

Analysis of Temporal Trends and Seasonal Variability in Column-Averaged Methane Concentrations (XCH_4) over the Middle East Using Sentinel-5P/TROPOMI Data during 2018–2023

Aziz Azizpour¹, Mohsen Mirmohammadi^{2*}, Rohullah Noori³,
Seyed Mohsen Mousavi⁴

¹ M.Sc. in Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: aziz.azizpour@ut.ac.ir

² Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: mirmohammadi.m@ut.ac.ir

³ Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: noor@ut.ac.ir

⁴ Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Rasht, Iran, Email: se_mousavi@guilan.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2026-5-4
Accepted: 2026-7-6

Keywords:
Atmospheric methane
Column-averaged
methane concentration
Sentinel 5P/TROPOMI
Trend analysis
Seasonal variation
Middle East

ABSTRACT

Methane (CH_4) is one of the most important short-lived greenhouse gases affecting climate change, and its monitoring in energy-intensive regions is of particular importance. The aim of this research is to analyze the temporal trend and seasonal pattern of XCH_4 column concentration in the Middle East during the period 2018-2023 using Sentinel-5P/TROPOMI satellite data. In this study, daily Level 2 XCH_4 data were used, and after processing in a Python environment, XCH_4 values were aggregated at monthly, seasonal, and annual scales. The trend of changes was then evaluated using the Mann-Kendall test, Sen's slope estimator, and Ordinary Least Squares (OLS) regression. The results showed that XCH_4 in the Middle East during the study period has an increasing, monotonic, and statistically significant trend; its annual average increased from 1862.14 ppb in 2018 to 1918.77 ppb in 2023. The Mann-Kendall test showed $Z = 9.64$, $p\text{-value} = 3.04 \times 10^{-21}$, and $\tau = 0.75$, indicating a strong and significant increasing trend over the entire study period. Sen's slope estimator and the OLS model also showed that XCH_4 in the Middle East increased by an average of about 12 to 13 ppb annually. Seasonally, the minimum mean XCH_4 was observed in winter (1876.2 ppb) and its maximum in summer (1898.3 ppb). Monthly analysis also confirmed this pattern, with the lowest value recorded in February and the highest in August–September. Additionally, annual and seasonal average maps indicated spatial heterogeneity of XCH_4 and higher values around the Persian Gulf and parts of the Arabian Peninsula. In summary, the results showed that the methane column concentration in the Middle East has followed a consistent increasing trend and a regular seasonal cycle in recent years. These findings indicate the suitable capacity of satellite monitoring for continuous observation of the temporal and spatial behavior of methane at a regional scale.

Cite this article: Azizpour, A., Mirmohammadi, M., Noori, R., Mousavi, S.M. (2026). Analysis of Temporal Trends and Seasonal Variability in Column-Averaged Methane Concentrations (XCH_4) over the Middle East Using Sentinel-5P/TROPOMI Data during 2018–2023. Journal of the Climate Change research, 7 (26), 35-50.

مقدمه

گرمایش زمین و تغییرات اقلیمی از مهم‌ترین چالش‌های محیط زیستی جهان در دهه‌های اخیر به شمار می‌روند و افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی، عامل اصلی تشدید این فرایند محسوب می‌شود (کروز و روسی-هانسبرگ^۱، ۲۰۲۴؛ موسوی و فلاحتکار، ۲۰۲۰). در این میان، متان CH_4 یکی از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای با زمان ماند جوی نسبتاً کوتاه است. اگرچه ماندگاری متان در جو در مقایسه با دی‌اکسیدکربن CO_2 کمتر است، اما اثرگذاری آن بر تغییر اقلیم و کیفیت هوا قابل توجه است. از منظر اقلیمی، متان به دلیل بازده تابشی بالا و پتانسیل گرمایش جهانی قابل توجه، نقش مهمی در تقویت اثر گلخانه‌ای و گرمایش جهانی ایفا می‌کند. از منظر کیفیت هوا نیز، این گاز به عنوان یکی از پیش‌سازهای ازن تروپوسفری، در فرایندهای شیمیایی جو و تشکیل آلاینده‌های ثانویه اهمیت دارد (هو و همکاران، ۲۰۲۳؛ ۸، ۱؛ لین و همکاران^۲، ۲۰۲۱؛ ۱۰۷۳). برآوردها نشان می‌دهند که انتشار انسانی متان عامل حدود ۳۰ درصد از گرمایش فعلی زمین است و پتانسیل گرمایش جهانی آن در افق زمانی ۱۰۰ ساله، حدود ۲۸ تا ۳۴ برابر دی‌اکسیدکربن است (دونیاو و همکاران^۳، ۲۰۲۴؛ ۲۷۷۷؛ هی و همکاران^۴، ۲۰۲۰؛ ۸۰۵).

روند فزاینده صنعتی‌شدن، شهرنشینی، توسعه حمل و نقل، افزایش مصرف انرژی و همچنین فعالیت‌هایی نظیر کشاورزی، مدیریت پسماند، استخراج از معادن زغال‌سنگ و توسعه شبکه‌های گاز، از مهم‌ترین عوامل افزایش گازهای گلخانه‌ای در دهه‌های اخیر بوده‌اند (ماساکرز و همکاران^۵، ۲۰۲۱؛ ۴۳۴۳). در این میان، مناطق خاورمیانه و شمال آفریقا به دلیل گستردگی فعالیت‌های تولید نفت و گاز و سهم قابل توجه این بخش در انتشار متان، از جمله

مناطق کلیدی در مطالعات و پایش متان به شمار می‌روند (چن و همکاران^۶، ۲۰۲۳؛ ۵۹۴۵-۵۹۴۶). همچنین، گزارش‌های موجود نشان داد که بخشی از کشورهای این منطقه در میان منتشرکنندگان عمده متان قرار دارند و در برخی از آن‌ها، روندهای افزایشی مرتبط با متان در دهه‌های اخیر قابل توجه بوده است (بانک جهانی^۷، ۲۰۲۰؛ تارازکار و همکاران^۸، ۲۰۲۱؛ ۶۷۳۴). بنابراین، بررسی رفتار زمانی متان در مقیاس منطقه‌ای خاورمیانه از اهمیت علمی و کاربردی ویژه‌ای برخوردار است.

با وجود این اهمیت، پایش متان در بسیاری از کشورهای خاورمیانه با محدودیت داده‌های زمینی مواجه است. در چنین شرایطی، سنجش از دور ماهواره‌ای به عنوان ابزاری کارآمد برای پایش گسترده و پیوسته غلظت متان در مقیاس‌های منطقه‌ای و فرمانطقه‌ای اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. ویژگی‌های جذبی متان در ناحیه مادون قرمز امکان برآورد توزیع مکانی و روندهای زمانی آن را از طریق ابزارهای آلاینده‌های فراهم می‌سازد و در این زمینه، ماهواره‌های مداری نسبت به اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای زمینی، مزیت پوشش مکانی وسیع و تداوم زمانی را دارند (نگوین^۹، ۲۰۲۴؛ جیکوب و همکاران^{۱۰}، ۲۰۱۶). در میان سامانه‌های ماهواره‌ای، سنجنده TROPOMI بر روی ماهواره Sentinel-5P به دلیل پوشش جهانی روزانه، تفکیک مکانی مناسب و توان پایش پیوسته متان جوی، در مطالعات مربوط به شناسایی و کمی‌سازی انتشار متان به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است (لورنت و همکاران^{۱۱}، ۲۰۲۱؛ ۶۶۵-۶۶۶). علاوه بر این، پژوهش‌های جدیدتر نیز نشان داده‌اند که داده‌های TROPOMI می‌توانند برای شناسایی کانون‌های انتشار و تحلیل انتشار متان ناشی از بخش سوخت‌های فسیلی مورد استفاده قرار گیرند

6. Chen et al.

7. WDI.

8. Tarazkar et al.

9. Nguyen, N. H.

10. Jacob et al.

11. Lorente et al.

1. Cruz & Rossi-Hansberg.

2. Len et al.

3. Dogniaux et al.

4. He et al.

5. Mermigkas et al.

(شن و همکاران^۱، ۲۰۲۳).

