

## Original Research Paper

# Monitoring Methane Pollutant Concentration in the Industrial Provinces of Iran Through Satellite Observations

Fatemeh Kolaei and Ali Sam Khaniani\* 

Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

**ARTICLE INFO****ABSTRACT****Article History:**

Receive 07 August 2025

Revise 03 October 2025

Accept 11 October 2025

Available Online 12 October 2025

**Keywords:**

Methane pollutant

Rate of change

AIRS

Sentinel-5P


Spatial pattern

The analysis of methane emissions, which is the second most significant greenhouse gas after carbon dioxide, is of considerable importance. In this research, we used data from the AIRS sensor on NASA's Aqua satellite to examine the temporal variations of methane concentration across four selected industrial provinces from 2002 to 2024. Additionally, we utilized data from the TROPOMI instrument on the Sentinel-5P satellite to investigate the spatial distribution of methane concentrations during the period from 2019 to 2024. The outcomes of the monthly mean time series analysis indicated a consistent upward trend in methane levels. The lowest concentration was observed in September 2002, while the highest was recorded in September 2024. Among the provinces, Markazi exhibited the highest methane concentrations, with a monthly mean and standard deviation of  $1868.86 \pm 50.33$  ppb at 500 hPa, whereas Khorasan Razavi showed the lowest values at  $1858.19 \pm 49.69$  ppb. The non-parametric Mann-Kendall test confirmed a statistically significant upward trend in all provinces, thus rejecting the null hypothesis. Furthermore, the linear growth rate analysis revealed the most rapid increase in Isfahan ( $7.12$  ppb  $\text{yr}^{-1}$ ) and the slowest in Markazi ( $6.39$  ppb  $\text{yr}^{-1}$ ). In conclusion, by concentrating on major industrial centers and integrating long-term temporal datasets with high spatial resolution observations, this study provides a valuable scientific foundation for designing effective methane reduction strategies and improving environmental management policies at the national level.


\* Corresponding Author's E-mail: [ali.sam@nit.ac.ir](mailto:ali.sam@nit.ac.ir)**How to Cite this Article:**

F. Kolaei and A. Sam Khaniani, "Monitoring methane pollutant concentration in the industrial provinces of Iran through satellite observations," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 18, No. 3, pp. 38-50, 2025, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2025.1564>.

**COPYRIGHTS**

© 2025 by the authors. Published by ARI This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [The Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) 

# پایش غلظت آلاینده متان در استان‌های صنعتی ایران بر اساس مشاهدات ماهواره‌ای

فاطمه کلائی<sup>۱</sup> و علی سام‌خانیانی<sup>۲\*</sup> 

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۲- استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

## چکیده

## اطلاعات مقاله

مطالعه انتشار گاز متان، به‌عنوان دومین گاز گلخانه‌ای مهم پس از دی‌اکسیدکربن، اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش، با استفاده از داده‌های سنجنده AIRS ماهواره آکوا، روند تغییرات زمانی غلظت متان در چهار استان صنعتی منتخب طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ و با بهره‌گیری از داده‌های ابزار TROPOMI ماهواره Sentinel-5P، تغییرات مکانی غلظت متان در دوره ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ تحلیل شد. نتایج میانگین ماهانه سری‌های زمانی نشان داد که غلظت متان روندی افزایشی داشته است؛ کمترین مقدار در سپتامبر ۲۰۰۲ و بیشترین در سپتامبر ۲۰۲۴ ثبت شد. توزیع غلظت متان در استان مرکزی بالاتر از سایر استان‌ها بود و بیشترین میانگین ماهانه و انحراف معیار در این استان  $ppb$  (۱۸۵۸/۱۹±۴۹/۶۹) و کمترین آن در استان خراسان رضوی  $ppb$  (۱۸۶۸/۸۶±۵۰/۳۳) بود. ۵۰۰ هکتوپاسکال برآورد شد. آزمون من-کنندال روند افزایشی معناداری را در همه استان‌ها نشان داد و فرضیه صفر رد شد. نرخ رشد خطی نیز بیشترین افزایش را در استان اصفهان ( $ppb/yr$  ۷/۱۲) و کمترین را در استان مرکزی ( $ppb/yr$  ۶/۳۹) نشان داد. این تحقیق با تمرکز بر مراکز صنعتی و بهره‌گیری هم‌زمان از داده‌های بلندمدت و با وضوح مکانی بالا، می‌تواند مبنای علمی ارزشمندی برای تدوین سیاست‌های کاهش انتشار متان و بهبود مدیریت زیست‌محیطی کشور فراهم آورد.

## تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۶ مرداد ۱۴۰۴  
بازنگری ۱۱ مهر ۱۴۰۴  
پذیرش ۱۹ مهر ۱۴۰۴  
اولین انتشار ۲۰ مهر ۱۴۰۴

## واژه‌های کلیدی:

آلاینده متان  
نرخ تغییرات  
AIRS  
Sentinel-5P  
الگو مکانی

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [ali.sam@nit.ac.ir](mailto:ali.sam@nit.ac.ir)

## How to Cite this Article:

F. Kolaei and A. Sam Khaniani, "Monitoring methane pollutant concentration in the industrial provinces of Iran through satellite observations," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 18, No. 3, pp. 38-50, 2025, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2025.1564>.

## COPYRIGHTS

© 2025 by the authors. Published by ARI This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [The Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



## مقدمه

متان پس از دی اکسید کربن دومین عامل مهم در تغییرات آب و هوایی است که تقریباً ۲۰ درصد از سهم همه گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص می‌دهد. درک توزیع‌های مکانی و زمانی و روندهای بلندمدت مربوطه برای شناسایی منابع، فرورفتگی‌ها و تأثیرات بر اقلیم بسیار مهم است [۱].

گاز متان ۱۶ درصد (از نظر حجم) از کل انتشارات گازهای گلخانه‌ای ناشی از انسان در هر سال را تشکیل می‌دهد که موضوعی بسیار نگران‌کننده است. کاهش متان از منابع انسانی مانند تولید، حمل‌ونقل و سوخت‌های فسیلی به‌عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین استراتژی‌ها برای مهار گرمایش جهانی در آینده نزدیک است [۲]. تغییرات آب و هوایی ناشی از گرمایش جهانی یک نگرانی مهم است که عمیقاً بر رفاه کلی افراد تأثیر می‌گذارد. از طرفی دیگر، محدود کردن گرمایش زمین مستلزم کاهش فوری انتشار متان است [۳]. همچنین، متان یک گاز گلخانه‌ای قدرتمند است که از دوران پیش از صنعتی شدن ۰/۶ درجه سانتی‌گراد گرمایش جهانی را به‌همراه داشته است. این گاز به‌عنوان یکی از حیاتی‌ترین گازهای گلخانه‌ای، پتانسیل گرمایش جهانی ۲۵ تا ۳۴ برابر کربن‌دی‌اکسید دارد. همچنین متان با اکسیژن موجود در جو واکنش می‌دهد و آلایندگی آن را در سطح تشکیل می‌دهد که برای سلامت انسان بسیار مضر است [۴].

بخش اساسی هر استراتژی برای کاهش انتشار متان، توانایی اندازه‌گیری و نظارت دقیق بر میزان و مکان متان منتشرشده توسط بخش‌های مختلف است [۵]. پایش متان عمدتاً با فعالیت‌های نظارت بر زمین، نمونه‌برداری از هواپیما و ماهواره‌ای انجام می‌شود [۶]. در زمینه پایش متان بسیاری از کشورها استفاده از نظارت ماهواره‌ای را در صنایع مختلف تأیید کردند، اگرچه نظارت زمینی دقت نسبتاً بالایی دارد و دوره تشخیص نسبتاً طولانی را پوشش می‌دهد. با این حال، به دلیل تعداد نسبتاً کم ایستگاه‌های زمینی و توزیع ناهموار آن‌ها، دامنه نظارت زمینی محدود است.

در مقایسه با اندازه‌گیری‌های زمینی، مزیت اصلی اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای توانایی آن‌ها در ارائه پوشش جهانی است. از طرفی دیگر ماهواره‌ها مشاهدات جهانی با وضوح بالا از سطح و جو زمین تولید می‌کنند؛ بنابراین، پایش انتشار متان با استفاده از ماهواره‌ها می‌تواند دوره‌ای، مکرر و مکمل برای عملیات روی زمین باشد؛ از این رو ماهواره‌ها پتانسیل شناسایی منابع متناوب متان یا انتشار گازهای گلخانه‌ای منتشرشده در شرایط عملیاتی غیرعادی را دارند [۷].

