Journal of Geography and Planning
Online ISSN: 2717-3534 Print ISSN: 2008-8078
Homepage: https://geoplanning.tabrizu.ac.ir

Investigating the correlation of climatic and atmospheric elements affecting the temporal dispersion of methane (CH4) pollutant in Mazandaran Province

Ali Asghar Shirzad[1], **Ali Mohammad Khorshiddoost**[2✉], **Saeed Jahanbakhshas**[3]

1. PhD student in Climatology and Environmental Planning, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Iran. E-mail: a.shirzad@tabrizu.ac.ir
2. Corresponding Author, Professor, Department of Meteorology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Iran. E-mail: khorshid@tabrizu.ac.ir
3. Professor, Department of Meteorology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Iran. E-mail: s_jahan@tabrizu.ac.ir

Article Info

Article type
Research Article

Article history:
Received: 31 May 2025
Revised: 11 September 2025
Accepted: 14 September 2025
Published: 29 July 2026

Keywords:
Methane (CH_4),
Temporal distribution,
Climatic elements,
Statistical atmospheric correlation modeling,
Mazandaran Province

ABSTRACT

Mazandaran Province, due to its unique climatic conditions and extensive agricultural and industrial activities, is considered one of the potential hotspots for methane (CH_4) emissions in Iran. This study aims to examine the correlation between various atmospheric climatic elements—including temperature, relative humidity, wind speed and direction, precipitation, and air pressure—and the temporal distribution of methane pollution in the province. To achieve this, Sentinel-5P satellite data and meteorological observations from regional stations were collected and analyzed over the period from 2018 to 2024. Pearson correlation and multiple regression methods were employed to assess the relationships among variables. The linear trend analysis of methane concentrations from 2019 to 2024 across different cities in Mazandaran revealed a general upward trend in methane levels, indicating a gradual increase over time. The findings highlight that climatic factors such as aerosols, temperature, and solar radiation play a central role in the variation of atmospheric methane concentrations, whereas parameters like wind speed, atmospheric pressure, and heat flux exert relatively minor influences. Moreover, results from the multivariate regression analysis identified aerosols, longwave radiation, and wind as significant predictors of methane concentrations in the province. These insights can contribute to identifying spatial and temporal patterns of methane distribution and support the development of strategic management approaches aimed at reducing methane emissions in Mazandaran Province.

Cite this article: Asghar Shirzad, A., Mohammad Khorshiddoost, A., & Jahanbakhshas, S. (2026). Investigating the correlation of climatic and atmospheric elements affecting the temporal dispersion of methane (CH4) pollutant in Mazandaran Province. *Journal of Geography and Planning*, 30(97), 165-175 http//doi.org/10.22034/gp.2025.67467.3409

© The Author(s).
Publisher: University of Tabriz.
DOI: http//doi.org/10.22034/gp.2025.67467.3409

Introduction

Methane (CH_4), as the second most important greenhouse gas after carbon dioxide, plays a critical role in amplifying global warming. With a global warming potential nearly 28 times greater than that of carbon dioxide over a 100-year horizon, methane has increasingly attracted the attention of scientists and international organizations in recent decades. One of the key issues in analyzing methane variability is identifying the climatic factors that influence its concentration and spatio-temporal distribution. Climatic elements not only drive methane production in terrestrial and aquatic ecosystems but also strongly affect its transport, dispersion, and removal from the atmosphere. The Mazandaran Province in northern Iran, characterized by high humidity, dense vegetation cover, extensive agricultural lands, and intensive livestock activities, is a particularly sensitive region with respect to methane emissions. Despite these conditions, no comprehensive study has so far examined the combined impacts of both classical climatic variables—such as temperature, pressure, and humidity—and more advanced parameters, including shortwave and longwave radiation, surface albedo, and heat fluxes.

The main objective of this study is to investigate the degree of correlation between atmospheric methane concentrations and selected climatic elements in Mazandaran Province by integrating remote sensing observations and advanced statistical models. For this purpose, data from the Sentinel-5P TROPOMI sensor were retrieved for the period 2019–2023 to monitor methane variability. In parallel, meteorological and surface parameters including temperature, relative humidity, surface pressure, wind speed, solar radiation, heat fluxes, and surface albedo were obtained from the ECMWF ERA5 reanalysis database. The relationship between methane concentration and the climatic drivers was analyzed using Pearson's correlation coefficient as well as multiple regression models. The datasets were aggregated both on monthly and seasonal scales to capture short- and long-term variability patterns.

The results revealed that average methane concentration in Mazandaran showed an overall increasing trend during the study period, with the highest levels recorded in autumn and winter. Pearson correlation analysis indicated a significant negative relationship between methane concentration and air temperature, implying that higher temperatures tend to reduce methane accumulation in the atmosphere. Conversely, relative humidity and surface pressure exhibited significant positive correlations with methane. Wind speed acted as a major dispersive factor, displaying a strong negative correlation with methane levels. In addition, analysis of shortwave and longwave radiation showed that solar radiation accelerates photochemical processes that enhance methane oxidation, thereby reducing atmospheric concentrations. Surface albedo also showed notable correlations in areas with dense vegetation, reflecting the role of biogenic methane production in vegetated ecosystems.

The multiple regression analysis explained approximately 72% of the variability in methane concentration using the selected climatic factors. Relative humidity and surface pressure emerged as the strongest predictors of methane increase, while temperature and solar radiation were the most influential variables driving methane reduction. These findings highlight the complex and sometimes opposing interactions among climatic drivers that determine methane dynamics under Mazandaran's specific environmental conditions.

Beyond regional relevance, the study contributes to the broader understanding of how climatic elements regulate methane variability. The results emphasize the importance of combining satellite remote sensing observations with high-resolution meteorological data to provide accurate insights into greenhouse gas dynamics. From a policy perspective, the findings underscore the need for continuous monitoring systems that integrate atmospheric observations with climatic data, thereby offering a powerful tool for decision-making aimed at methane mitigation. Moreover, region-specific climate policies are required to address the distinct ecological and socio-economic characteristics of Mazandaran Province.

This study provides two major contributions. First, it is the first attempt to comprehensively evaluate the simultaneous effects of a wide range of climatic variables—including radiative and surface energy parameters—on methane variability in Mazandaran. Second, it demonstrates the value of integrating Sentinel-5P TROPOMI observations with ERA5 reanalysis datasets to achieve a multidimensional and more accurate assessment of methane behavior. Given the existing research gap, the outcomes of this study not only advance scientific knowledge but also provide practical insights for climate adaptation and mitigation strategies.