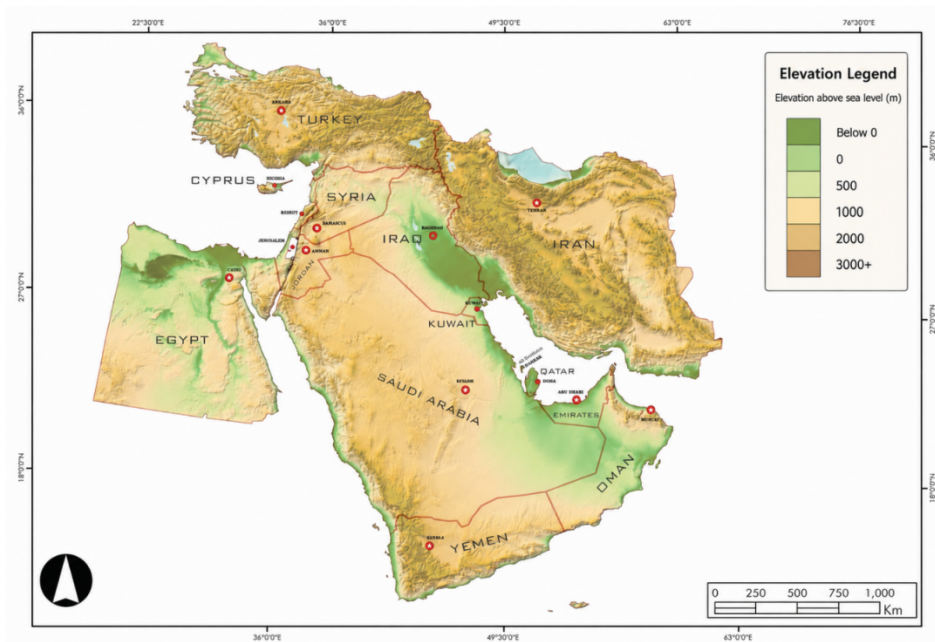
مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که پایش ماهواره‌ای متان جوی در سال‌های اخیر به یکی از رویکردهای اصلی برای بررسی تغییرات مکانی و زمانی این گاز گلخانه‌ای تبدیل شده است. همچنین، سونوآ و همکاران در چارچوب بودجه جهانی متان، روند افزایشی غلظت و انتشار متان را در دهه‌های اخیر گزارش کرده و بر اهمیت پایش مستمر این گاز در مقیاس‌های جهانی و منطقه‌ای تأکید کرده‌اند (سونوآ و همکاران^۲، ۲۰۲۰). در مقیاس منطقه‌ای، خاورمیانه و شمال آفریقا به دلیل تمرکز بالای فعالیت‌های نفت و گاز، زیرساخت‌های انتقال انرژی، پالایشگاه‌ها و شرایط اقلیمی خشک و نیمه خشک، از مناطق مهم در مطالعات متان به شمار می‌آیند. چن و همکاران با استفاده از داده‌های TROPOMI و مدل GEOS-Chem، انتشار متان و شدت انتشار بخش نفت و گاز را در کشورهای خاورمیانه و شمال آفریقا بررسی کردند و نشان دادند که داده‌های ماهواره‌ای می‌توانند در ارزیابی انتشارهای منطقه‌ای و پشتیبانی از سیاست‌های کاهش متان مؤثر باشند (چن و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین، مطالعات انجام شده در جنوب شرقی شبه‌جزیره عربستان و ایران نشان داده‌اند که داده‌های ماهواره‌ای برای بررسی تغییرات مکانی و زمانی متان در مناطقی با محدودیت ایستگاه‌های زمینی، کارایی قابل توجهی دارند (فرانسیس و همکاران^۳، ۲۰۲۳؛ موسوی و فلاح‌کار، ۲۰۲۰). علاوه بر این، موسوی و همکاران نیز با رویکرد مدل‌سازی مکانی - زمانی و یادگیری ماشین، نقش متغیرهای اقلیمی و محیطی را در تغییرپذیری متان جوی ایران تحلیل کردند (موسوی و همکاران، ۲۰۲۴). مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد، بخش قابل توجهی از مطالعات پیشین یا بر مقیاس جهانی متمرکز بوده‌اند، یا مناطق محدودتری مانند ایران، جنوب شرقی شبه‌جزیره عربستان، یا کشورهای منتخب خاورمیانه و شمال آفریقا را بررسی کرده‌اند (چن و همکاران،

۲۰۲۳؛ فرانسیس و همکاران، ۲۰۲۳؛ موسوی و همکاران، ۲۰۲۴). از این رو، بررسی پیوسته روند زمانی، الگوی فصلی و تغییرات ماهانه XCH_4 در مقیاس کل خاورمیانه و در یک بازه چندساله، همچنان می‌تواند به تکمیل شناخت موجود از رفتار متان جوی در این منطقه کمک کند. بر این اساس، پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های Sentinel-5P/TROPOMI طی دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳، به تحلیل روند زمانی و الگوی فصلی غلظت ستونی متان در خاورمیانه پرداخته و تلاش می‌کند تصویری منسجم‌تر از تغییرات زمانی و مکانی متان در این منطقه ارائه دهد.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، خاورمیانه است که شامل کشورهای بحرین، مصر، ایران، عراق، اردن، کویت، لبنان، فلسطین، فلسطین اشغالی، عمان، قطر، عربستان سعودی، سوریه، ترکیه، امارات متحده عربی و یمن می‌شود. این منطقه در بازه تقریبی ۱۲ تا ۴۳ درجه عرض شمالی و ۲۴ تا ۶۴ درجه طول شرقی قرار گرفته و مساحتی در حدود ۷,۲۰۷,۵۷۰ کیلومتر مربع را دربر می‌گیرد. بر اساس داده‌های بانک جهانی، جمعیت این منطقه در سال‌های اخیر حدود ۴۸۳ میلیون نفر برآورد شده است (بانک جهانی، ۲۰۱۷). خاورمیانه به دلیل تمرکز بالای منابع انرژی، به ویژه نفت و گاز، غالب بودن اقلیم خشک و نیمه خشک در بخش وسیعی از آن، و سهم قابل توجه بخش نفت و گاز در انتشار متان، از منظر پایش گازهای گلخانه‌ای و به ویژه متان منطقه‌ای با اهمیت ویژه محسوب می‌شود (حیدری‌زاد و همکاران، ۲۰۲۱؛ ۱، ۴؛ چن و همکاران، ۲۰۲۳؛ ۵۹۴۵-۵۹۴۶). افزون بر این، محدودیت داده‌های زمینی در بسیاری از کشورهای منطقه، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای را برای بررسی الگوهای زمانی و فصلی XCH_4 در مقیاس منطقه‌ای ضروری‌تر می‌سازد. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

1. Shen et al.
2. Saunio et al.
3. Francis et al.



شکل ۱: موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه

فیلتر، که مبتنی بر یادگیری ماشین است، برای شناسایی و حذف مشاهداتی به کار می رود که به دلیل وجود ابر، شرایط نامناسب سطحی، ضعف برازش طیفی یا سایر عوامل مؤثر بر بازیابی، کیفیت کافی برای تحلیل علمی ندارند. افزون بر این، متغیر $(cloud_parameter)$ در فایل محصول ارائه شده است که نسبت تابش اندازه گیری شده به تابش مرجع بدون ابر را برای خطوط جذب قوی بخار آب نشان می دهد و در ارزیابی شرایط ابری و کیفیت بازیابی نقش دارد. پس از اعمال این کنترل کیفیت، داده های معتبر محدوده خاورمیانه استخراج و برای تولید سری های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه تجمیع شدند (شنایزینگ و همکاران^۱، ۲۰۲۳؛ دانشگاه برمن^۲، ۲۰۲۴).