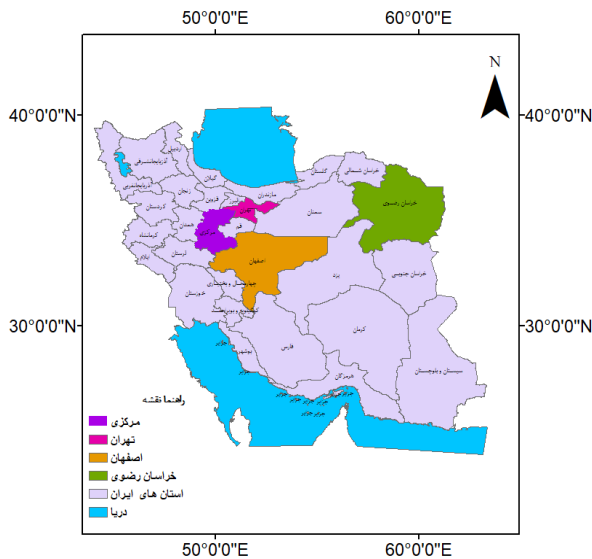
سنجنده ژرفاسنج مادون‌قرمز اتمسفر (AIRS) بر روی سیستم مشاهده زمین ناسا Aqua و ابزار نظارت بر تروپوسفر TROPOMI بر

روی ماهواره Sentinel-5 Precursor از جمله ماهواره‌هایی هستند که دارای داده رایگان برای مطالعه گاز متان می‌باشند. حسگر AIRS به‌صورت روزانه پروفیلی از گاز متان را در اختیار کاربران قرار می‌دهد. اگرچه رزولوشن مکانی آن زیاد نیست اما از لحاظ رزولوشن زمانی دارای پایگاه داده بلندمدت می‌باشد. درحالی‌که ابزار TROPOMI دارای رزولوشن بهتر نسبت به حسگر AIRS می‌باشد و به‌صورت روزانه کل متان موجود در ستونی از جو را ارائه می‌دهد.

با توجه به اهمیت گاز متان در جاهای مختلف دنیا به بررسی تغییرات مکانی و زمانی متان پرداختند. سیبیا و همکاران در سال ۲۰۲۴ به بررسی تغییرات فصلی و روند غلظت متان با استفاده از آزمون من-کندال در دو استان آفریقای جنوبی با استفاده از داده‌های Sentinel-5p برای دوره زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ پرداخت. تجزیه و تحلیل روند، روند افزایشی قابل توجهی را در غلظت متان در هر دو استان نشان داد که فرضیه صفر عدم روند را رد می‌کند [۸]. موسوی و همکاران در سال ۲۰۲۴ با استفاده از مدل‌های مکانی-زمانی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین به بررسی تغییرات متان در ایران طی بیست سال اخیر (۲۰۰۳-۲۰۲۲) پرداختند. داده‌های مورد استفاده از منابع ماهواره‌ای مختلف استخراج شد و هدف مطالعه شناسایی عوامل مؤثر بر تغییرات متان در کشور بود. نتایج نشان داد که نوسانات متان تحت تأثیر ترکیبی از عوامل اقلیمی (مانند دما و بارش) و انسانی (مانند فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی) قرار دارد [۹]. محمدی و همکاران ۲۰۲۳ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-5P تغییرات مکانی و زمانی متان را در شهر تهران بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که الگوهای فصلی و فضایی مشخصی در انتشار متان وجود دارد و بخش جنوبی تهران در مقایسه با دیگر مناطق دارای بالاترین میانگین غلظت متان است. علاوه بر این، یافته‌های آن‌ها وجود ابر متان در جنوب تهران را که پیش‌تر توسط ناسا گزارش شده بود، تأیید کرد [۱۰].

خو و همکاران در سال ۲۰۲۳ با استفاده از داده‌های AIRS به بررسی توزیع زمانی و مکانی غلظت ستون متان در تروپوسفر نزدیک به سطح زمین در منطقه یخ‌زدگی دائمی شمال شرق چین پرداخته‌اند. نتایج نشان داد میانگین غلظت ستون متان در ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال افزایش یافته است. همچنین نرخ رشد غلظت متان در بهار بیشترین و در تابستان کمترین است [۱۱]. عابد و هالوس در سال ۲۰۲۱ به بررسی تغییرات عمودی غلظت متان اتمسفری در شهرهای منتخب عراق بر اساس داده‌های AIRS در چهار سطح فشار استاندارد (۹۲۵، ۸۵۰، ۶۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال) از ژانویه ۲۰۰۳ تا سپتامبر ۲۰۱۶ پرداختند. نتایج نشان داد که میانگین ماهانه داده‌ها بین سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۱۶، به‌ویژه از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۶، افزایش قابل توجهی داشته است. همچنین تحلیل روند بلندمدت ماهانه متان

می‌کنند. همچنین دارای تنوع جغرافیایی، اقتصادی و جمعیتی قابل توجهی هستند. علاوه بر این، تراکم جمعیت در این استان‌ها بالا بوده و از جمله پرجمعیت‌ترین مناطق کشور محسوب می‌شوند. موقعیت جغرافیایی این استان‌ها در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱- موقعیت مکانی مناطق مورد مطالعه.

Fig. 1. The geographical placement of the study areas.

### مشاهدات متان سنجنده AIRS

داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در این مطالعه از حسگر AIRS به دست آمده است. حسگر AIRS در سال ۲۰۰۲ شروع به ارائه اطلاعات غلظت متان کرد. سنجنده AIRS یکی از شش ابزاری است که روی ماهواره Aqua که بخشی از سیستم رصد زمین ناسا است، قرار دارد. این حسگر شامل ۲۳۷۸ کانال و سه محدوده باند، مادون قرمز موج بلند (LWIR) (۸/۸ - ۱۵/۴ میکرومتر)، مادون قرمز موج متوسط (MWIR) (۸/۲۲ - ۶/۲۰ میکرومتر) و مادون قرمز موج کوتاه (SWIR) (۴/۶۱ - ۳/۷۴ میکرومتر) که باند تشخیص متان را در ۷/۶۶ میکرومتر پوشش می‌دهد. سنسور AIRS دو بار در روز به دور زمین می‌چرخد. داده‌های AIRS بر اساس ویژگی‌های فشار اتمسفر در ۲۴ سطح از ۱ hpa تا ۱۰۰۰ hpa طبقه‌بندی می‌شوند و بالاترین حساسیت ابزار AIRS در ارتفاعات ۲۰۰ ~ ۵۰۰ هکتوپاسکال در نیمکره شمالی به دست می‌آید [۱۶].

در این مطالعه از نسخه هفتم (V7) محصول میانگین ماهانه متان سطح ۳ (L3) بازیابی شده توسط حسگر AIRS در سطح ۵۰۰ hpa به دلیل حساسیت بالای سنجنده AIRS در این ارتفاع مورد استفاده قرار

در هر سطح (۹۲۵، ۸۵۰، ۶۰۰ و ۳۰۰) هکتوپاسکال، مقادیر مثبت با میانگین نرخ رشد برای هر سطح به ترتیب برابر با (۲/۹، ۳/۱، ۳/۶ و ۳/۹ درصد) را نشان می‌دهد [۱۲]. وو و همکاران در سال ۲۰۱۹ به تحلیل تغییرات مکانی و زمانی غلظت متان در اتمسفر چین بر اساس غلظت ماهانه متان بازیابی شده از AIRS پرداختند. نتایج نشان داد انتشار متان در سطح ملی از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲ حدود ۳۲/۲ درصد افزایش داشته است. همچنین مشخص شد که منابع طبیعی (مانند تالاب‌ها) و فعالیت‌های انسانی (مانند کشاورزی و صنعت) به طور مستقیم بر توزیع مکانی تأثیر دارند [۱۳].

مطالعات گذشته نشان داده‌اند که تغییرات متان در مناطق مختلف دنیا و ایران قابل توجه بوده است، با این حال هر یک از این پژوهش‌ها با محدودیت‌هایی همراه بوده‌اند. برخی پژوهش‌ها صرفاً به بازه‌های زمانی کوتاه مدت پرداخته‌اند [۸، ۱۰]، در حالی که مطالعات دیگر صرفاً روندهای کلی در مقیاس ملی یا منطقه‌ای را بررسی کرده‌اند [۱۱، ۱۳]. در ایران نیز بخش عمده‌ای از تحقیقات بر داده‌های Sentinel-5P با قدرت تفکیک مکانی بالا [۱۴، ۱۵] یا بر داده‌های بلندمدت ولی با وضوح مکانی پایین‌تر مانند GOSAT (۱۰×۱۰ کیلومتر) و SCIAMACHY (۳۰×۶۰ کیلومتر) متمرکز بوده‌اند [۹]. بنابراین تاکنون پژوهشی که به طور هم‌زمان داده‌های بلندمدت با پوشش زمانی گسترده (AIRS) و داده‌های با تفکیک مکانی بالا (Sentinel-5P) را برای تحلیل جامع تغییرات متان در ایران به کار گیرد، انجام نشده است. از این رو نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند با مطالعات پیشین مقایسه شود و میزان همخوانی آن با مطالعاتی با منابع مختلف بررسی شود.