In conclusion, the findings confirm that methane variability in Mazandaran Province is highly dependent on climatic conditions, and any analysis or management of methane emissions that neglects these drivers would be incomplete. Future studies are recommended to extend this research by incorporating additional biophysical and socio-economic parameters, thereby establishing a comprehensive framework for monitoring and managing methane emissions at both local and national levels.

Keywords: Methane (CH_4), Temporal distribution, Climatic elements, Statistical atmospheric correlation modeling, Mazandaran Province.

جغرافیا و برنامه ریزی
شاپا چاپی: ۸۰۷۸-۲۰۰۸ شاپا الکترونیکی: ۳۵۳۴-۲۷۱۷
Homepage: https://geoplanning.tabrizu.ac.ir

بررسی میزان همبستگی عناصراقلیمی جوی مؤثر بر پراکندگی زمانی آلاینده متان (CH4) در استان مازندران

علی‌اصغر شیرزاد[۱]، علی محمد خورشیددوست[۲]✉، سعید جهانبخش اصل[۳]

۱. دانشجوی دکترا اقلیم شناسی و برنامه ریزی محیطی دانشکدهٔ برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، ایران. رایانامه: a.shirzad@tabrizu.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، استاد گروه آب وهواشناسی، دانشکدهٔ برنامه ریزی و علوم محیطی ، دانشگاه تبریز، ایران. رایانامه: khorshid@tabrizu.ac.ir
۳. استاد گروه آب وهواشناسی، دانشکدهٔ برنامه ریزی و علوم محیطی ، دانشگاه تبریز، ایران. رایانامه: s_jahan@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۳
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۰۷

کلیدواژه‌ها:
متان (CH4)،
پراکندگی زمانی،
عناصر اقلیمی،
مدل‌سازی آماری همبستگی جوی،
استان مازندران

چکیده

استان مازندران به دلیل ویژگی‌های خاص اقلیمی و فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی، از مناطق مستعد برای انتشار گاز متان (CH4) در کشور ایران محسوب می‌شود. هدف از این پژوهش، بررسی میزان همبستگی عناصر اقلیمی جوی شامل دما، رطوبت نسبی، سرعت و جهت باد، بارندگی و فشار هوا با پراکندگی زمانی آلاینده متان در این استان است. در این راستا، داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-5P و اطلاعات هواشناسی منطقه طی بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ جمع‌آوری و تحلیل گردید. روش‌های آماری همبستگی پیرسون و رگرسیون چندگانه جهت سنجش روابط بین متغیرها به کار گرفته شد. نتایج تحلیل روند گاز متان و همچنین تحلیل‌های آماری مبتنی بر مدل خطی (Linear Trend Model) در بازه زمانی مورد مطالعه برای شهرهای مختلف استان مازندران نشان‌دهنده روند صعودی در غلظت گاز متان در تمامی مناطق و افزایش تدریجی غلظت گاز متان در طی زمان است. نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که عناصر اقلیمی نظیر آئروسل‌ها، دما و تابش خورشید نقش اصلی را در افزایش یا کاهش غلظت گاز متان در جو ایفا می‌کنند، در حالی که پارامترهای دیگری مانند سرعت باد، فشار و شار حرارتی تأثیرات کم‌اهمیت‌تری دارند. همچنین نتیجه نهایی تحلیل رگرسیون چندمتغیره نشان داد که در میان متغیرهای اقلیمی بررسی‌شده، آئروسل‌ها، تابش موج بلند و باد به‌طور معناداری بر غلظت گاز متان در استان مازندران تأثیرگذار هستند. نتایج این پژوهش می‌تواند در شناسایی الگوهای زمانی و مکانی پراکندگی متان و تدوین راهکارهای مدیریتی برای کاهش انتشار این گاز در سطح استان مازندران نقش مؤثری ایفا نماید.

استناد: شیرزاد، علی‌اصغر؛ محمد خورشیددوست، علی و جهانبخش اصل، سعید (۱۴۰۵). بررسی میزان همبستگی عناصراقلیمی جوی مؤثر بر پراکندگی زمانی آلاینده متان (CH4) در استان مازندران. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۳۰ (۹۷)، ۱۶۵-۱۷۵.
http//doi.org/10.22034/gp.2025.67467.3409

ناشر: دانشگاه تبریز.
© نویسندگان.

مقدمه

گاز متان (CH_4) یکی از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای با پتانسیل گرمایش جهانی بسیار بالا محسوب می‌شود؛ به‌طوری‌که اثر آن در مقیاس زمانی بیست‌ساله حدود ۸۴ برابر دی‌اکسیدکربن (CO_2) برآورد شده است (گزارش هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم، ۲۰۲۱). گرچه غلظت متان در جو بسیار کمتر از دی‌اکسیدکربن است، اما نقش آن در تشدید اثر گلخانه‌ای، افزایش دمای زمین و تغییرات اقلیمی انکارناپذیر است.

منابع تولید متان شامل منابع طبیعی نظیر تالاب‌ها، مناطق مردابی، شالیزارها و همچنین منابع انسانی مانند فعالیت‌های دام‌پروری، کشاورزی، دفن زباله و صنایع نفت و گاز هستند (ساونوآ و همکاران[1]، ۲۰۲۰). از میان عوامل مؤثر بر انتشار و پراکندگی متان، شرایط اقلیمی نقشی اساسی ایفا می‌کنند. عناصر اقلیمی مانند دما، رطوبت نسبی، سرعت و جهت باد، فشار جو و بارش می‌توانند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم فرآیندهای تولید، انتقال، اکسیداسیون و ماندگاری متان در جو را تحت تأثیر قرار دهند. برای نمونه، افزایش دمای هوا سبب فعال‌تر شدن میکروارگانیسم‌های متانوژن در خاک‌های مرطوب و اشباع می‌شود و این فرآیند به تولید بیشتر متان در اکوسیستم‌های بی‌هوازی مانند تالاب‌ها و شالیزارهای غرقابی منجر می‌گردد (ژانگ و همکاران[2]، ۲۰۲۱). همچنین، رطوبت بالا نه‌تنها محیط مناسبی برای فعالیت‌های بی‌هوازی فراهم می‌کند، بلکه مانع از نفوذ اکسیژن به خاک شده و فرآیند اکسیداسیون متان را محدود می‌سازد. علاوه بر این، بارش‌های مکرر و سنگین به‌ویژه در مناطق کشاورزی آب‌بر مانند شالیزارها موجب افزایش ماندگاری آب در سطح خاک و ایجاد شرایط بی‌هوازی پایدارتر برای تولید متان می‌شوند. در مقابل، افزایش سرعت باد می‌تواند با پراکندگی متان در جو، غلظت سطحی آن را کاهش داده و از تجمع این گاز در نزدیکی منابع انتشار جلوگیری کند (ترنر و همکاران[3]، ۲۰۱۵).