تولید سری های زمانی و نقشه های میانگین فصلی: پس از آماده سازی داده ها، آمارهای توصیفی XCH_4 شامل میانگین، بیشینه، کمینه، انحراف معیار و تعداد نمونه ها برای بازه های زمانی مورد نظر محاسبه شد و بر این اساس، سری های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه XCH_4 برای کل منطقه مطالعه تولید گردید.

داده های مورد استفاده و پیش پردازش: در این پژوهش از داده های سطح ۲ غلظت ستونی متان (XCH_4) محصول WFMD/TROPOMI دانشگاه برمن استفاده گردید. این محصول در قالب فایل های NetCDF ارائه می شود و برای هر مشاهده، افزون بر مقدار (XCH_4)، متغیرهایی مانند عدم قطعیت بازیابی، مختصات مکانی، هندسه مشاهده، ویژگی های سطحی و شاخص کیفیت داده در دسترس است. برای کنترل کیفیت داده ها، از متغیر $(xch_4_quality_flag)$ استفاده شد. مطابق مستندات محصول WFMD، مقدار صفر این شاخص نشان دهنده داده با کیفیت مناسب و مقدار یک نشان دهنده داده کم کیفیت یا بالقوه نامعتبر است. بنابراین، تنها پیکسل های دارای $(xch_4_quality_flag = 0)$ در تحلیل وارد شدند و پیکسل های دارای $(xch_4_quality_flag = 1)$ ، مقادیر فاقد مقدار معتبر، مقادیر غیرواقعی یا خارج از محدوده، و مشاهدات خارج از محدوده مکانی خاورمیانه حذف گردیدند. حذف پیکسل های ابری و مشاهدات دارای شرایط نامناسب بازیابی نیز در محصول WFMD از طریق فیلتر کیفیت محصول انجام می شود. این

1. Schneising et al.
2. University of Bremen

در این پژوهش، میانگین‌های منطقه‌ای بر پایه داده‌های معتبر هر بازه زمانی محاسبه شد و سپس از این مقادیر برای استخراج الگوهای سالانه، فصلی و ماهانه استفاده گردید.

در محاسبات فصلی، فصل‌ها شامل زمستان، بهار، تابستان و پاییز تعریف شدند و چرخه سالانه از ماه ژانویه مبنا قرار گرفت. افزون بر تحلیل‌های زمانی، نقشه‌های میانگین سالانه و فصلی XCH_4 نیز به منظور نمایش الگوهای کلی فضایی و کمک به تفسیر نتایج روند تهیه شدند. این نقشه‌ها در پژوهش حاضر نقش مکمل داشته و بیشتر برای درک بهتر ناهمگنی فضایی غلظت متان در مقیاس منطقه‌ای مورد استفاده قرار گرفتند.

دقت نقشه‌های تهیه شده: به‌منظور افزایش قابلیت اعتماد نقشه‌های غلظت ستونی متان، پیش از تولید نقشه‌ها فرآیند کنترل کیفیت بر روی داده‌های TROPOMI اعمال شد. در این مرحله تنها پیکسل‌های دارای کیفیت مناسب ($\text{XCH}_4_quality_flag = 0$) وارد تحلیل شدند و داده‌های کم کیفیت، مقادیر نامعتبر، مشاهدات خارج از محدوده مطالعه و پیکسل‌های متأثر از ابر حذف گردیدند. همچنین داده‌های معتبر پس از کنترل کیفیت در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه تجمیع شدند که این فرآیند موجب کاهش خطاهای تصادفی و افزایش پایداری الگوهای مکانی گردید.

با توجه به محدودیت ایستگاه‌های پایش زمینی متان در خاورمیانه، امکان اعتبارسنجی مستقیم نقشه‌ها با داده‌های میدانی فراهم نبود. بنابراین، قابلیت اعتماد نقشه‌ها بر پایه کنترل کیفیت داده‌های ورودی، استفاده از محصول معتبر Sentinel-5P/TROPOMI و انطباق الگوهای مکانی حاصل با مطالعات پیشین ارزیابی شد. از این رو، نقشه‌های ارائه شده برای تحلیل روندهای زمانی و بررسی تغییرات مکانی غلظت ستونی متان در مقیاس منطقه‌ای از دقت و قابلیت اعتماد مناسبی برخوردار هستند.

تحلیل آماری روند: برای ارزیابی روند زمانی XCH_4 در خاورمیانه، از آزمون غیرپارامتری Mann-Kendall،

برآوردگر شیب سن (Sen's slope) و رگرسیون خطی معمولی (OLS) استفاده شد. آزمون من-کندال یکی از روش‌های آماری ناپارامتری معتبر برای شناسایی روندهای صعودی یا نزولی در سری‌های زمانی داده‌های هواشناسی و محیط‌زیستی است و به‌طور گسترده در ارزیابی روند تغییرات اقلیمی و پارامترهای جوی به کار می‌رود. از آنجا که این آزمون وابستگی مستقیم به توزیع نرمال داده‌ها ندارد، برای تحلیل داده‌های دارای نوسان زمانی و مقادیر پرت نیز مناسب است (ملکی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۱: ۴۵؛ کندال، ۱۹۷۵). در این آزمون، از آماره Z ، ضریب Kendall's tau و مقدار p برای ارزیابی جهت و معنی‌داری روند استفاده شد. به منظور برآورد نرخ تغییرات، از شیب سن به عنوان یک برآوردگر مقاوم استفاده شد که مقدار افزایش یا کاهش متغیر را در طول زمان نشان می‌دهد. همچنین، برای تکمیل تحلیل و کمی‌سازی رابطه بین زمان و XCH_4 ، رگرسیون خطی معمولی به کار رفت و شیب خط رگرسیون به عنوان نرخ تغییرات و ضریب تعیین (R^2) به عنوان شاخص قدرت برازش روند خطی گزارش شد (سیبر و لی^۱، ۲۰۰۳). به کارگیری هم‌زمان این سه روش، امکان ارزیابی معنی‌داری آماری، شدت روند و میزان برازش خطی تغییرات XCH_4 را در دوره مورد مطالعه فراهم کرد.

روابط مورد استفاده: برای محاسبه آماره‌های مربوط به آزمون Mann-Kendall، شیب سن و مدل رگرسیون خطی معمولی، روابط استاندارد آماری استفاده گردید. این روابط شامل آماره S ، واریانس آماره، Z در آزمون Mann-Kendall، محاسبه شیب سن، و فرم کلی مدل OLS هستند. و به صورت زیر تعریف می‌شود (حجام و همکاران، ۱۳۸۷: ۱۵۷).

رابطه (۱): آماره S در آزمون Mann-Kendall

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

^۱. Seber & Lee.

آزمون Mann-Kendall، $\text{Var}(S)$ واریانس آماره، Z آماره استاندارد شده برای ارزیابی معنی داری روند، τ ضریب کندال برای تعیین جهت و شدت روند، Q_i شیب بین دو مشاهده، Q_{med} شیب برآوردگر سن، β_0 عرض از مبدأ، β_1 شیب روند خطی، t زمان، و ε_t جمله خطا در مدل رگرسیون است.