در این تحقیق، تغییرات زمانی بلندمدت متان طی دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ با استفاده از داده‌های AIRS در سطح فشار ۵۰۰ هکتوپاسکال و تغییرات مکانی متان در دوره ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ با داده‌های Sentinel-5P به طور هم‌زمان در چهار استان صنعتی تحلیل خواهد شد. این رویکرد ترکیبی امکان ارائه تصویری جامع‌تر از روندهای بلندمدت و پراکنش مکانی متان را فراهم می‌سازد. انتخاب استان‌های صنعتی از این رو صورت گرفته که این مناطق به دلیل تراکم بالای فعالیت‌های انسانی و صنعتی از مهم‌ترین کانون‌های انتشار متان در کشور به شمار می‌آیند و مورد توجه نویسندگان قرار گرفته‌اند.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش شامل چهار استان اصفهان، مرکزی، تهران و خراسان رضوی است. این استان‌ها به عنوان قطب صنعتی کشور محسوب می‌شوند و نقشی کلیدی در تولید و توسعه اقتصادی ایران ایفا

نزولی یکنواخت در داده‌های سری زمانی به کار می‌رود [۱۸]. یکی از مهم‌ترین مزایای این آزمون، عدم نیاز به فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها است، که آن را به گزینه‌ای مناسب برای تحلیل انواع مختلف داده‌ها تبدیل می‌کند [۱۹]. این آزمون به‌طور گسترده در مطالعات اقلیمی، هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی برای بررسی تغییرات بلندمدت متغیرهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

در این روش ابتدا اختلاف بین هریک از مشاهدات با تمام مشاهدات پس از آن محاسبه می‌شود و پارامتر S مطابق معادله (۱) به دست می‌آید:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \operatorname{sgn}(X_j - X_k) \quad (1)$$

که n تعداد مشاهدات سری،  $X_j$  و  $X_k$  به ترتیب مقادیر داده‌های زام و k ام سری می‌باشند. تابع علامت  $\operatorname{sgn}$  نیز به صورت معادله (۲) محاسبه می‌شود:

$$\operatorname{sgn}(X_j - X_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } (X_j - X_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (X_j - X_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (X_j - X_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

مرحله بعد محاسبه واریانس S است که از طریق معادله (۳) محاسبه می‌شود:

$$\operatorname{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{k=1}^m t_k(t_k-1)(2t_k+5)}{18} \quad (3)$$

که m معرف تعداد دنباله‌هایی است که در آن‌ها حداقل یک داده تکراری وجود دارد. t نیز بیانگر فراوانی داده‌های با ارزش یکسان در یک دنباله (تعداد گره‌ها) است. در نهایت نیز آماره  $Z_S$  به کمک یکی از معادلات (۴) استخراج می‌شود:

$$Z_S = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

در صورتی که آماره  $Z_S$  مثبت باشد روند صعودی و در صورت منفی بودن آن روند نزولی در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از مقدار سطح اهمیت ( $\alpha$ )، سطح اهمیت روند تعیین می‌شود. با توجه به اینکه اگر p-value داده‌ها بالاتر از سطح معناداری باشد، می‌توان گفت که فرضیه صفر مورد قبول است و «هیچ روندی» وجود ندارد. فرضیه مقابل نشان خواهد داد که یک روند در سری وجود دارد. معمولاً این آزمون برای سطح معنادار ۹۵ و ۹۹ درصد به انجام می‌رسد. مقدار  $\alpha$  برای سطح ۹۵ درصد، برابر با ۰/۰۵ و برای

گرفت (URL: <https://disc.gsfc.nasa.gov/>). در این محدوده، دقت داده‌ها برای ردیابی تغییرات مکانی و زمانی متان بهینه است. همچنین، این سطح فشاری تأثیرات ناشی از ابرها و اختلالات سطحی را کاهش می‌دهد؛ که دارای رزولوشن مکانی  $1^\circ \times 1^\circ$  و رزولوشن زمانی ماهانه می‌باشد. در مجموع ۲۶۵ ماه از سپتامبر ۲۰۰۲ تا سپتامبر ۲۰۲۴ را پوشش می‌دهد.

## مشاهدات متان سنجنده TROPOMI

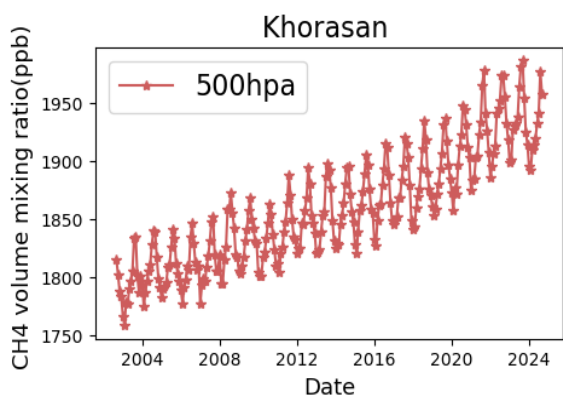
طیف‌سنج پیشرفته TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) است که به‌طور مشترک توسط هلند و آژانس فضایی اروپا (ESA) در سال ۲۰۱۷ طراحی شده است. این ابزار با عرض پوشش ۲۶۰۰ کیلومتر قادر است روزانه داده‌هایی را از کل سطح زمین جمع‌آوری کند، در حالی که وضوح فضایی بالای ۵.۵×۳.۵ کیلومتر مربع آن، امکان نظارت دقیق و مؤثر بر ترکیب جو را فراهم می‌سازد [۱۷]. این ویژگی‌ها باعث شده‌اند که S5P به یکی از مهم‌ترین ابزارهای پایش آلودگی هوا و تغییرات جوی تبدیل شود.

داده‌های ماهواره Sentinel-5 Precursor، از Google Earth Engine تهیه شده است. این ماهواره، به‌عنوان اولین عضو از خانواده Sentinel، نقش مهمی در نظارت بر ترکیب جو زمین ایفا می‌کند و کاربردهای گسترده‌ای در تحقیقات اقلیمی، ارزیابی کیفیت هوا و ردیابی لایه ازن دارد.

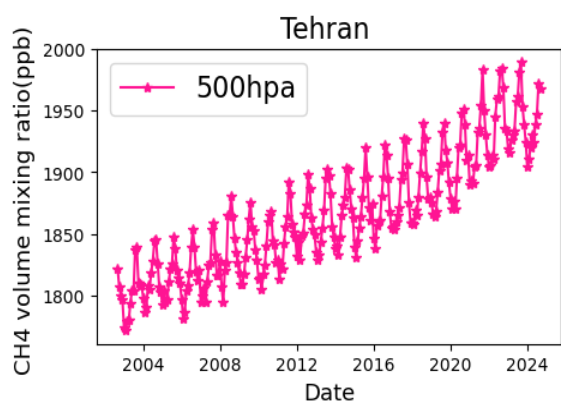
## روش کار

در این پژوهش از رگرسیون خطی بر روی داده‌های میانگین سالانه غلظت متان برای تعیین نرخ رشد خطی استفاده شده است. همچنین به‌منظور بررسی معنادار بودن و یا عدم معناداری روندها و نوع روند، آزمون من-کندال بر روی داده‌های میانگین ماهانه غلظت متان به کار گرفته شده است. سری زمانی میانگین ماهانه متان از طریق میانگین‌گیری سری‌های زمانی سنجنده AIRS در تمامی محدوده‌های هر یک از استان‌های صنعتی، به‌دست آمده است. برای این منظور، ابتدا هر استان به شبکه‌ای با گرید یک درجه‌ای تقسیم شد و برای هر گرید، چهار سری زمانی ماهانه (یک سری از هر گوشه گرید) از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ استخراج گردید. سپس میانگین تمام سری‌های موجود در تمامی گریدها محاسبه شد تا یک سری زمانی میانگین برای هر استان ایجاد شود. مقادیر متان نیز در  $10^9$  ضرب شدند تا به مقیاس ppb تبدیل شوند و داده‌های پرت که خارج از بازه  $\pm 35$  از میانگین بودند، حذف شدند.