استان مازندران به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص در شمال ایران و مجاورت با دریای خزر، برخورداری از منابع آبی فراوان، پوشش گیاهی انبوه و اقلیم مرطوب خزری، یکی از حساس‌ترین مناطق کشور در زمینه تولید و پراکندگی گاز متان به‌شمار می‌آید. ازجمله مناطق دارای پتانسیل بالای تولید متان در این استان می‌توان به شالیزارهای وسیع شهرستان‌های میانی و شرقی اشاره کرد که بخش عمده‌ای از زمین‌های زراعی استان را تشکیل می‌دهند. همچنین تالاب میانکاله، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین زیست‌بوم‌های تالابی ایران، با ویژگی‌های بی‌هوازی خود منبع قابل‌توجهی از انتشار متان محسوب می‌شود. در کنار این موارد، دامداری‌های نیمه‌صنعتی و سنتی، مراکز دفن زباله در اطراف شهرهای بزرگ و صنایع کوچک غذایی نیز از منابع انسانی مؤثر در تولید متان در استان هستند.

با وجود اهمیت بالای متان در مطالعات اقلیم‌شناسی، بررسی هم‌زمان تأثیر عناصر اقلیمی بر پراکندگی این گاز در سطح استانی و با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بیشتر پژوهش‌های گذشته بر منابع انتشار یا پایش غلظت متان متمرکز بوده‌اند، در حالی‌که رابطه‌ی میان عناصر اقلیمی و رفتار زمانی این گاز، به‌ویژه در اقلیم مرطوب خزری ایران، کمتر به‌صورت کمی و آماری تحلیل شده است. بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ علمی و با تکیه بر داده‌های ترکیبی ماهواره‌ای و اقلیمی و تحلیل‌های آماری انجام شده است.

برای دستیابی به این هدف، داده‌های ماهواره‌ای مربوط به غلظت متان از سنجنده‌ی (TROPOMI) متعلق به ماهواره‌ی (Sentinel-5P) و داده‌های اقلیمی استخراج‌شده از مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت جوی (ECMWF) در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه، با بهره‌گیری از روش‌های آماری همچون آزمون همبستگی پیرسون و رگرسیون چندگانه، روابط میان متغیرهای اقلیمی و تغییرات غلظت متان تحلیل و ارزیابی شد. نتایج این تحلیل‌ها می‌توانند در تدوین راهبردهای مدیریت انتشار گازهای گلخانه‌ای در مقیاس محلی و منطقه‌ای مؤثر واقع شوند.

1. Saunois et al, 2020
2. Zhang et al, 2021
3. Turner et al

پیشینه تحقیق

گاز متان (CH_4) به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین گازهای گلخانه‌ای با پتانسیل گرمایش جهانی بیش از ۲۵ برابر دی‌اکسیدکربن (گزارش هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم، ۲۰۲۱) در دهه‌های اخیر به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. این گاز علاوه بر نقش مؤثر در تغییر اقلیم، از منابع متنوعی همچون استخراج و مصرف سوخت‌های فسیلی، فعالیت‌های کشاورزی و دامداری، تالاب‌ها و فرآیندهای هیدرولوژیکی ناشی می‌شود (پنگ و همکاران[1]، ۲۰۲۳).

در سطح جهانی، مطالعات متعددی به بررسی الگوهای مکانی ـ زمانی انتشار متان پرداخته‌اند. برای نمونه، هان و همکاران[2] (۲۰۲۴الف) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای موفق به شناسایی نقاط داغ بی‌سابقه متان در مراکز عمده تولید زغال‌سنگ چین شدند. همچنین هان و همکاران (۲۰۲۴ب) مجموعه داده‌ای جامع از تمرکز و انتشار متان در شمال چین فراهم کردند که بستر مناسبی برای مدل‌سازی‌های پیشرفته ایجاد نمود. پژوهش کانگ و همکاران[3] (۲۰۲۴) نشان داد که استان شانشی سهم قابل توجهی در انتشار متان مرتبط با فعالیت‌های معدنی دارد و داده‌های ماهواره‌ی «گائوفن–۵» ابزاری کارآمد برای پایش این منابع محسوب می‌شود. در همین راستا، پنگ و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور، انتشار متان ناشی از معادن زغال‌سنگ در شانشی را با دقت بالا کمی‌سازی کردند.

بررسی‌های میدانی نیز اهمیت بسزایی در شناسایی منابع متان داشته‌اند. مطالعه‌ی چین و همکاران[4] (۲۰۲۴) با بهره‌گیری از روش جریان گردابه‌ای نشان داد که میزان انتشار از برخی معادن منفرد زغال‌سنگ به‌طور قابل توجهی کمتر از برآوردهای موجود گزارش شده و منابع پنهان وجود دارند. از سوی دیگر، لیانگ و همکاران[5] (۲۰۲۳) با ترکیب داده‌های ماهواره‌ای GOSAT و TROPOMI توانستند تصویری دقیق‌تر از انتشار متان در شرق آسیا ترسیم کنند.

علاوه بر منابع معدنی، تغییرات اقلیمی نیز به‌طور مستقیم بر نوسانات غلظت متان تأثیرگذارند. بررسی‌های انجام‌شده در فلات تبت طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ نشان داد که تغییرات دما و بارش رابطه مستقیمی با الگوهای متان دارند (یانگ و همکاران[6]، ۲۰۲۳). همچنین یک مطالعه مبتنی بر یادگیری ماشین در چین نشان داد که عوامل اقلیمی از جمله دما، رطوبت و بارش سهم قابل توجهی در تغییرات تمرکز متان در مناطق شهری داشته‌اند (هو و همکاران[7]، ۲۰۲۴؛ لیجینگ[8]، ۲۰۲۳).