در این پژوهش، برای شناسایی و کمی سازی روند تغییرات زمانی XCH_4 از آزمون غیرپارامتر Mann-Kendall، برآوردگر شیب سن و رگرسیون خطی معمولی (OLS) استفاده شد. در آزمون Mann-Kendall، آماره S بر اساس مقایسه های زوجی بین مقادیر سری زمانی محاسبه می شود و علامت آن جهت روند را نشان می دهد؛ به طوری که مقادیر مثبت بیانگر روند افزایشی و مقادیر منفی نشان دهنده روند کاهشی هستند. سپس با محاسبه واریانس S ، آماره استاندارد شده Z برای ارزیابی معنی داری آماری روند به دست می آید. همچنین، ضریب کندال τ شدت و جهت همبستگی یکنواخت روند را نشان می دهد. برای برآورد نرخ تغییرات، از شیب سن استفاده شد که به عنوان برآوردگری مقاوم، میانه شیب های محاسبه شده بین تمام جفت مشاهدات را ارائه می کند. در نهایت، مدل OLS برای توصیف رابطه خطی بین زمان و XCH_4 و برآورد شیب روند و ضریب تعیین (R^2) به کار گرفته شد.

نتایج و بحث

تحلیل روند ماهانه منطقه ای XCH_4 با آزمون Mann-Kendall، شیب سن و رگرسیون OLS: به منظور ارزیابی روند زمانی غلظت ستونی متان در خاورمیانه طی دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳، تحلیل های آماری با استفاده از آزمون غیرپارامتری من کندال، برآورد شیب سن و رگرسیون خطی معمولی (OLS) بر روی سری زمانی ماهانه XCH_4 انجام شد. نتایج این تحلیل ها نشان داد که متان در مقیاس منطقه ای دارای روندی کلی افزایشی و از نظر آماری معنادار، همراه با نوسانات فصلی و ماهانه؛ به گونه ای که میانگین سالانه (XCH_4) از ۱۸۶۲،۱۴ ppb در سال

رابطه (۲): تابع علامت

$$\text{sgn}(X_j - X_k) = \begin{cases} +1 & \text{اگر } X_j - X_k > 0 \\ 0 & \text{اگر } X_j - X_k = 0 \\ -1 & \text{اگر } X_j - X_k < 0 \end{cases}$$

رابطه (۳): واریانس آماره S در حالت بدون داده های تکراری

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

رابطه (۴): واریانس آماره S در حالت وجود داده های تکراری

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p - 1)(2t_p + 5) \right]$$

رابطه (۵): آماره استاندارد شده Z

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{اگر } S > 0 \\ 0 & \text{اگر } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{اگر } S < 0 \end{cases}$$

رابطه (۶): ضریب کندال τ

$$\tau = \frac{S}{\frac{n(n-1)}{2}}$$

رابطه (۷): شیب سن بین دو مشاهده

$$Q_i = \frac{X_j - X_k}{j - k} \text{ برای } j > k$$

رابطه (۸): شیب برآوردگر سن

$$Q_{\text{med}} = \text{Median}(Q_i)$$

رابطه (۹): مدل رگرسیون خطی معمولی (OLS)

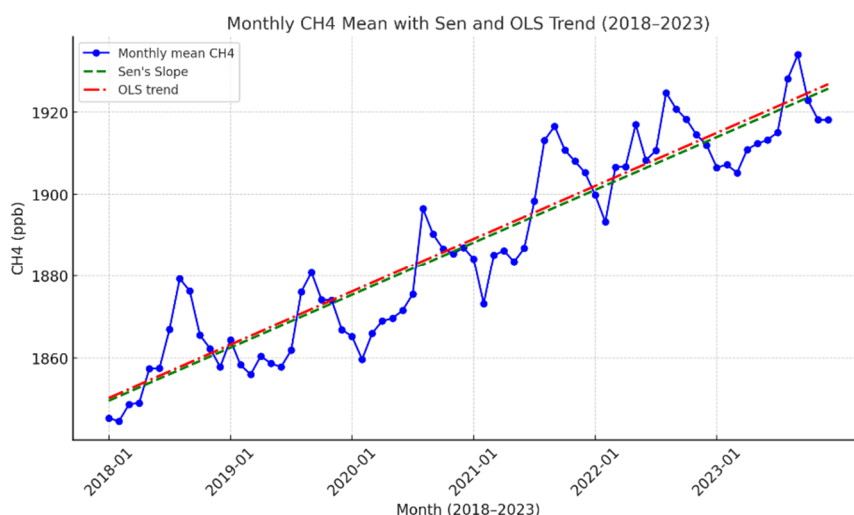
$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon_t$$

در این روابط، n تعداد مشاهدات، X_j و X_k مقادیر متغیر در زمان های j و k ، g تعداد گروه های داده های تکراری، t_p تعداد داده های تکراری در گروه p ، S آماره

شکل (۲) نتایج تحلیل روند بر اساس آزمون من-کندال و رگرسیون OLS را نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود، تغییرات ماهانه XCH_4 در خاورمیانه علاوه بر نوسانات فصلی مشخص، یک روند صعودی پایدار را دنبال می‌کند. نزدیکی شیب خط Sen و خط OLS نشان می‌دهد که برآورد نرخ افزایش متان نسبت به روش تحلیل، از پایداری مناسبی برخوردار است. همچنین، مقدار نسبتاً بالای ضریب تعیین در مدل OLS بیانگر آن است که بخش قابل توجهی از تغییرپذیری سری زمانی توسط مؤلفه روند توضیح داده می‌شود. بنابراین، افزایش XCH_4 در منطقه را نمی‌توان صرفاً ناشی از نوسانات کوتاه مدت دانست، بلکه این تغییرات نشان دهنده یک روند تدریجی و پایدار در پس‌زمینه جوی خاورمیانه است.

۲۰۱۸ به ۱۹۱۸,۷۷ ppb در سال ۲۰۲۳ رسید و در کل دوره حدود ۵۶,۶۳ ppb، معادل ۳,۰۴ درصد، افزایش یافت.

آزمون Mann-Kendall مقدار $Z=9,46$ ، $p\text{-value}=3,04 \times 10^{-21}$ و $\tau=0,75$ را نشان داد که بیانگر وجود روند افزایشی قوی در کل دوره مطالعه است. همچنین، برآوردگر شیب سن نرخ افزایش XCH_4 را ۱,۰۷ ppb در ماه، معادل ۱۲,۸۷ ppb در سال برآورد کرد. نتایج رگرسیون OLS نیز با این برآورد هم‌راستا بود و شیب خطی ۱,۰۸ ppb در ماه، معادل ۱۲,۹۴ ppb در سال را با $R^2=0,869$ نشان داد. این هم‌گرایی بین نتایج سه روش آماری، بیانگر روند افزایشی متان در خاورمیانه است و نشان می‌دهد که در بازه مورد مطالعه، XCH_4 سالانه حدود ۱۲ ppb تا ۱۳ افزایش یافته است.



شکل ۲: آزمون Mann-Kendall و رگرسیون OLS برای بررسی روند تغییرات میانگین ماهانه غلظت متان (CH_4) طی دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳.

مقیاس منطقه‌ای است. همچنین، بیشترین افزایش سالانه در سال ۲۰۲۱ و کمترین آن در سال ۲۰۱۹ مشاهده شد، با این حال جهت کلی تغییرات در تمام دوره صعودی باقی ماند. این یافته‌ها با نتایج حاصل از تحلیل روند آماری نیز هم‌خوانی دارد و نشان می‌دهد که افزایش XCH_4 در خاورمیانه در سال‌های اخیر از یک الگوی نسبتاً پایدار پیروی کرده است.