آزمون روند من-کندال یک روش ناپارامتریک برای تحلیل روند در سری‌های زمانی است. این آزمون برای شناسایی روندهای صعودی یا



(C)



(D)

شکل ۲- سری زمانی میانگین ماهانه غلظت متان در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال در استان (الف) مرکزی (ب) اصفهان (پ) خراسان رضوی (ت) تهران از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴.

Fig. 2. Monthly average methane concentration time series at 500 hPa in the provinces of (a) Markazi (b) Isfahan (c) Khorasan Razavi (d) Tehran from the year 2002 to 2024.

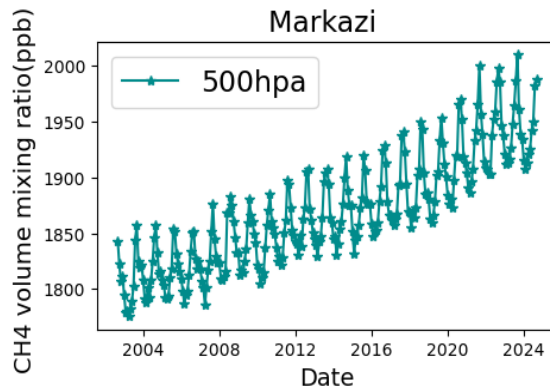
نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد، غلظت متان برای بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ در استان مرکزی بین ۱۷۷۵/۵۹ ppb تا ۲۰۱۲/۱۲ ppb با میانگین ماهانه و انحراف معیار (۱۸۶۸/۸۶±۵۰/۳۳) متغیر می‌باشد. همچنین غلظت متان در استان اصفهان بین ۱۷۷۳/۳۹ ppb تا ۲۰۰۴/۸۸ ppb با میانگین ماهانه و انحراف معیار (۱۸۶۸/۸۵±۵۲/۵۷) نوسان دارد. علاوه بر این غلظت متان در استان خراسان رضوی بین ۱۷۵۷/۹۳ ppb تا ۱۹۸۶/۲۹ ppb با میانگین ماهانه و انحراف معیار (۱۸۵۸/۱۹±۴۹/۶۹) قرار دارد. نتایج نشان می‌دهد غلظت متان در استان تهران بین ۱۷۷۱/۵۹ ppb تا ۱۹۸۹/۴۴ ppb با میانگین ماهانه و انحراف معیار (۱۸۶۵/۳۶±۴۹/۱۰) متغیر می‌باشد. بر اساس نتایج جدول ۱، بیشترین میانگین ماهانه و انحراف معیار متان در استان مرکزی ppb

سطح ۹۹ درصد برابر با ۰/۰۱ است. در سطح اطمینان ۹۵ درصد  $Z_S = 1/96$  در سطح اطمینان ۹۹ درصد  $Z_S = 2/58$  نظر گرفته می‌شود [۲۰].

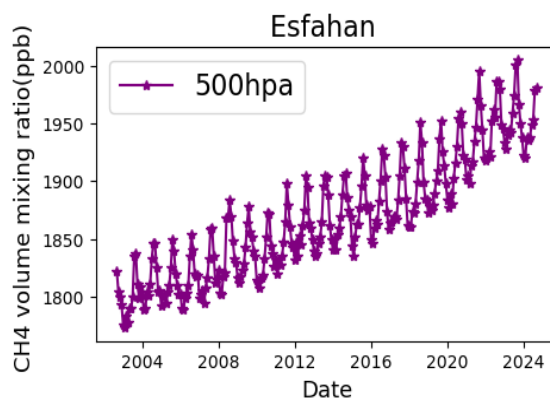
## بحث و نتایج

### تجزیه و تحلیل بلندمدت میانگین ماهانه متان

میانگین ماهانه غلظت متان در چهار استان در سطح فشاری ۵۰۰ هکتوپاسکال برای بازه زمانی سپتامبر ۲۰۰۲ تا سپتامبر ۲۰۲۴ بسته به شرایط آب و هوایی و توپوگرافی نوسانات ماهانه قابل توجهی را تجربه کرده است. میانگین ماهانه هر استان از طریق میانگین گیری مقادیر سنجنده AIRS در سرتاسر منطقه، به دست آمده است. در شکل ۲ توزیع میانگین ماهانه غلظت متان در چهار استان نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲ نتایج نشان می‌دهد، توزیع میانگین ماهانه متان افزایش تدریجی در طول زمان در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال داشته است. همچنین کمترین مقدار غلظت متان برای همه استان‌ها در سپتامبر سال ۲۰۰۲ و بیشترین آن در سپتامبر سال ۲۰۲۴ می‌باشد.



(A)



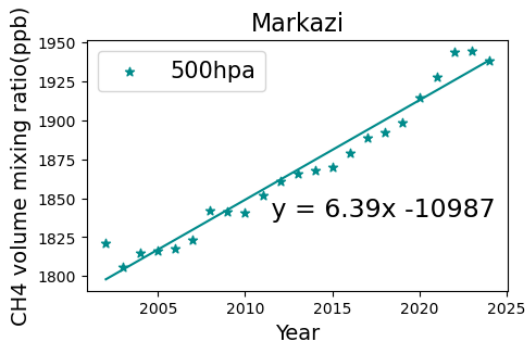
(B)

**جدول ۲-** نتایج آزمون من-کندال بر روی میانگین ماهانه غلظت متان برای دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴.

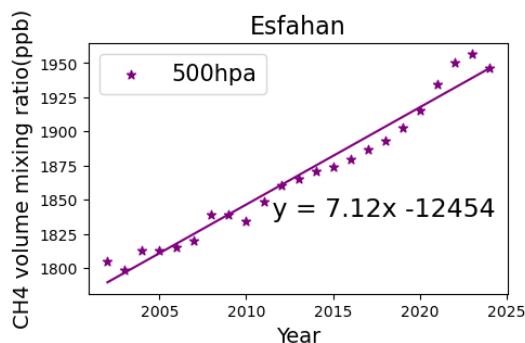
**Table 2.** Results of the Mann-Kendall test on the average monthly methane concentration for the period 2002 to 2024.

Province	Rate	Z <sub>S</sub>	p-value
Markazi	Incremental	16.24	0.0
Isfahan	Incremental	16.69	0.0
Khorasan Razavi	Incremental	16.94	0.0
Tehran	Incremental	17.75	0.0

برای مطالعه روند در داده‌های سالانه، تحلیل رگرسیون خطی بر روی میانگین سالانه غلظت متان در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال در طول دوره مورد مطالعه اعمال شد، با توجه به شکل ۳، در استان‌های مورد مطالعه توزیع میانگین سالانه غلظت گاز متان روندهای مثبت را نشان می‌دهد. به طوری که غلظت گاز متان با افزایش سال‌ها افزایش یافته است. همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد، نرخ رشد خطی سالانه در بازه ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ در استان مرکزی، اصفهان، خراسان رضوی و تهران در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال به ترتیب، ۶/۳۹ ppb/yr، ۷/۱۲ ppb/yr، ۶/۵۵ ppb/yr و ۶/۵۲ ppb/yr می‌باشد. با توجه به نتایج استان اصفهان دارای بیشترین نرخ رشد خطی و استان مرکزی دارای کمترین نرخ رشد خطی است.



(A)



(B)

کمترین آن در استان خراسان رضوی (۱۸۶۸/۸۶±۵۰/۳۳) و بیشترین آن در استان اصفهان (۱۸۵۸/۱۹±۴۹/۶۹) در ۵۰۰ هکتوپاسکال می‌باشد. استان اصفهان دارای دومین میانگین ماهانه و انحراف معیار پس از استان مرکزی است.

**جدول ۱-** مقادیر آماری غلظت متان، میانگین، حداکثر، حداقل و انحراف معیار در ۴ استان برای دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴.

**Table 1.** Statistical values on methane concentration, featuring mean, maximum, minimum, and standard deviation in four provinces during the period from 2002 to 2024.

Province	Mean (ppb)	Max (ppb)	Min (ppb)	SD (ppb)
Markazi	1868.86	2012.12	1775.59	50.33
Isfahan	1868.85	2004.88	1773.39	52.57
Khorasan Razavi	1858.19	1986.29	1757.93	49.69
Tehran	1865.36	1989.44	1771.59	49.10

همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شد، حداکثر غلظت متان در استان مرکزی با مقدار ۲۰۱۲/۱۲ ppb مشاهده می‌شود و پس از آن استان اصفهان با مقدار غلظت متان ۲۰۰۴/۸۸ ppb در رتبه دوم قرار دارد.

