International*, 6, 100153. https://doi.org/10.1016/j.sintl.2025.100153

Shavrina, A. V., & Veles, A. A. (2004). Remote sensing of some greenhouse gases by Fourier-spectrometry in Kyiv. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 88(1), 345–350. https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2003.12.036

Tavakoli A. (2019). Decomposition and Analysis of Driving Forces of GHG Emissions and Emission Reduction Potentials in Iran. *QEER*; 15 (60), 77-105. (In Persian) http://iiesj.ir/article-1-985-fa.html.

Tavella, R. A., da Silva Júnior, F. M. R., Santos, M. A., Miraglia, S. G. E. K., & Pereira Filho, R. D. (2025). A Review of Air Pollution from Petroleum Refining and Petrochemical Industrial Complexes: Sources, *Key Pollutants, Health Impacts, and Challenges*. ChemEngineering, 9(1), Article 13. https://doi.org/10.3390/chemengineering9010013

Veefkind, J. P., Aben, I., McMullan, K., Förster, H., de Vries, J., Otter, G., ... & Levelt, P. F. (2012). TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment*, 120, 70–83. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027

Wan, K., Gampe, D., & Hajat, S. (2025). Disentangling the contributions of anthropogenic climate change, greenhouse gases, and aerosols to heat-related mortality in Great Britain: A climate change impact attribution study. *The Lancet Planetary Health*. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(25)00050-6

Wang, Q., Chen, J., & Zhang, Y. (2024). Ozone formation potential related to the release of volatile organic compounds (VOCs) and nitrogen oxide (NO_x) from a typical industrial park in the Pearl River Delta. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(1), 1–12. https://doi.org/10.1007/s11356-024-22000-0

Zheng, H., Feng, Y., Wang, Y., Gao, C., Xing, D., Li, Z., He, H., Liu, Q., Yin, Z., & Lin, X. (2025). Seasonal variations in greenhouse gas production in coastal sandy sediments. *Marine Pollution Bulletin*, 205, 118573. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118573

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.6.7]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.7]

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.6.7]

[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.7]