تغییرات سالانه متان در خاورمیانه: برای بررسی رفتار بین‌سالی متان، میانگین‌های سالانه XCH_4 طی دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ محاسبه و در جدول (۱) ارائه شد. نتایج نشان داد که میانگین سالانه XCH_4 از ۱۸۶۲,۱۴ ppb در سال ۲۰۱۸ به ۱۹۱۸,۷۷ ppb در سال ۲۰۲۳ افزایش یافته است. این تغییر معادل ۵۶,۶۳ ppb در کل دوره مطالعه است و بیانگر یک روند افزایشی کلی پیوسته در

جدول ۱: تغییرات سالانه و فصلی متان جوی خاورمیانه از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳

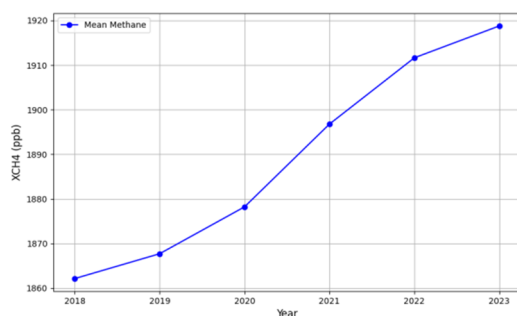
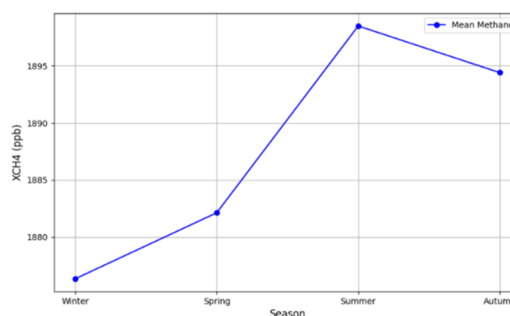
سال	میانگین سالانه ppb	نرخ افزایش سالانه Ppb در سال	نرخ رشد %	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	حداقل	حداکثر	انحراف معیار
۲۰۱۸	۱۸۶۲,۱۴	-	-	۱۸۴۷,۰۵	۱۸۵۴,۷۶	۱۸۷۴,۳۵	۱۸۶۱,۸۲	۱۶۷۶,۵۶	۲۴۳۵,۲۱	۲۱,۰۵
۲۰۱۹	۱۸۶۷,۷۱	۵,۵۷	۰,۳۹۸	۱۸۵۹,۸۱	۱۸۵۸,۸۳	۱۸۷۴,۰۹	۱۸۷۱,۶۵	۱۶۶۸,۸۱	۲۶۰۴,۹۴	۱۷,۹۹
۲۰۲۰	۱۸۷۸,۲۲	۱۰,۵۱	۰,۵۵۹	۱۸۶۳,۶۴	۱۸۷۰,۳۳	۱۸۸۸,۰۱	۱۸۸۶,۴۵	۱۶۶۶,۴۹	۲۹۰۰,۷۲	۲۰,۱۶
۲۰۲۱	۱۸۹۶,۷۷	۱۸,۵۵	۰,۹۷۸	۱۸۸۱,۲۰	۱۸۸۵,۶۴	۱۹۱۰	۱۹۰۸,۴۵	۱۶۶۱,۰۷	۲۴۹۱,۳۸	۲۲,۰۱
۲۰۲۲	۱۹۱۱,۶۳	۱۴,۸۶	۰,۷۷۷	۱۸۹۹,۹۵	۱۹۱۱,۰۲	۱۹۱۸,۹۳	۱۹۱۵,۳۸	۱۶۴۳,۱	۲۹۳۷,۵	۲۰,۹۹
۲۰۲۳	۱۹۱۸,۷۷	۷,۱۴	۰,۳۷۲	۱۹۰۶,۴۱	۱۹۱۲,۳۱	۱۹۲۵,۷۷	۱۹۲۲,۸۷	۱۷۰۳,۰۴	۲۳۵۸,۱۵	۲۰,۴۴

شکل (۳) روند میانگین سالانه غلظت ستونی متان (XCH_4) در خاورمیانه طی دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، میانگین سالانه XCH_4 در کل دوره مورد مطالعه روندی افزایشی و نسبتاً یکنواخت داشته است؛ به طوری که این مقدار از ۱۸۶۲,۱۴ ppb در سال ۲۰۱۸ به ۱۹۱۸,۷۷ ppb در سال ۲۰۲۳ افزایش یافته است. این الگو نشان می‌دهد که غلظت ستونی متان در مقیاس منطقه ای طی سال‌های اخیر به طور پیوسته افزایش یافته و بیشترین افزایش در فاصله سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۱ مشاهده شده است که نشان‌دهنده افزایش ۳۳,۴۱ ppb، معادل حدود ۱,۷۸ درصد، در این بازه است و به دلیل محدودیت ایستگاه پایش زمینی متان اعتبار سنجی میدانی مستقل برای نقشه‌ها انجام نشد با این حال، برای افزایش اطمینان از نتایج، از داده‌های کنترل کیفیت شده Sentinel-5P/TROPOMI استفاده شد و فقط پیکسل‌های معتبر در محاسبه میانگین‌های سالانه و فصلی وارد شدند. در مجموع، روند صعودی شکل (۳) با نتایج آزمون‌های آماری روند نیز هم‌خوانی دارد و تداوم افزایش XCH_4 در خاورمیانه را در بازه مورد بررسی تأیید می‌کند.

در مقایسه با مطالعات پیشین، نتایج این پژوهش با شواهد منطقه‌ای و جهانی درباره روند افزایشی متان هم‌خوانی دارد. مطالعات بودجه جهانی متان نشان داده‌اند که انتشارها و غلظت‌های جوی CH_4 در دهه‌های اخیر روندی افزایشی داشته‌اند و افزایش انتشار در برخی مناطق، به‌ویژه در عرض‌های

گرمسیری و عرض‌های میانی نیمکره شمالی، قابل توجه بوده است (سانوآ و همکاران^۱، ۲۰۲۰: ۱۵۶۲، ۱۵۹۶). در مقیاس خاورمیانه و شمال آفریقا نیز پژوهش‌های مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای، اهمیت بخش نفت و گاز را در الگوهای انتشار متان برجسته کرده‌اند (چن و همکاران، ۲۰۲۳: ۵۹۴۵-۵۹۴۶). همچنین، الگوهای مکانی به دست آمده با نتایج مطالعات پیشین مقایسه شد و در متن تأکید گردید که نقشه‌ها نشان‌دهنده الگوی فضایی غلظت ستونی متان XCH_4 هستند، نه نقشه قطعی انتشار یا انتساب مستقیم منابع انتشار.