### تجزیه و تحلیل روندها بر روی میانگین ماهانه و نرخ رشد بر روی میانگین سالانه متان

آزمون من-کندال بر روی سری زمانی میانگین ماهانه غلظت متان در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال انجام شد. نتایج آزمون من-کندال روندهای قابل توجهی را در غلظت متان برای هر چهار استان نشان می‌دهد. در هر چهار استان، فرضیه صفر که هیچ روندی در داده‌ها وجود ندارد، بر اساس p-value محاسبه شده رد می‌شود که نشان‌دهنده وجود روند یا روند معنادار قابل توجه در غلظت متان در دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ می‌باشد.

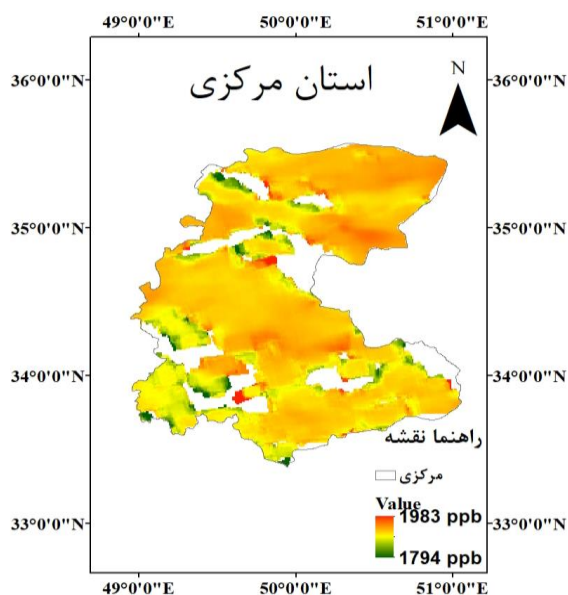
در سطح اهمیت ۰/۰۵ اگر مقدار آماره آزمون من-کندال  $Z_S > 1/96$  باشد، از لحاظ آماری سری زمانی روند صعودی دارد و اگر مقدار آماره آزمون من-کندال  $Z_S < -1/96$  باشد، از لحاظ آماری سری زمانی روند نزولی خواهد داشت. با توجه به جدول ۲، نتایج حاصل از محاسبه مقدار  $Z_S$  در آزمون من-کندال برای هر چهار استان،  $Z_S > 1/96$  می‌باشد که نشان‌دهنده روند افزایشی یا صعودی آماره من-کندال در دوره مورد مطالعه است.

فعالیت‌های پتروشیمی، پالایشگاه، صنایع سنگین، محل‌های دفن زباله و تراکم بالا جمعیت، غلظت متان بالا می‌باشد. همچنین نواحی شمال غربی، غرب و جنوب غربی استان مناطقی با غلظت متان پایین تر می‌باشند.

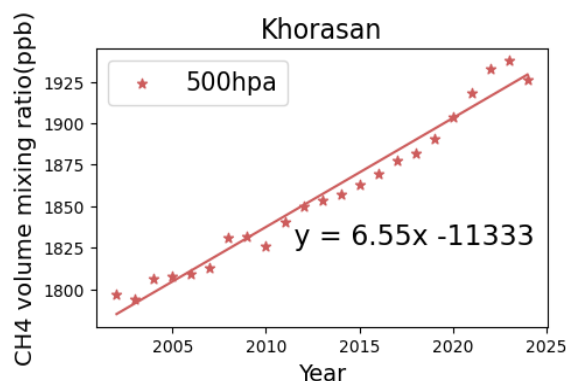
با توجه به شکل ۴ (ب)، مناطق با غلظت بالا در استان اصفهان، در بخش مرکزی و شرق استان متمرکز شده است که ممکن است ناشی از فعالیت‌های صنعتی و پالایشگاه‌ها در این نواحی باشد. مناطق شهری مانند شهر اصفهان و حومه آن غلظت بیشتری دارند. بخش‌های غربی، جنوب غربی و نواحی شمال غربی استان نیز دارای تراکم پایین متان نسبت به سایر مناطق می‌باشند.

بر اساس شکل ۴ (پ)، مناطق با غلظت بالا در استان خراسان رضوی، بخش‌هایی از شمال، شرق و مرکز استان، اطراف مشهد، سرخس، بخش‌هایی از شهرستان سبزوار و نواحی مرزی فردوس به دلیل تراکم جمعیت بالا، فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی می‌باشند. همچنین نواحی غربی، برخی مناطق پراکنده در مرکز و بخش‌هایی از جنوب استان غلظت کمتری دارند.

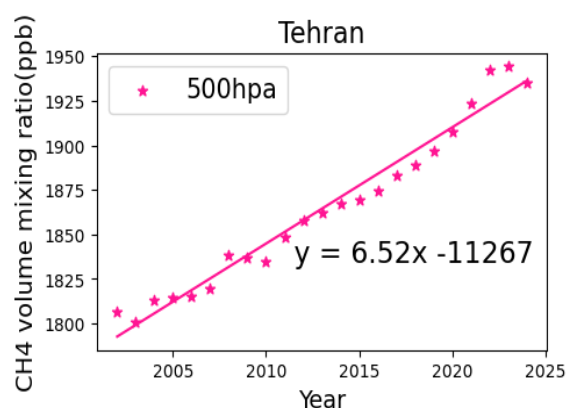
همان‌طور که شکل ۴ (ت) نشان می‌دهد، مناطق با غلظت بالا در استان تهران، نواحی جنوب، جنوب غربی، غرب و برخی نواحی شرقی استان، به دلیل تراکم بالای جمعیت، فعالیت‌های حمل‌ونقل سنگین و وجود صنایع و پالایشگاه‌ها می‌باشد. برخی مناطق مرکزی و غربی استان غلظت کمتری دارند.



(A)



(C)



(D)

شکل ۳- رگرسیون خطی بر روی میانگین سالانه غلظت متان در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال در استان (الف) مرکزی (ب) خراسان رضوی (پ) اصفهان (ت) تهران.

Fig. 3. Linear regression on the annual average methane concentration at the level of 500 hPa in the provinces of (a) Markazi (b) Khorasan Razavi (c) Isfahan (d) Tehran.

### بررسی تغییرات مکانی غلظت متان

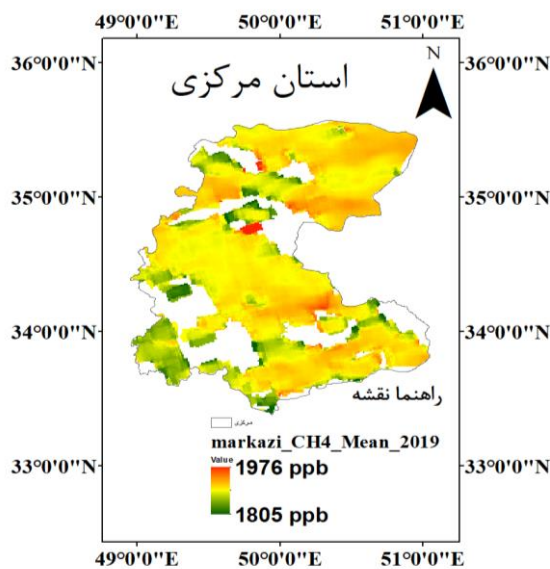
برای بررسی تغییرات مکانی غلظت متان از داده‌های TROPOMI برای دوره‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ استفاده شده است. با توجه به شکل ۴ و شکل ۵ در برخی مناطق در هر استان، داده‌های TROPOMI به دلیل پوشش ابری ضخیم یا شرایط جوی نامساعد در دسترس نمی‌باشند یا دارای شکاف‌هایی می‌باشند. همچنین آنالیز مکانی تصاویر ماهواره‌ای نشان داد که غلظت متان در شهرهای مختلف و در موقعیت‌های جغرافیایی متفاوت، رفتار و اندازه متغیری دارد. همان‌طور که در شکل ۴ (الف) نشان داده شده است، در استان مرکزی مناطق با غلظت بالا گاز متان، نواحی شمالی، شمال شرقی، مرکز و اطراف شهر اراک، جنوب و جنوب شرق استان به دلیل

داده‌های سنجنده TROPOMI برای اندازه‌گیری غلظت ستونی متان (XCH<sub>4</sub>) تنها در شرایط عاری از ابر یا با پوشش ابری بسیار کم قابل بازیابی هستند و در غیر این صورت داده‌ها حذف یا با کیفیت پایین ثبت می‌شوند [۲۱، ۲۲]. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌کنید بخش‌هایی از نقشه به‌صورت فضای خالی ظاهر شده‌اند که نشان‌دهنده نبود داده در این نواحی است. این پدیده عمدتاً در مناطقی رخ می‌دهد که پوشش ابری بیشتر بوده است.