در مقیاس بین‌المللی، سیاست‌های کنترلی و راهکارهای کاهشی نیز مطرح شده‌اند. برای نمونه، اتحادیه‌ی اروپا در گزارشی با عنوان «انتشار متان در اتحادیه‌ی اروپا» (۲۰۲۳) بر ضرورت اقدام فوری در کاهش انتشار متان تأکید کرده است. همچنین لیو و همکاران[9] (۲۰۲۴) نشان دادند که تعطیلی اولویت‌بندی‌شده معادن پرگاز می‌تواند به‌طور قابل توجهی از انتشار متان بکاهد. از سوی دیگر، نوآوری‌های فناورانه مانند مدل «هوش مصنوعی مکانی» (GeoAI) نیز در بهبود تخمین و پیش‌بینی مکانی ـ زمانی غلظت متان نقشی مؤثر ایفا کرده‌اند (چنگ و همکاران[10]، ۲۰۲۵)

با وجود این مطالعات، هنوز شکاف‌هایی در پژوهش‌های مرتبط وجود دارد. در ایران، به‌ویژه در استان مازندران، ویژگی‌های اقلیمی خاص همچون رطوبت بالا، پوشش گیاهی متراکم و گستردگی فعالیت‌های کشاورزی و دامداری می‌تواند موجب بروز الگوهای خاصی از انتشار متان شود. با این حال، تاکنون مطالعه‌ای جامع که تأثیر هم‌زمان متغیرهایی مانند تابش کوتاه‌مدت و

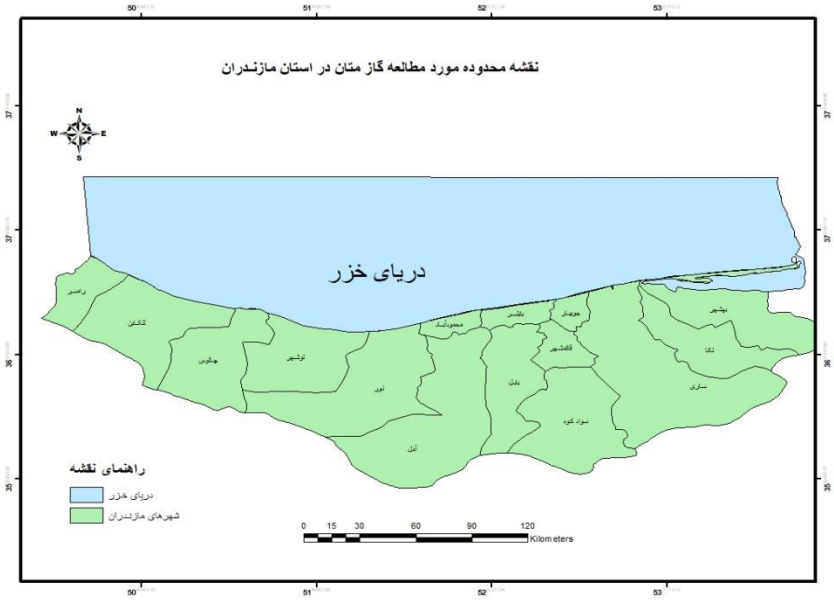
1. Peng et al
2. Han
3. Kang
4. Qin
5. Liang
6. Yang
7. hu
8. Linjing
9. Liu
10. Chang

بلندمدت، آلبیدو سطحی و شارهای حرارتی را در کنار عناصر کلاسیک همچون دما و رطوبت بررسی کند، صورت نگرفته است. این خلأ پژوهشی، ضرورت انجام مطالعه‌ای هدفمند برای تحلیل اثرات ترکیبی این عوامل بر تغییرات زمانی و مکانی متان در استان مازندران را برجسته می‌سازد.

روش پژوهش

استان مازندران با مختصات جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی، به دلیل برخورداری از پوشش گیاهی انبوه، رطوبت بالا، وجود تالاب‌ها و جنگل‌ها، و همچنین فعالیت‌های گسترده کشاورزی، یکی از مناطق حساس کشور از نظر انتشار گاز متان به شمار می‌آید. به منظور بررسی تغییرات زمانی غلظت متان و تحلیل اثرگذاری عناصر اقلیمی، در این پژوهش از داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های بازتحلیل استفاده شد. داده‌های مربوط به غلظت گاز متان از محصول (TROPOMI) واقع بر سنجنده (Sentinel-5P) با قدرت تفکیک مکانی اسمی ۷ در ۷ کیلومتر از پایگاه داده کوپرنیکوس برای بازه زمانی ژانویه ۲۰۱۸ تا دسامبر ۲۰۲۴ دریافت گردید (آژانس فضایی اروپا، ۲۰۲۴). با توجه به تنوع اقلیمی استان مازندران، برای افزایش دقت مکانی تحلیل، ابتدا میانگین‌گیری مکانی داده‌ها به‌صورت وزنی در سطح شهرستان‌ها و سپس در سطح کل استان انجام گرفت. این فرآیند امکان بررسی دقیق‌تر تفاوت‌های درون‌استانی را فراهم ساخت. همچنین، متغیرهای اقلیمی شامل دمای دو متری، رطوبت نسبی، فشار سطحی، بارش تجمعی، تابش موج کوتاه و موج بلند، ضریب بازتاب سطحی (آلبیدو)، شار حرارتی سطحی و مؤلفه‌های افقی باد، از داده‌های (ERA5 و ERA5-Land) متعلق به مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت جوی استخراج شدند (هرسباخ و همکاران[1]، ۲۰۲۰). تمامی داده‌ها به بازه زمانی ماهانه تبدیل و در قالب ماتریس‌های زمانی و مکانی هم‌راستا گردیدند. در مرحله پیش‌پردازش داده‌ها، مقادیر پرت با استفاده از «ضریب بین چارکی[2]» حذف و داده‌های گمشده با روش «میانگین‌گیری متحرک» جایگزین شدند. به‌منظور بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها، از آزمون «شاپیرو–ویلک» استفاده گردید. برای تحلیل روابط بین غلظت متان و متغیرهای اقلیمی، «ضریب همبستگی پیرسون» به‌کار گرفته شد. همچنین، به‌منظور بررسی هم‌خطی بین متغیرهای مستقل، «شاخص تورم واریانس[3]» و ماتریس همبستگی جفتی مورد استفاده قرار گرفت. متغیرهایی با مقدار VIF بالاتر از ۵ حذف یا ترکیب شدند تا از بروز هم‌خطی چندگانه جلوگیری شود (مونتگمری و همکاران[4]، ۲۰۱۲). در ادامه، برای مدل‌سازی اثر هم‌زمان متغیرهای اقلیمی بر غلظت متان، از تحلیل «رگرسیون چندگانه» به روش گام‌به‌گام استفاده شد. تمامی مفروضات رگرسیون شامل نرمال بودن باقیمانده‌ها، استقلال مشاهدات (بر اساس آزمون دوربین–واتسون) و همگنی واریانس‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، برای تحلیل روند تغییرات زمانی غلظت متان و متغیرهای اقلیمی، از «آزمون من–کندال» به‌عنوان یک روش ناپارامتری برای شناسایی روند و از «تخمین‌گر شیب سن» برای برآورد نرخ تغییر استفاده شد (حامد[5]، ۲۰۰۸). این آزمون‌ها به‌ویژه برای داده‌های طولی اقلیمی که نرمال نیستند، بسیار کاربردی و معتبر به شمار می‌آیند.