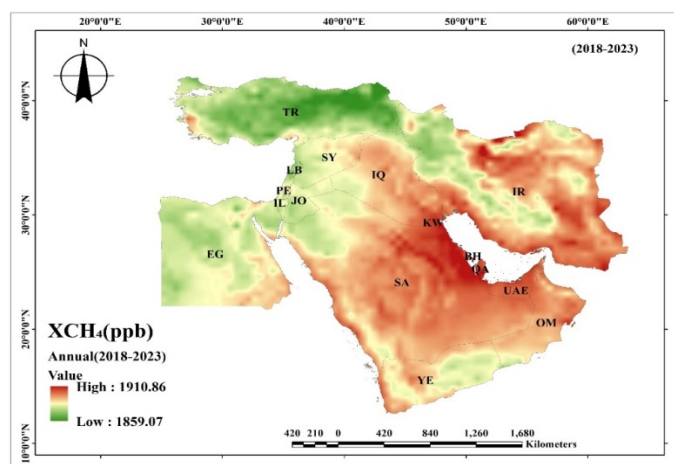
چرخه فصلی XCH_4 در خاورمیانه: برای بررسی رفتار فصلی متان در خاورمیانه، میانگین فصلی XCH_4 طی دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ محاسبه و در شکل (۴) ارائه شد. نتایج نشان می‌دهد که متان در مقیاس منطقه ای دارای یک چرخه فصلی مشخص و نسبتاً پایدار است؛ به گونه‌ای که کمترین مقدار میانگین فصلی در زمستان با ۱۸۷۶,۲ ppb مشاهده شد، سپس این مقدار در بهار به ۱۸۸۲,۱ ppb افزایش یافت، در تابستان به بیشینه ۱۸۹۸,۳ ppb رسید و در پاییز با کاهش نسبی به ۱۸۹۴,۴ ppb محدود شد. این الگو نشان می‌دهد که XCH_4 در خاورمیانه از زمستان تا تابستان روندی افزایشی دارد و پس از آن در پاییز اندکی کاهش می‌یابد؛ هرچند مقادیر پاییزی همچنان بالاتر از زمستان و بهار باقی می‌مانند.

شکل ۴: روند میانگین فصلی XCH_4 شکل ۳: روند میانگین سالانه XCH_4

همچنین، مطالعات مبتنی بر داده‌های TROPOMI و GOSAT در مناطق دیگر نشان داده‌اند که توزیع مکانی و روند زمانی XCH_4 می‌تواند در ارتباط با پهنه‌های کشاورزی، دامی، تالابی و الگوهای انتقال منطقه‌ای تغییر کند (آدامه و همکاران^۱، ۲۰۲۵). از این رو، الگوی فصلی به دست آمده در پژوهش حاضر را می‌توان در چارچوب رفتار فصلی شناخته‌شده متان و اثر هم‌زمان عوامل اقلیمی، زیستی، شیمیایی و انسان‌زاد تفسیر کرد.

الگوی مکانی سالانه و فصلی XCH_4 در خاورمیانه: نقشه میانگین سالانه XCH_4 نشان می‌دهد که توزیع متان در خاورمیانه یکنواخت نیست و برخی پهنه‌ها به صورت پایدار دارای مقادیر بالاتری نسبت به سایر نواحی هستند. به‌طور کلی، بخش‌هایی از شبه جزیره عربستان و نواحی پیرامون خلیج فارس، به ویژه کویت، شرق عربستان سعودی، قطر، بحرین، امارات متحده عربی و بخش‌هایی از جنوب عراق، در زمره نواحی با مقادیر بالاتر قرار می‌گیرند. در مقابل، بخش‌های شمالی منطقه، به‌ویژه ترکیه، در مقیاس سالانه مقادیر پایین‌تری از XCH_4 را نشان می‌دهند. این الگو بیانگر وجود ناهمگنی فضایی مشخص در توزیع متان منطقه‌ای است.

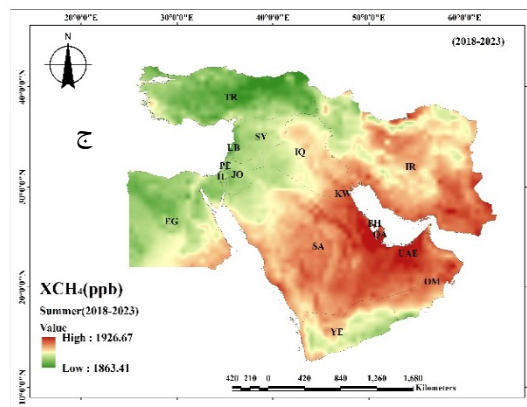
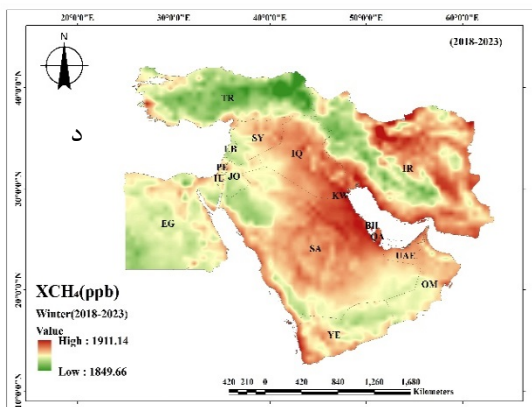
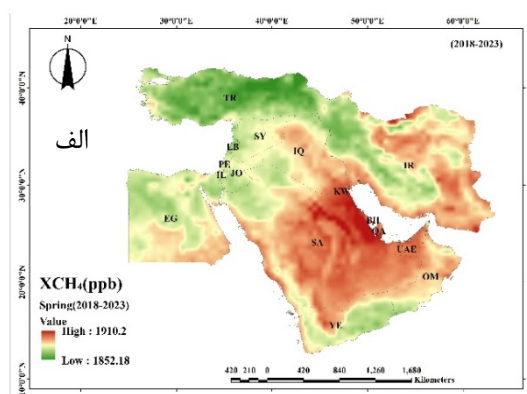
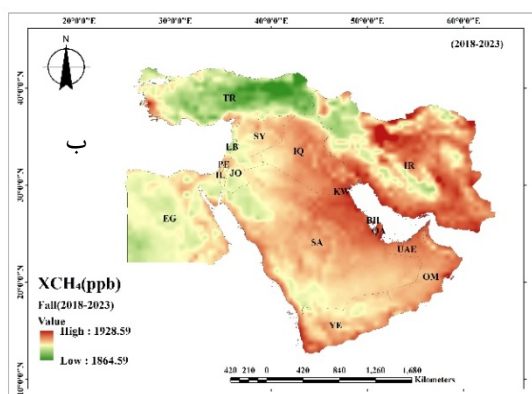
در مجموع، شکل (۴) بیانگر آن است که تغییرات فصلی XCH_4 در خاورمیانه از یک الگوی منظم و قوسی شکل پیروی می‌کند که در آن تابستان فصل اوج و زمستان فصل کمینه است. شکل (۴) نشان می‌دهد که XCH_4 در خاورمیانه از یک چرخه فصلی مشخص پیروی می‌کند؛ به گونه‌ای که تابستان بالاترین و زمستان پایین‌ترین میانگین فصلی را دارد. این الگوی منظم بیانگر آن است که رفتار فصلی XCH_4 در مقیاس منطقه‌ای صرفاً ناشی از نوسانات مقطعی نیست، بلکه از یک ساختار زمانی نسبتاً پایدار تبعیت می‌کند. بنابراین، نتایج این بخش وجود یک الگوی قوسی شکل فصلی را برای متان در منطقه تأیید می‌کند که در آن زمستان فصل کمینه، تابستان فصل اوج، و پاییز فصل کاهش نسبی پس از اوج تابستانی است. نتایج این بخش همچنین با یافته‌های منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای درباره وجود چرخه فصلی در متان هم‌خوانی دارد. برای نمونه، در مطالعه‌ای بر روی ایران با استفاده از داده‌های GOSAT، همبستگی مثبت CH_4 با دمای هوا و دمای سطح زمین و همبستگی منفی آن با رطوبت و پوشش گیاهی گزارش شده و مناطق خشک، کم‌پوشش و دارای دمای سطحی بالاتر، با مقادیر بالاتر CH_4 همراه بوده‌اند (موسوی و فلاحکار، ۲۰۲۰).