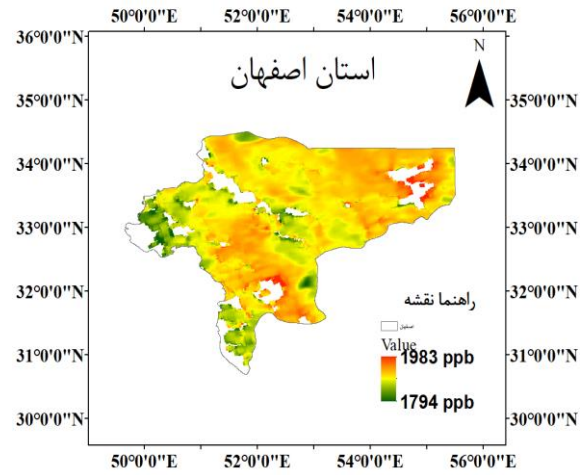
از نظر مکانی و با توجه به داده‌های ماهواره S5P، بیشترین میانگین و انحراف معیار غلظت متان برای دوره ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ مربوط به استان تهران است که مقدار آن برابر با  $1920 \pm 15/48$  ppb گزارش شده است. برای بررسی روند غلظت متان در استان‌های صنعتی، به‌عنوان نمونه، تغییرات مکانی-زمانی میانگین سالانه متان در استان مرکزی در سال‌های ۲۰۱۹، ۲۰۲۰، ۲۰۲۱، ۲۰۲۲، ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ مورد تحلیل قرار گرفته است.

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، در همه این سال‌ها به‌طور مشترک نواحی شمالی، شمال شرقی، مرکزی و جنوب شرقی استان به‌طور مداوم دارای غلظت بالاتر و نواحی غربی و جنوب غربی استان دارای غلظت پایین‌تر متان می‌باشند.

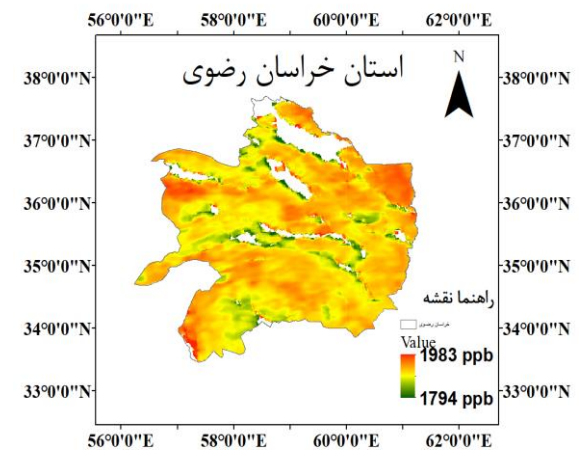
داده‌های Sentinel-5p نیز در استان مرکزی روند افزایشی غلظت متان را به‌طور مکانی و زمانی نشان می‌دهند، به‌طوری‌که در سال ۲۰۲۴ کانون‌های با غلظت بالاتر نسبت به سال‌های قبل افزایش یافته است.



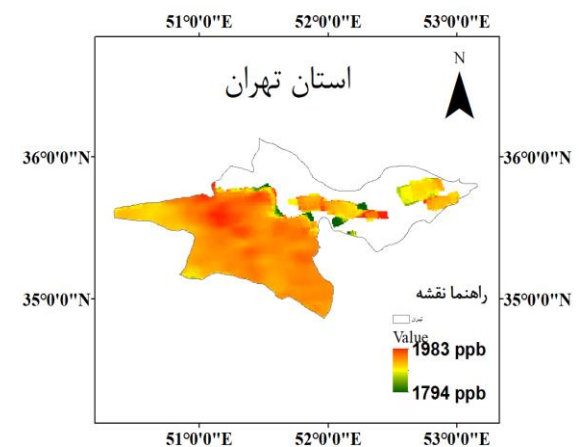
(A)



(B)



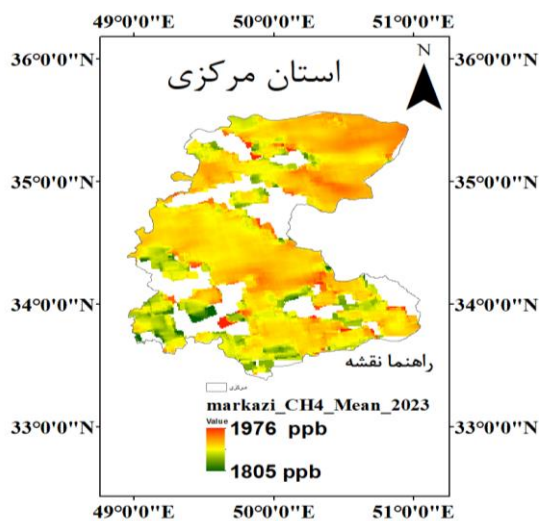
(C)



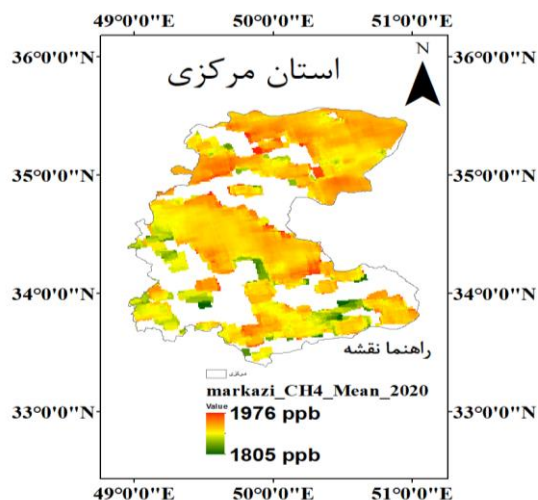
(D)

شکل ۴- توزیع مکانی غلظت متان در استان‌های (الف) مرکزی (ب) اصفهان (پ) خراسان رضوی (ت) تهران برای دوره ۲۰۱۹-۲۰۲۴.

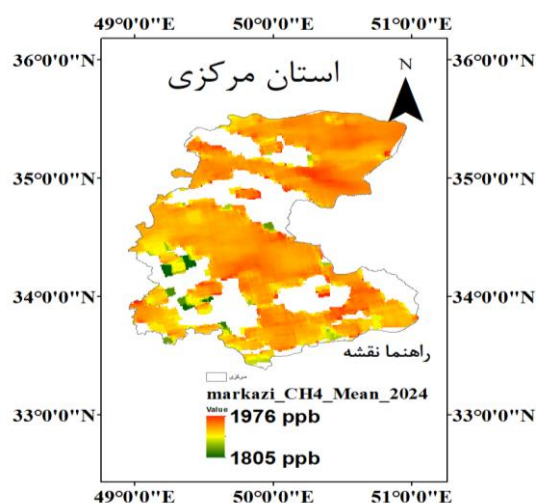
Fig. 4. Spatial distribution of methane concentration in the provinces of (a) Markazi, (b) Isfahan, (c) Khorasan Razavi, (d) Tehran for the period 2019-2024.



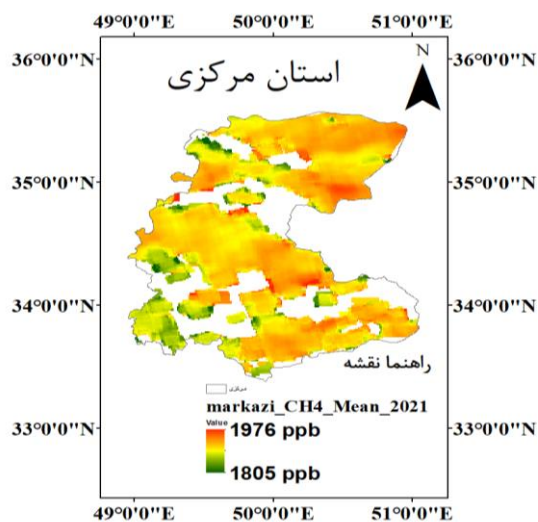
(E)



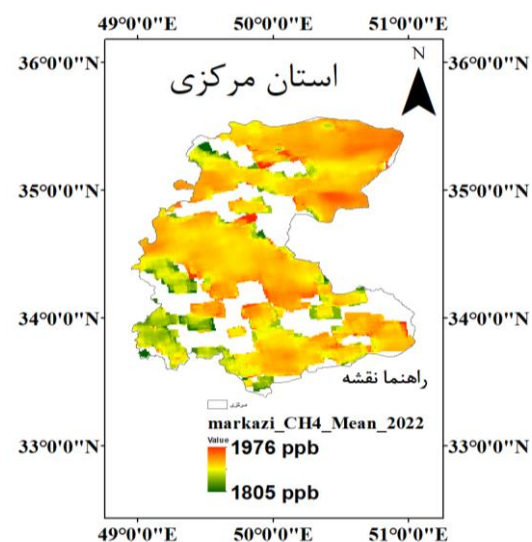
(B)



(F)



(C)



(D)

شکل ۵- توزیع مکانی غلظت متان در استان مرکزی برای دوره‌های (الف) ۲۰۱۹ (ب) ۲۰۲۰ (پ) ۲۰۲۱ (ت) ۲۰۲۲ (ث) ۲۰۲۳ (ج) ۲۰۲۴.