1. Hersbach
2. IQR
3. VIF
4. Montgomery
5. Hamed

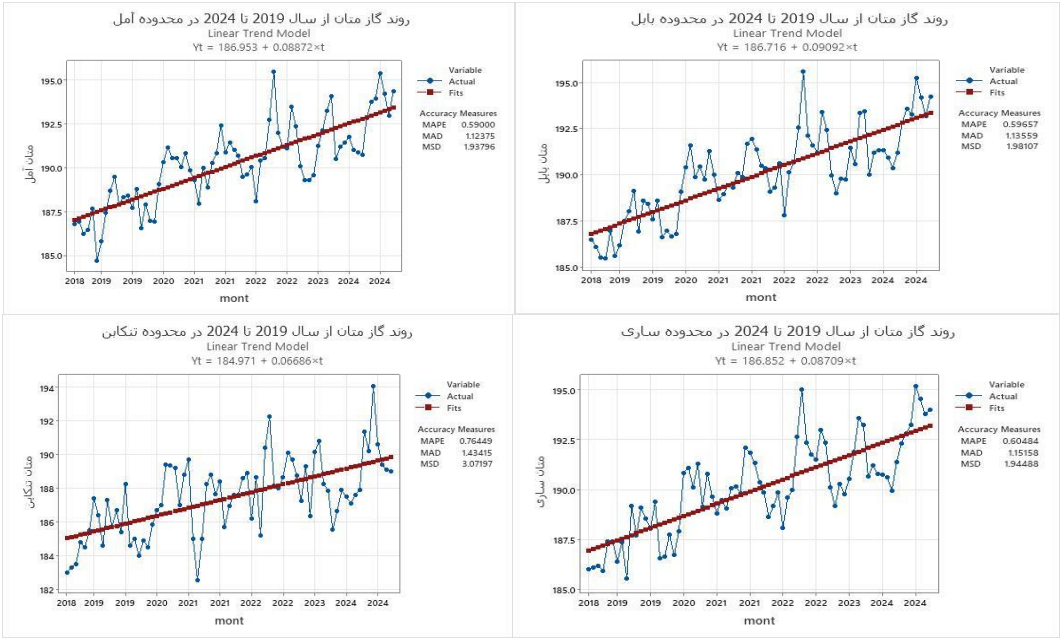


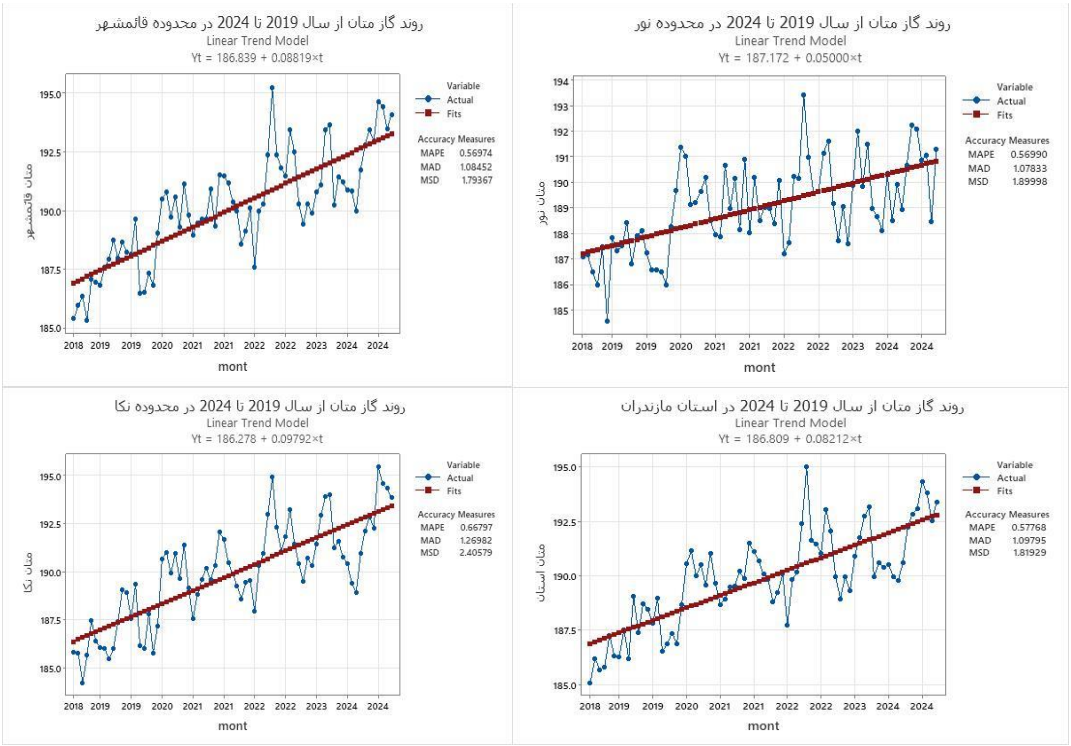
شکل ۱. نقشه محدوده مورد مطالعه

منبع: یافته‌های نگارنده، ۱۴۰۳

نتایج

در این مطالعه، روند تغییرات غلظت گاز متان (CH_4) در استان مازندران طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور و پلتفرم Google Earth Engine بررسی شد. تحلیل‌ها در قالب هشت زیرناحیه مطالعاتی انجام شده و نتایج روند زمانی غلظت متان به صورت نمودار در شکل ۲ ارائه شده است.





شکل ۲. روند تغییرات گاز متان در شهرهای استان ماندران طی سالهای ۲۰۱۸ الی ۲۰۲٤

منبع: یافته‌های نگارنده، ۱۴۰۳

نتایج تحلیل روند خطی نشان‌دهنده افزایش معنی‌دار و پیوسته غلظت متان در تمامی مناطق مطالعه بود. شیب‌های مدل در بازه ۰/۰۵ تا ۰/۱۰ قرار داشت که نمایانگر افزایش آرام اما مستمر منابع تولید متان در استان است. این روند صعودی می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی از جمله رشد جمعیت، گسترش مناطق شهری، افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی و فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی باشد که در مطالعات جهانی نیز به عنوان عوامل مؤثر شناخته شده‌اند (سانویس و همکاران[1]، ۲۰۲۰). از نظر مکانی، مناطقی مانند نکا و بابل بیشترین نرخ رشد را داشتند که می‌تواند به دلیل وجود نیروگاه نکا، تراکم جمعیت بالا در شهر بابل، عدم مدیریت مناسب پسماند و فعالیت‌های کشاورزی با تولید متان مرتبط باشد. شاخص‌های دقت مدل مانند MAPE، MAD و MSD در محدوده قابل قبول قرار داشتند که کیفیت برازش مدل را تأیید می‌کنند.