شکل ۵: الگوی مکانی میانگین سالانه غلظت ستونی متان در خاورمیانه طی دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳

بررسی نقشه‌های میانگین فصلی نیز نشان می‌دهد که این ناهمگنی فضایی در همه فصل‌ها مشاهده می‌شود، هرچند شدت و گستره پهنه‌های با مقادیر بالاتر از فصلی به فصل دیگر تغییر می‌کند. در تمامی فصل‌ها، نواحی پیرامون خلیج فارس و بخش‌هایی از شرق شبه جزیره عربستان به عنوان پهنه‌های نسبتاً

پُرمتان دیده می‌شوند. با این حال، در تابستان و پاییز، گستره فضایی نواحی با XCH_4 بالاتر نسبت به زمستان و بهار بیشتر به نظر می‌رسد و بخش‌هایی از عراق، کویت، شرق عربستان سعودی، قطر، امارات متحده عربی و برخی نواحی ایران برجسته‌تر می‌شوند.

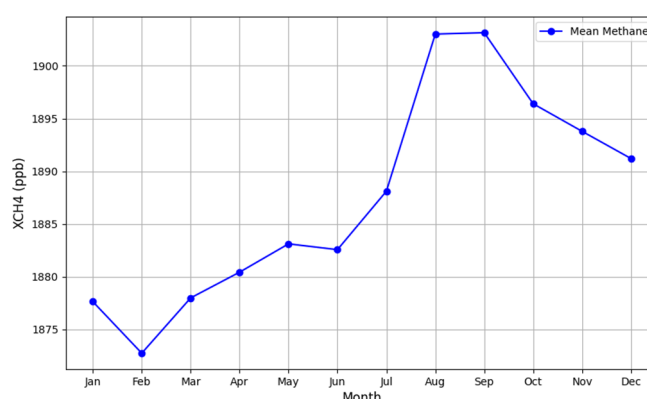


شکل ۶: نقشه‌های میانگین فصلی غلظت ستونی متان در خاورمیانه طی دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳:

(الف) بهار، (ب) تابستان، (ج) پاییز، (د) زمستان.

در مقابل، زمستان با مقادیر پایین تر و الگوی نسبتاً ضعیف تری همراه است، هرچند هسته‌های اصلی پیرامون خلیج فارس همچنان قابل مشاهده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که تغییرات فصلی متان در خاورمیانه تنها در میانگین‌های زمانی خلاصه نمی‌شود،

بلکه دارای بُعد مکانی مشخصی نیز هست. با این حال، چون این پژوهش بر پایه غلظت ستونی XCH_4 انجام شده است، الگوهای مشاهده‌شده باید به عنوان توصیفی از رفتار فضایی-فصلی متان تفسیر شوند و نه به عنوان انتساب مستقیم منشأهای انتشار.



شکل ۷: روند میانگین ماهانه غلظت ستونی متان در خاورمیانه طی دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳

ترکیب نتایج زمانی و مکانی نشان می‌دهد که رفتار متان در خاورمیانه تنها به روندهای زمانی محدود نمی‌شود، بلکه از الگوهای فضایی مشخصی نیز تبعیت می‌کند. هم‌پوشانی نسبی مقادیر بالاتر XCH_4 با برخی پهنه‌های انرژی محور منطقه، به ویژه پیرامون خلیج فارس، با مطالعات پیشین درباره اهمیت بخش نفت و گاز در الگوهای انتشار متان در خاورمیانه و شمال آفریقا سازگار است؛ به طوری که چن و همکاران با استفاده از داده‌های TROPOMI، کانون‌های انتشار نفت و گاز را در برخی کشورهای منطقه و همچنین در نواحی فراساحلی خلیج فارس شناسایی کرده‌اند (چن و همکاران، ۲۰۲۳: ۵۹۵۳، ۵۹۶۲). همچنین، تشدید نسبی الگوهای فضایی در فصل‌های گرم با یافته‌های مطالعاتی که بیشینه XCH_4 را در تابستان و پاییز و کمینه آن را در زمستان و بهار گزارش کرده‌اند، هم‌خوانی دارد (موسوی و همکاران، ۲۰۲۴: ۸). در مطالعات مبتنی بر داده‌های TROPOMI و GOSAT در مناطق دیگر نیز نشان داده شده است که توزیع مکانی و روند زمانی XCH_4 می‌تواند با پهنه‌های کشاورزی، دامی و تالابی و همچنین ناهمگنی‌های منطقه‌ای در

الگوی انتشار و انتقال مرتبط باشد (آدامه و همکاران، ۲۰۲۵). با این حال، از آنجا که پژوهش حاضر بر پایه داده‌های غلظت ستونی XCH_4 انجام شده است، این الگوها باید به عنوان شواهدی از رفتار فضایی-فصلی متان در مقیاس منطقه‌ای تفسیر شوند، نه به عنوان انتساب قطعی منشأهای انتشار. در مجموع، نقشه‌های سالانه و فصلی نشان می‌دهند که تحلیل روند زمانی به تنهایی برای توصیف کامل رفتار متان در خاورمیانه کافی نیست و در نظر گرفتن ناهمگنی فضایی می‌تواند به تفسیر دقیق تر الگوهای منطقه‌ای کمک کند.

تغییرات ماهانه XCH_4 در خاورمیانه: برای بررسی دقیق تر رفتار زمانی متان در خاورمیانه، میانگین ماهانه XCH_4 طی دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ محاسبه و در شکل (۷) ارائه شد. همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود، تغییرات ماهانه XCH_4 از یک الگوی منظم فصلی پیروی می‌کند؛ به گونه‌ای که کمینه میانگین ماهانه در فوریه با ۱۸۷۳ ppb و بیشینه آن در اوت و سپتامبر با حدود ۱۹۰۳ ppb ثبت شده است. این الگو نشان می‌دهد که XCH_4 در ماه‌های ابتدایی سال در سطوح پایین تری قرار دارد، سپس از بهار به تدریج

طوری که میانگین سالانه آن از ۱۸۶۲,۱۴ ppb در سال ۲۰۱۸ به ۱۹۱۸,۷۷ ppb در سال ۲۰۲۳ افزایش یافت. همچنین، نتایج آزمون-Mann Kendall، برآوردگر شیب سن و رگرسیون OLS همگی تداوم این روند افزایشی را تأیید کردند و نشان دادند که XCH_4 در خاورمیانه طی دوره مورد مطالعه به طور متوسط سالانه حدود ۱۲ تا ۱۳ ppb افزایش یافته است.

از نظر زمانی، نتایج نشان داد که XCH_4 در خاورمیانه از یک چرخه فصلی منظم پیروی می کند؛ به گونه ای که کمینه مقادیر در زمستان، افزایش تدریجی در بهار، اوج در تابستان و کاهش نسبی در پاییز مشاهده شد. تحلیل ماهانه نیز همین رفتار را در مقیاسی دقیق تر تأیید کرد و نشان داد که کمترین میانگین ماهانه در فوریه و بیشترین مقدار در اوت-سپتامبر رخ می دهد. این یافته ها بیانگر آن است که رفتار زمانی متان در خاورمیانه نه تنها در مقیاس سالانه، بلکه در مقیاس های فصلی و ماهانه نیز از یک الگوی پایدار تبعیت می کند.

از نظر فضایی، نقشه های میانگین سالانه و فصلی نشان دادند که توزیع XCH_4 در خاورمیانه یکنواخت نیست و نواحی پیرامون خلیج فارس و بخش هایی از شبه جزیره عربستان در مقایسه با بخش های شمالی منطقه، مقادیر بالاتری را نشان می دهند. این نتایج بیانگر آن است که تحلیل روند زمانی به تنهایی برای توصیف کامل رفتار متان در خاورمیانه کافی نیست و در نظر گرفتن ناهمگنی فضایی نیز برای تفسیر دقیق تر الگوهای منطقه ای اهمیت دارد. با این حال، از آنجا که این پژوهش بر پایه غلظت ستونی XCH_4 انجام شده است، نتایج آن باید به عنوان شواهدی از رفتار زمانی و فضایی متان در مقیاس منطقه ای تفسیر شوند و نه به عنوان انتساب قطعی منشأهای انتشار در مجموع، یافته های این پژوهش نشان می دهد که پایش ماهواره ای می تواند ابزار مناسبی برای رصد پیوسته روند متان در خاورمیانه و توصیف الگوهای کلی زمانی و فضایی آن باشد.