**Fig. 5.** Spatial distribution of methane concentration in Markazi Province for the periods (a) 2019 (b) 2020 (c) 2021 (d) 2022 (e) 2023 (f) 2024.

یافته‌های این پژوهش نشان داد که تغییرات زمانی و مکانی غلظت متان در استان‌های صنعتی کشور طی دو دهه اخیر روندی افزایشی داشته است. این نتایج، در عین حال که تصویر کلی از الگوهای انتشار متان ارائه می‌دهند، با مطالعات مشابه در مقیاس‌های شهری، ملی و جهانی نیز قابل مقایسه و همخوانی هستند.

برای نمونه، در استان اصفهان بیشترین غلظت متان در بخش‌های مرکزی و شرقی مشاهده شد که این الگو با یافته‌های ابوترابی و

نمی‌دهند و بنابراین برای تحلیل روندهای بلندمدت محدودیت دارند. با این وجود، هر یک از این ماهواره‌ها دارای نقاط قوت ویژه‌ای هستند که در ترکیب با یکدیگر ضعف‌هایشان جبران می‌شود؛ Sentinel-5P با وضوح چندکیلومتری و پوشش جهانی روزانه امکان تحلیل دقیق منابع محلی و منطقه‌ای را فراهم می‌کند و نسبت به ماهواره‌هایی مانند GOSAT و SCIAMACHY توانایی شناسایی کانون‌های انتشار کوچک را دارد، در حالی که AIRS با سری زمانی طولانی از سال ۲۰۰۲ و ارائه پروفیل قائم، تحلیل همزمان روندهای بلندمدت و تغییرات عمودی متان را ممکن می‌سازد. بنابراین، ترکیب این منابع داده‌ای در مطالعه حاضر امکان بررسی همزمان تغییرات مکانی-زمانی و روندهای بلندمدت متان را فراهم کرده است. همچنین تمامی داده‌های مورد استفاده رایگان و در دسترس عموم بوده است.

## نتیجه‌گیری

غلظت متان در جو زمین در دهه‌های اخیر به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است که ناشی از افزایش مداوم منابع طبیعی و انسانی است. تجزیه و تحلیل داده‌های سری زمانی متان با استفاده از داده‌های سنجنده AIRS در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال برای چهار استان صنعتی، مرکزی، اصفهان، خراسان رضوی و تهران از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که غلظت متان بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است.

مطابق با نتایج بیان‌شده، بیشترین میانگین ماهانه و انحراف معیار متان در استان مرکزی  $1868/86 \pm 50/33$  ppb و کمترین آن در استان خراسان رضوی  $1858/19 \pm 49/69$  ppb در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال می‌باشد. همچنین، بیشترین نرخ رشد خطی بر روی میانگین سالانه غلظت متان در بازه ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ در استان اصفهان با نرخ رشد خطی  $7/12$  ppb/yr و کمترین نرخ رشد خطی مربوط به استان مرکزی با نرخ رشد  $6/39$  ppb/yr بوده است. نتایج حاصل از محاسبه مقدار  $Z_S$  در آزمون من-کندال برای استان‌های مورد مطالعه از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ نشان داد، برای هر استان  $Z_S > 1/96$  می‌باشد و روند آماره من-کندال افزایشی یا صعودی بوده است.

تحلیل مکانی نقشه‌های میانگین غلظت متان در دوره ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ در استان‌های مورد مطالعه انجام شد، نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد، در کدام محدوده‌ها از هر یک از استان‌ها غلظت متان جوی بیشتر از سایر مناطق بوده است. برای نمونه در استان اصفهان، بخش مرکزی و شرق استان مناطق با غلظت بالا می‌باشند. همچنین مقایسه نقشه‌های میانگین سالانه غلظت متان توسط S5P

همکاران (۲۰۲۵) مطابقت دارد. آن‌ها در مقیاس شهری، تراکم بالای انتشار متان را در مناطق شرق و شمال شرقی کلانشهر اصفهان گزارش کرده‌اند [۱۵]. بنابراین، هر دو مطالعه در مقیاس‌های متفاوت اما مکمل، نقش کلیدی مناطق صنعتی و پرجمعیت شرق اصفهان در شکل‌گیری کانون‌های اصلی انتشار متان را برجسته می‌کنند.

در استان تهران نیز تمرکز بالای متان در بخش‌های جنوبی و جنوب‌غربی، به‌ویژه محدوده آرادکوه، با نتایج محمدی و اخوندزاده (۲۰۲۳) همخوانی دارد. آن‌ها نیز در مقیاس شهری، وجود ابر متان و تمرکز انتشار در محل دفن زباله آرادکوه را تأیید کرده‌اند. این همگرایی نشان می‌دهد که داده‌های ماهواره‌ای توانسته‌اند منابع شناخته‌شده محلی را با دقت شناسایی کنند و در عین حال بر اهمیت جنوب تهران به‌عنوان یکی از کانون‌های اصلی انتشار متان بیفزایند. علاوه بر این، مطالعه حاضر همسویی قابل‌توجهی با تحقیق امیدوار و همکاران (۲۰۲۴) دارد که با استفاده از داده‌های S5P، روند افزایشی متان و سایر آلاینده‌ها را در ایران طی سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ گزارش کرده‌اند [۱۴]. یافته‌های این پژوهش نیز با استفاده از داده‌های AIRS (۲۰۰۲-۲۰۲۴) و S5P (۲۰۱۹-۲۰۲۴) همین روند افزایشی معنادار را تأیید می‌کند.

از دیدگاه جهانی، نتایج حاضر با یافته‌های Wójcik-Gront و همکاران (۲۰۲۴) هم‌راستا است. آن‌ها نشان داده‌اند که اگرچه گزارش‌های ملی در برخی کشورهای توسعه‌یافته کاهش انتشار متان را نشان می‌دهند، اما داده‌های S5P روند افزایشی غلظت متان را در جو اکثر کشورها از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ تأیید کرده است [۲۳].

این همخوانی‌ها در مقیاس‌های مختلف، نه تنها اعتبار نتایج پژوهش حاضر را تقویت می‌کنند، بلکه بر اهمیت استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در تحلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه در مناطق فاقد ایستگاه‌های زمینی تأکید دارند. چنین مطالعاتی می‌توانند چارچوبی علمی برای سیاست‌گذاری و مدیریت زیست‌محیطی فراهم آورند و در برنامه‌ریزی‌های ملی برای کاهش انتشار متان مورد استفاده قرار گیرند.

داده‌های Sentinel-5P تنها ستون کل متان را ارائه می‌کنند و به پوشش ابری و مه حساس هستند، بنابراین در شرایط ابری کیفیت داده‌ها کاهش یافته و اطلاعات عمودی متان در لایه‌های مختلف جو در دسترس نیست. داده‌های AIRS با وجود ارائه پروفیل قائم متان و فراهم کردن امکان تحلیل تغییرات فصلی و روندهای بلندمدت، وضوح مکانی پایینی دارند و شناسایی منابع کوچک و نقطه‌ای انتشار محدود می‌شود. ماهواره‌هایی با وضوح مکانی بالاتر مانند MethaneSAT و GHGsat قادر به ردیابی دقیق منابع محلی هستند، اما پوشش جهانی روزانه و سری زمانی طولانی مشابه Sentinel-5P و AIRS ارائه