ارتباط گاز متان با عناصر اقلیمی

برای ارزیابی ارتباط میان غلظت متان و متغیرهای اقلیمی، آزمون همبستگی پیرسون به کار گرفته شد. نتایج این آزمون در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱. ارتباط عناصر جوی و گاز متان در استان مازندران

عناصر اقلیمی	ضریب همبستگی با CH_4	نوع همبستگی
آئروسل	+٪۴۴٫۷	مثبت
تابش موج کوتاه	+٪۲۷٫۱	مثبت
شار حرارتی	−٪۰٫۰۹۰	منفی ضعیف
دمای سطح زمین (۲ متر)	+٪۳۲٫۵	مثبت

1. Saunois

عناصر اقلیمی	ضریب همبستگی با CH_4	نوع همبستگی
تابش موج بلند	−٪۵۱,۶	منفی معنادار
بارش	−٪۱۷,۲	منفی
آلبیدو	−٪۴۴	منفی معنادار
سرعت باد	−٪۲۰,۳	منفی
فشار جو	+٪۰,۰۸۱	بسیار ضعیف

تحلیل دقیق‌تر نشان می‌دهد:

عناصر با همبستگی مثبت و اثر افزایشی: آئروسل‌ها با ضریب همبستگی ۰/۴۴۷ ارتباط مثبت و قابل توجهی با غلظت متان دارند که می‌تواند نشان‌دهنده نقش آئروسل‌ها در تسهیل انتشار و ماندگاری متان باشد. تابش موج کوتاه و دمای سطح زمین نیز با همبستگی مثبت، احتمالاً از طریق افزایش فعالیت‌های بیولوژیکی و واکنش‌های شیمیایی در سطح زمین باعث افزایش متان می‌شوند (سیاس و همکاران[1]، ۲۰۱۳).

عناصر با همبستگی منفی و اثر کاهشی: تابش موج بلند (۰/۵۱۶−) و آلبیدو (۰/۴۴−) ارتباط معناداری با کاهش غلظت متان دارند که احتمالاً به دلیل کاهش دما و تغییر در فرآیندهای انتشار متان است. همچنین بارش و سرعت باد نیز اثر کاهشی بر غلظت دارند که می‌تواند ناشی از شست‌وشوی جوی و پراکندگی متان باشد. متغیرهای با اثر ناچیز: شار حرارتی، فشار جو و برخی دیگر از متغیرها اثر آماری معناداری نداشتند.

تحلیل رگرسیون چندمتغیره

در مدل رگرسیون چندمتغیره، غلظت متان به عنوان متغیر وابسته و متغیرهای اقلیمی به عنوان متغیرهای مستقل وارد شدند. نتایج کلی مدل و متغیرهای معنادار در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است:

جدول ۲. خلاصه نتایج مدل رگرسیون

شاخص	مقدار
ضریب تعیین (R^2)	۰/۵۳۴
ضریب تعیین تعدیل‌شده	۰/۴۵۹
سطح معنی‌داری کلی مدل(P-Value)	$۲/۴۷\times۱۰^{-۷}$
تعداد مشاهدات	۷۳
آماره دوربین– واتسون[2]	۰/۹۵۵

یافته‌های نگارنده، ۱۴۰۳

جدول ۳. متغیرهای معنادار (سطح اطمینان ۹۵٪)

متغیر	ضریب (β)	مقدارP	تفسیر علمی
آئروسل	+۰/۷۸۱	۰/۰۰۲	ارتباط معنادار افزایش غلظت آئروسل‌ها با افزایش غلظت متان
موج بلند	−۱/۲۵	۰/۰۰۲	همبستگی منفی معنادار؛ تابش موج بلند با کاهش غلظت متان
سرعت باد	−۳۱/۷۰	۰/۰۳۵	ارتباط افزایش سرعت باد با پراکندگی متان و کاهش غلظت

متغیرهای تابش موج کوتاه، شار حرارتی، دما، بارش، آلبیدو، دمای ۲ متری و فشار جو تأثیر معنادار آماری نشان ندادند. افزایش تدریجی غلظت گاز متان در استان مازندران طی سال‌های اخیر، به ویژه در مناطق پرجمعیت و صنعتی، زنگ هشداری

1. Ciais
2. Durbin-Watson

برای برنامه‌ریزی‌های زیست‌محیطی و کنترل آلودگی هوا است. یافته‌ها نشان می‌دهد که عوامل اقلیمی مانند آئروسل‌ها، دمای سطح زمین و تابش خورشید نقش اصلی در افزایش یا کاهش غلظت متان دارند. استفاده از مدل‌های آماری چندمتغیره می‌تواند به پیش‌بینی بهتر تغییرات گازهای گلخانه‌ای و اتخاذ تدابیر موثرتر کمک کند.

بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه نوین که با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و ابزار قدرتمند سامانه گوگل ارث انجین همراه با مدل‌های رگرسیون چندمتغیره انجام شد، مشخص گردید که تغییرات غلظت گاز متان (CH_4) در استان مازندران ارتباط معناداری با برخی پارامترهای اقلیمی نظیر آئروسل‌ها، تابش موج بلند و سرعت باد دارد. این سه متغیر به‌تنهایی بیش از ۵۳ درصد از تغییرات غلظت متان را توضیح دادند که نشان‌دهنده نقش برجسته شرایط اقلیمی در فرآیندهای انتشار این گاز گلخانه‌ای است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش غلظت ذرات معلق جوی (آئروسل‌ها) به‌طور مستقیم با افزایش انتشار متان مرتبط است؛ چراکه این ذرات با تشدید شرایط گرمایی سطح زمین، فعالیت میکروبی تولیدکننده متان در محیط‌های مرطوب و اراضی کشاورزی را تسهیل می‌کنند. همچنین، تابش موج بلند با رابطه‌ای منفی و معنادار به کاهش انتشار متان کمک می‌کند که این امر می‌تواند ناشی از بازتاب حرارتی سطح زمین و محدودیت در فعالیت میکروارگانیسم‌های تولیدکننده متان باشد. علاوه بر این، سرعت باد از طریق افزایش پراکندگی متان، مانع انباشت این گاز در لایه‌های پایینی جو می‌شود؛ پدیده‌ای که در مناطق بادخیز شمال کشور اهمیت ویژه‌ای دارد. این یافته‌ها با گزارش هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC, 2021) و مطالعات سونا و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت کامل داشته و بر نقش ترکیبی عوامل اقلیمی و انسانی در افزایش انتشار متان تأکید می‌کند. همچنین، نتایج پژوهش‌های اخیر(ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲؛ ژاو و همکاران، ۲۰۲۳) نشان داده است که افزایش فعالیت‌های انسانی، تغییر کاربری اراضی و گسترش زیرساخت‌ها از عوامل اصلی افزایش انتشار متان در مناطق نیمه‌مرطوب هستند؛ موضوعی که با نتایج این تحقیق نیز همخوانی دارد. با وجود این، مطالعه حاضر محدودیت‌هایی دارد. نخست، عدم درنظرگرفتن متغیرهایی همچون پوشش گیاهی و تغییرات کاربری اراضی در مدل رگرسیونی که در مطالعات پیشین نقش مهمی در انتشار متان ایفا کرده‌اند، می‌تواند دقت پیش‌بینی‌ها را کاهش دهد. همچنین، دقت و تفکیک‌پذیری داده‌های ماهواره‌ای، علی‌رغم توانمندی‌های گوگل ارث انجین، محدودیت‌هایی دارد که به‌ویژه در مناطق ابری و با شرایط محلی پیچیده می‌تواند بر تفسیر نتایج اثرگذار باشد. افزون بر این، خودهمبستگی زمانی داده‌ها و فرضیات رگرسیون چندمتغیره نیازمند بررسی و تحلیل‌های دقیق‌تر آماری است. یکی از نقاط قوت این پژوهش، استفاده از گوگل ارث انجین بود که امکان پردازش حجم عظیمی از داده‌های سنجش‌ازدور را به‌صورت کارآمد و در بازه زمانی بلندمدت فراهم آورد. این پلتفرم با قابلیت‌های پیشرفته در تحلیل داده‌های ماهواره‌ای، ابزاری ارزشمند در پایش تغییرات اقلیمی و زیست‌محیطی محسوب می‌شود. با این حال، برای ارتقای دقت و قابلیت پیش‌بینی، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده از ترکیب داده‌های چندمنبعی (مولتی‌سنسوری) و الگوریتم‌های یادگیری ماشین استفاده شود. از منظر کاربردی، یافته‌های این پژوهش بر اهمیت توسعه برنامه‌های پایش ماهواره‌ای و زمینی گازهای گلخانه‌ای در استان‌های شمالی کشور تأکید دارد. همچنین، مدیریت منابع آلاینده نظیر آئروسل‌ها، اصلاح الگوهای کشاورزی، کنترل تغییرات کاربری اراضی و بهبود زیرساخت‌های شهری، می‌تواند از راهبردهای مهم در کاهش انتشار متان به شمار آید. در مطالعات آینده، بررسی جامع‌تر عواملی همچون پوشش گیاهی، کیفیت خاک و تأثیرات انسانی پیشنهاد می‌شود تا مدل‌های پیش‌بینی کامل‌تر و دقیق‌تری ارائه گردد. در نهایت، گسترش این نوع پژوهش‌ها به سایر استان‌های شمالی کشور مانند گیلان و گلستان و توسعه مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین و داده‌های چندمنبعی، می‌تواند نقشی کلیدی در برنامه‌ریزی‌های زیست‌محیطی و سیاست‌گذاری‌های مرتبط با کاهش آلودگی‌های جوی ایفا کند.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل رساله دکترا با عنوان «تحلیل و مدلسازی عناصراقلیمی مؤثر بر پراکندگی زمانی و مکانی آلاینده‌های هوا در استان مازندران» بوده که در سال ۱۴۰۱ مورد تصویب دانشگاه تبریز قرار گرفته است. بدینوسیله از کلیه دوستانی که در انجام این تحقیق ما را یاری نمودند، تشکر و قدردانی می‌نماییم.

منابع

حسینی، معصومه و رضایی، نادر (۱۳۹۹). نقش تابش و سرعت باد در تغییرات گاز متان در شمال کشور. *جغرافیا و توسعه*، ۱۸(۵۶)، ۶۱–۷۸.

حسینی، معصومه؛ رضایی، نادر و عباسی، شبنم (۱۳۹۹). تحلیل همبستگی گاز متان و پارامترهای اقلیمی با استفاده از داده‌های سنجش از دور (مطالعه موردی: شمال ایران). *نشریه علوم جغرافیایی ایران*، ۱۸(۴)، ۷۵–۹۰.

دانشیار، محمد؛ رضایی، نادر و محمدی، سمیه (۱۴۰۲). مدل‌سازی و پیش‌بینی آلاینده‌های شهری با استفاده از مدل‌های هوشمند در تبریز. *فصلنامه محیط‌شناسی*، ۴۹(۳)، ۲۴۵–۲۶۲.

دانشیار، محمد؛ محمدی، سمیه؛ کریمی، فائزه و رضایی، نادر (۱۴۰۲). کاربرد شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی در ارزیابی آلودگی هوای کلان‌شهر تبریز. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۴(۴)، ۲۱۵–۲۳۲.

صادقی‌فر، محمدرضا؛ اسلامی، ناصر و رسولی، محمد (۱۴۰۰). تحلیل خوشه‌ای الگوهای همدید مؤثر بر آلودگی هوا در کلان‌شهر تبریز. *اقلیم‌شناسی ایران*، ۱۵(۵۶)، ۸۹–۱۰۴.

صادقی‌فر، محمدرضا؛ اسلامی، ناصر؛ شفیعی، علی و رسولی، محمد (۱۴۰۰). شناسایی الگوهای همدید روزهای آلوده به ذرات معلق به روش واکاوی خوشه‌ای (مطالعه موردی: شهر تبریز). *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۲(۲)، ۲۳۹–۲۵۸.

نوریان، سارا؛ موسوی، محمد و احمدی، رحمان (۱۴۰۰). بررسی همبستگی آلاینده متان با عناصر هواشناسی در استان خوزستان. *پژوهش‌های جغرافیایی*، ۳۶(۴)، ۱۳۱–۱۴۸.

نوریان، سارا؛ موسوی، محمد و احمدی، رحمان (۱۴۰۰). تحلیل همبستگی گاز متان و عناصر جوی در استان خوزستان. *نشریه علوم محیطی ایران*، ۱۸(۲)، ۱۵۵–۱۶۸.

Ai, X., Hu, C., Yang, Y., Zhang, L., Liu, H., Zhang, J., ... & Xiao, W. (2024). Quantification of Central and Eastern China's atmospheric CH4 enhancement changes and its contributions based on machine learning approach. *journal of environmental sciences*, 138, 236-248.