- resolution Methane mapping with the EnMAP satellite imaging spectroscopy mission," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 62, pp. 1–12, 2024, Art. no. 4102012, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3352403>.
- [3] X. Lin *et al.*, "A comparative study of anthropogenic CH<sub>4</sub> emissions over China based on the ensembles of bottom-up inventories," *Earth System Science Data*, vol. 13, no. 3, pp. 1073–1088, 2021, <https://doi.org/10.5194/essd-13-1073-2021>.
- [4] M. C. Sarofim, S. T. Waldhoff, and S. C. Anenberg, "Valuing the Ozone-related health benefits of Methane emission controls," *Environmental and Resource Economics*, vol. 66, pp. 45–63, 2017, <https://doi.org/10.1007/s10640-015-9937-6>.
- [5] W. Collins *et al.*, "Monitoring Methane emissions from oil and gas operations," *Optics Express*, vol. 30, no. 14, pp. 24326–24351, 2022, <https://doi.org/10.1364/OE.464421>.
- [6] S. Li, Z. Ma, X. Xiong, D. C. Christiani, Z. Wang, and Y. Liu, "Satellite and ground observations of severe air pollution episodes in the winter of 2013 in Beijing, China," *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 16, no. 4, pp. 977–989, 2016, <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.01.0057>.
- [7] R. A. Alvarez *et al.*, "Assessment of methane emissions from the U.S. oil and gas supply chain," *Science*, vol. 361, no. 6398, pp. 186–188, 2018, <https://doi.org/10.1126/science.aar7204>.
- [8] S. S. Sibiya, P. Mhangara, and L. Shikwambana, "Seasonal and trend variation of Methane concentration over two provinces of South Africa using Sentinel-5p data," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 196, no. 8, 2024, Art. no. 713, <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12871-0>.
- [9] S. M. Mousavi *et al.*, "Unveiling the drivers of atmospheric Methane variability in Iran: A 20-year exploration using spatiotemporal modeling and machine learning," *Environmental Challenges*, vol. 15, 2024, Art. no. 100946, <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100946>.
- [10] M. Mohammadi and M. Akhoondzadeh, "Monitoring and detection of Methane gas in Tehran in Google Earth Engine," *Journal of Remote Sensing and Geoinformation Research*, vol. 1, no. 1, pp. 41–52, 2023, (in Persian).
- [11] Z. Xu, Y. Chen, W. Shan, and Y. Wu, "Analysis of spatiotemporal distribution of Methane column concentration and emission source in permafrost area of Northeast China based on AIRS data," *International Journal of Energy*, vol. 2, no. 1, pp. 24–32, 2023, <https://doi.org/10.54097/ije.v2i1.5379>.
- [12] F. G. Abed and S. H. Halos, "The vertical variations of atmospheric Methane (CH<sub>4</sub>) concentrations over selected cities in Iraq based on AIRS data," *Baghdad*

برای استان مرکزی نشان داد، در طول سال‌ها غلظت متان در این منطقه رو به افزایش بوده است. به‌نوعی نتایج حاصل از S5P از ۲۰۱۹ به بعد روند افزایشی را همانند مطالعه بلندمدت AIRS در منطقه مورد مطالعه تایید کرد.

شناسایی کانون‌های اصلی انتشار در استان‌های صنعتی می‌تواند مبنایی برای تدوین برنامه‌های هدفمند کاهش آلاینده‌ها باشد. به‌ویژه، ارتقای زیرساخت‌های مدیریت پسماند شهری و صنعتی، به‌کارگیری فناوری‌های نوین مانند تبدیل زباله به انرژی، اصلاح الگوهای کشاورزی و دامداری برای کاهش تولید متان، توسعه فضای سبز در مناطق آلوده و پایش مستمر صنایع با استفاده از داده‌های زمینی و ماهواره‌ای از جمله اقداماتی است که می‌تواند در کاهش غلظت این آلاینده مؤثر واقع شود.

توصیه می‌شود مطالعات بعدی به‌سوی ترکیب روش‌های پایین‌به‌بالا (مانند موجودی‌های انتشار) با روش‌های بالا به پایین (داده‌های ماهواره‌ای) حرکت کنند تا تصویری جامع‌تر و دقیق‌تر از الگوهای انتشار متان حاصل شود. در این راستا، داده‌های ماهواره S5P به‌دلیل پوشش جهانی و وضوح مکانی مناسب همچنان نقش محوری دارند. علاوه بر این، بهره‌گیری از ماهواره‌های نسل جدید نظیر MethaneSAT با وضوح مکانی بالاتر و مأموریت‌های مشابهی که در آینده پرتاب خواهند شد، افق‌های تازه‌ای برای پایش دقیق‌تر و هدفمند منابع انتشار فراهم خواهد ساخت. چنین رویکردی می‌تواند بنیانی علمی برای توسعه و حمایت از سیاست‌های کارآمدتر در زمینه کاهش انتشار متان ایجاد کند.

در مجموع، این پژوهش نشان داد که رویکردهای ترکیبی با بهره‌گیری از داده‌های متنوع، نه‌تنها امکان پایش دقیق‌تر انتشار متان را فراهم می‌کنند، بلکه می‌توانند چارچوبی علمی برای سیاست‌گذاری‌های ملی در راستای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تحقق اهداف توسعه پایدار ایجاد کنند.

## تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده‌است.

## مرجع

- [1] L. Zhou *et al.*, "Spatiotemporal variability of global atmospheric methane observed from two decades of satellite hyperspectral infrared sounders," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 12, 2023, Art. no. 2992, <https://doi.org/10.3390/rs15122992>.
- [2] J. Roger, I. Irakulis-Loitxate, A. Valverde, J. Gorroño, S. Chabrilat, and M. Brell, "High-

- [18] Z. A. Alemu and M. O. Dioha, "Climate change and trend analysis of temperature: the case of Addis Ababa, Ethiopia," *Environmental Systems Research*, vol. 9, no. 1, 2020, Art. no. 27, <https://doi.org/10.1186/s40068-020-00190-5>.
- [19] A. Gadedjisso-Tossou, K. I. Adjegan, and A. K. M. Kablan, "rainfall and temperature trend analysis by Mann–Kendall test and significance for rainfed cereal yields in Northern Togo," *Sci*, vol. 3, no. 1, 2021, Art. no. 17, <https://doi.org/10.3390/sci3010017>.
- [20] M. Ansari, G. Noori, and S. Fotouhi, "Investigation of temperature precipitation and flow trend using nonparametric Mankendall (case study: Kaju river in Sistan and Baluchestan)," *Journal of Watershed Management Research*, vol. 7, no. 14, pp. 152–158, 2017, (in Persian), <https://doi.org/10.29252/jwmr.7.14.158>.
- [21] H. Hu *et al.*, "Toward global mapping of Methane with TROPOMI: First results and intersatellite comparison to GOSAT," *Geophysical Research Letters*, vol. 45, no. 8, pp. 3682–3689, 2018, <https://doi.org/10.1002/2018GL077259>.
- [22] A. Lorente *et al.*, "Methane retrieved from TROPOMI: improvement of the data product and validation of the first 2 years of measurements," *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 14, no. 1, pp. 665–684, 2021, <https://doi.org/10.5194/amt-14-665-2021>.
- [23] E. Wójcik gront and A. Wnuk, "Evaluating Methane emission estimates from intergovernmental panel on climate change compared to sentinel-derived air–Methane data," *Sustainability*, vol. 17, no. 3, 2025, Art. no. 850, <https://doi.org/10.3390/su17030850>.
- Science Journal*, vol. 18, no. 3, 2021, Art. no. 3, <https://doi.org/10.21123/bsj.2021.18.3.0655>.
- [13] X. Wu, X. Zhang, X. Chuai, X. Huang, and Z. Wang, "Long-term trends of atmospheric CH<sub>4</sub> concentration across China from 2002 to 2016," *Remote Sensing*, vol. 11, no. 5, 2019, Art. no. 538, <https://doi.org/10.3390/rs11050538>.
- [14] K. Omidvar, R. Yousefi Ramandi, and H. Toofani, "Investigation and monitoring of atmospheric pollution over Iran using Sentinel 5 satellite," *Spatial Analysis Environmental Hazards*, vol. 11, no. 3, pp. 21–34, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.61186/jsaeh.11.3.3>.
- [15] A. Aboutorabi Boarabadi, A. Sadeghi, and D. Rahimi, "Spatial and temporal analysis of Methane pollutant distribution in metropolitan areas using remote sensing and geographic information systems (Case study: Isfahan metropolis)," *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 2025, (in Persian), <https://doi.org/10.48308/gisj.2025.238060.1243>.
- [16] V. Rakitin, E. Fedorova, A. Skorokhod, N. Kirillova, N. Pankratova, and N. Elansky, "Principles of correction for long-term orbital observations of atmospheric composition, applied to AIRS v. 6 CH<sub>4</sub> and CO data," *Remote Sensing*, vol. 17, no. 13, 2025, Art. no. 2323, <https://doi.org/10.3390/rs17132323>.
- [17] P. Veefkind *et al.*, "Sentinel 5 precursor: Status of TROPOMI and the operational data products," in *22<sup>nd</sup> EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2020, Paper 6895, held online, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-6895>.