Chang, H. T., Chern, Y. R., Asri, A. K., Liu, W. Y., Hsu, C. Y., Hsiao, T. C., ... & Wu, C. D. (2025). Innovating Taiwan's greenhouse gas estimation: A case study of atmospheric methane using GeoAI-Based ensemble mixed spatial prediction model. *Journal of Environmental Management*, 380, 125110.

ESA. (2024). *Sentinel-5P Pre-Operations Data Hub*. European Space Agency.

Gomez, C., White, J. C., & Wulder, M. A. (2016). Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 116, 55–72. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.008

Gorelick, N., et al. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Hamed, K. H. (2008). Trend detection in hydrologic data: The Mann–Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, 349, 350–363.

Han, G., Pei, Z., Shi, T., Mao, H., Li, S., Mao, F., Ma, X., Zhang, X., & Gong, W. (2024a). Unveiling unprecedented methane hotspots in China's leading coal production hub: A satellite mapping revelation. *Geophysical Research Letters*, 51, e2024GL109065. https://doi.org/10.1029/2024GL109065

Han, P., Zeng, N., Yao, B., Zhang, W., Quan, W., Wang, P., Wang, T., Zhou, M., Cai, Q., Zhang, Y., Liang, R., Sun, W., & Liu, S. (2024b). *Methane concentration and emissions data for the northern China*. *Zenodo*. https://doi.org/10.5281/zenodo.10957950

Hersbach, H., et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999–2049. https://doi.org/10.1002/qj.3803

International Energy Agency (IEA). (2025). Global Methane Tracker 2025.

IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press.

Johnson, M., & Lee, K. (2023). Operational Monitoring of Methane Emissions Using AI-Driven Analysis of Sentinel-2 and Landsat Satellite Data. *Journal of Environmental Monitoring*, 30(1), 45-59. https://doi.org/10.1016/j.jenvmon.2023.01.004

Kang, H., Qin, K., Fan, L., Wei, H., Qing, X., & Cohen, J. B. (2024). Methane point sources emission characteristics of coal industry in Shanxi Province based on Gaofen-5 satellite. *Journal of China Coal Society*, 49, 3960–3968.

Liang, R., Zhang, Y., Chen, W., Zhang, P., Liu, J., Chen, C., Mao, H., Shen, G., Qu, Z., Chen, Z., Zhou, M., Wang, P., Parker, R. J., Boesch, H., Lorente, A., Maasakkers, J. D., & Aben, I. (2023). East Asian methane emissions inferred from high-resolution inversions of GOSAT and TROPOMI observations: A comparative and evaluative analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 8039–8057. https://doi.org/10.5194/acp-23-8039-2023

Linjing, Z., Hui, L., Yutong, Z., Chong, W., Jinke, S., & Shanshan, L. (2025). Assessing the impact of natural factors on CH_4 concentrations in Chinese cities from 2009 to 2023. International Journal of Remote Sensing, 1-27.Ciais, P., et al. (2013). Climate change and the carbon cycle: An overview. *Annual Review of Environment and Resources*, 38, 29–57.

Liu, Q., Teng, F., Nielsen, C. P., Zhang, Y., & Wu, L. (2024). *Large methane mitigation potential through prioritized closure of gas-rich coal mines*. Nature Climate Change, 1–7.

Methane emissions in the EU: The key to immediate action on climate change. (2023).

Monteil, G., et al. (2021). Variability and trends in global atmospheric methane concentrations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(5), 3893–3928.

Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). *Introduction to linear regression analysis* (5th ed.). Wiley.

Mukaka, M. M. (2012). A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. *Malawi Medical Journal*, 24(3), 69–71. https://doi.org/10.4314/mmj.v24i3.84676

Naus, S., et al. (2021). Methane emissions and weather relationships: A satellite perspective. *Remote Sensing*, 13(4), 728.

OECD. (2024). Targeting methane emissions to mitigate the risk of climate overshoot. Retrieved from

Pandey, S., et al. (2022). Seasonal variations and meteorological influences on atmospheric methane. *Atmospheric Environment*, 270, 118894.

Peng, S., Giron, C., Liu, G., d'Aspremont, A., Benoit, A., Lauvaux, T., Lin, X., Rodrigues, H. A., Saunois, M., & Ciais, P. (2023). *High-resolution assessment of coal mining methane emissions by*

satellite in Shanxi, China. iScience, 26, 108375. https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.108375

Qin, K., Hu, W., He, Q., Lu, F., & Cohen, J. B. (2024). Individual coal mine methane emissions constrained by eddy covariance measurements: Low bias and missing sources. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24, 3009–3028. https://doi.org/10.5194/acp-24-3009-2024

Saunois, M., et al. (2020). The global methane budget 2000–2017. *Earth System Science Data*, 12(3), 1561–1623. https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020

Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3–4), 591–611.

Shi, J., et al. (2023). Atmospheric methane trends and influences in East Asia. *Environmental Research Letters*, 18(4), 045003.

Smith, J., Brown, A., & Green, P. (2021). Satellite-based Identification of Methane Emissions from Dairy Farms in Canada Using Sentinel-5P Data. *Remote Sensing of Environment*, 256, 112342. https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112342

Stanford Methane Initiative. (2023). *Accelerating Action on Methane*. Stanford University.

Stanford University. (2022). Rapid Increase in Methane Emissions Over the Past Five Years. *Environmental Science Reports*, 15(3), 123-134.

Turner, A. J., et al. (2015). A large increase in U.S. methane emissions over the past decade inferred from satellite data and surface observations. *Geophysical Research Letters, 42*(16), 6753–6760.

Wei, Y., Yang, X., Qiu, X., Wei, H., & Tang, C. (2023). *Spatio-temporal variations of atmospheric methane and its response to climate on the Tibetan Plateau from 2010 to 2022*. Atmospheric Environment, 314, 120088.

Yacovitch, T. I., Daube, C., & Herndon, S. C. (2020). Mobile methane emission detection: A comparison of field and laboratory measurements. *Atmospheric Measurement Techniques, 13*(6), 3417–3431.

Zhang, Y., Cao, S., Wu, S., & Wang, Y. (2021). Effects of climate variables on methane emissions: A global meta-analysis. *Environmental Research Letters*, 16(6), 064017.

Zhang, Y., et al. (2022). Climate and human impacts on methane emissions in East Asia. *Nature Communications*, 13, 2389. https://doi.org/10.1038/s41467-022-30132-0

Zhang, Y., Li, M., Shen, H., & Zhu, L. (2021). Monitoring methane emissions using satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 261, 112470.

Zhou, L., et al. (2023). Regional distribution of methane emissions and their driving factors in northern humid regions. *Atmospheric Environment*, 298, 119585