افزایش یافته، در اواخر تابستان و اوایل پاییز به اوج می رسد و در ادامه تا پایان سال کاهش نسبی پیدا می کند. دامنه تغییرات میانگین ماهانه در حدود ۳۰ ppb برآورد شد که نشان دهنده تداوم چرخه فصلی XCH_4 در مقیاس منطقه ای است.

شکل (۷) نشان می دهد که الگوی زمانی XCH_4 در مقیاس ماهانه از یک چرخه منظم فصلی پیروی می کند. بر اساس این شکل، مقادیر XCH_4 در زمستان و اواخر زمستان پایین تر است، از بهار روندی افزایشی پیدا می کند، و در اواخر تابستان و اوایل پاییز به بیشترین مقدار می رسد. این الگو نشان می دهد که رفتار ماهانه متان در خاورمیانه با نتایج به دست آمده در مقیاس فصلی هم خوانی دارد و چرخه فصلی متان را در مقیاس زمانی ریزتر نیز تأیید می کند. بنابراین، تغییرات ماهانه XCH_4 در منطقه از انسجام زمانی مناسبی برخوردار است و از یک الگوی پایدار سالانه تبعیت می کند.

مطالعه موسوی و همکاران نشان داد که XCH_4 در ایران دارای چرخه فصلی مشخصی است؛ به گونه ای که بیشینه آن در تابستان، به ویژه ماه های اوت و سپتامبر، و کمینه آن در فصل سرد/اوایل بهار گزارش شده است. این رفتار با اثر هم زمان متغیرهای هواشناسی، شرایط محیطی و فعالیت های انسان زاد بر تغییرات متان سازگار دانسته شده است (موسوی و همکاران، ۲۰۲۴). از این رو، الگوی ماهانه به دست آمده در پژوهش حاضر با یافته های پیشین هم خوانی دارد و نشان می دهد که تغییرات XCH_4 در خاورمیانه در مقیاس ماهانه نیز از یک چرخه زمانی قابل تشخیص پیروی می کند.

نتیجه گیری

این پژوهش با استفاده از داده های ماهواره Sentinel-5P/TROPOMI، روند زمانی و الگوی فصلی غلظت ستونی متان (XCH_4) را در خاورمیانه طی دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ بررسی کرد. نتایج نشان داد که XCH_4 در مقیاس منطقه ای دارای روندی افزایشی، یکنواخت و از نظر آماری معنادار است؛ به

منابع

۱. حجام، سهراب؛ خوشخو، یونس؛ و شمس‌الدین‌وندی، رضا. (۱۳۸۷). تحلیل روند تغییرات بارندگی‌های فصلی و سالانه چند ایستگاه منتخب در حوزه مرکزی ایران با استفاده از روش‌های ناپارامتری. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، (۶۳)، ۱۵۱-۱۵۹.
<https://sid.ir/paper/5428/fa>
۲. ملکی نژاد، حسین؛ سلیمانی مطلق، مهدی؛ جایدی، اعظم؛ شاطر آشوری، سمیه. (۱۳۹۱). تحلیل روند تغییرات بارندگی و خشکسالی با استفاده از آزمونهای من-کندال و سن در استان تهران. نیوار، ۳۷ (۸۱-۸۰)، ۴۳-۵۴.
3. Adame, J. A., Padilla, R., Parker, R. J., & Hidalgo, P. J. (2025). Spatial distribution pattern and long-term trend of atmospheric methane in the Atlantic-Mediterranean transition region based on TROPOMI and GOSAT measurements. *Science of the Total Environment*, 958, 178006. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178006>
4. Chen, Z., Jacob, D. J., Gautam, R., Omara, M., Stavins, R. N., Stowe, R. C., Nesser, H., Sulprizio, M. P., Lorente, A., Varon, D. J., Lu, X., Shen, L., Qu, Z., Pendergrass, D. C., & Hancock, S. (2023). Satellite quantification of methane emissions and oil-gas methane intensities from individual countries in the Middle East and North Africa: Implications for climate action. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 5945–5967.
<https://doi.org/10.5194/acp-23-5945-2023>
5. Cruz, J.-L., & Rossi-Hansberg, E. (2024). The economic geography of global warming. *The Review of Economic Studies*, 91(2), 899–939. <https://doi.org/10.1093/restud/rdad042>
6. Dogniaux, M., Maasakkers, J. D., Varon, D. J., & Aben, I. (2024). Report on Landsat 8 and Sentinel-2B observations of the Nord Stream 2 pipeline methane leak. *Atmospheric Measurement Techniques*, 17, 2777–2787. <https://doi.org/10.5194/amt-17-2777-2024>
7. He, J., Naik, V., Horowitz, L. W., Dlugokencky, E., & Thoning, K. (2020). Investigation of the global methane budget over 1980–2017 using GFDL-AM4.1. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 805–827. <https://doi.org/10.5194/acp-20-805-2020>
8. Heydarizad, M., Gimeno, L., Sorí, R., Minaei, F., & Eskandari Mayvan, J. (2021). The stable isotope characteristics of precipitation in the Middle East highlighting the link between the Köppen climate classifications and the $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values of precipitation. *Water*, 13(17), 2397. <https://doi.org/10.3390/w13172397>
9. Hu, Y., Yue, X., Tian, C., Zhou, H., Fu, W., Zhao, X., Zhao, Y., & Chen, Y. (2023). Identifying the main drivers of the spatiotemporal variations in wetland methane emissions during 2001–2020. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1275742.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1275742>
10. Jacob, D. J., Turner, A. J., Maasakkers, J. D., Sheng, J., Sun, K., Liu, X., Chance, K., Aben, I., McKeever, J., & Frankenberg, C. (2016). Satellite observations of atmospheric methane and their value for quantifying methane emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 14371–14396. <https://doi.org/10.5194/acp-16-14371-2016>
11. Kendall, M. G. (1975). Rank correlation methods (4th ed.). Charles Griffin.
12. Lin, X., Zhang, W., Crippa, M., Peng, S., Han, P., Zeng, N., Yu, L., & Wang, G. (2021). A comparative study of anthropogenic CH₄ emissions over China based on the ensembles of bottom-up inventories. *Earth System Science Data*, 13, 1073–1088.
<https://doi.org/10.5194/essd-13-1073-2021>
13. Lorente, A., Borsdorff, T., Butz, A., Hasekamp, O., aan de Brugh, J., Schneider, A., Wu, L., Hase, F., Kivi, R., Wunch, D., Pollard, D. F., Shiomi, K., Deutscher, N. M., Velasco, V. A., Roehl, C. M., Wennberg, P. O., Warneke, T., & Landgraf, J. (2021). Methane retrieved from TROPOMI: Improvement of the data product and validation of the first 2 years of measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14, 665–684.
<https://doi.org/10.5194/amt-14-665-2021>
14. Maasakkers, J. D., Jacob, D. J., Sulprizio, M. P., Scarpelli, T. R., Nesser, H., Sheng, J., Zhang, Y., Lu, X., Bloom, A. A., Bowman, K. W., Worden, J. R., & Parker, R. J. (2021). 2010–2015 North American methane emissions, sectoral contributions, and trends: A high-

- resolution inversion of GOSAT observations of atmospheric methane. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 4339–4356. <https://doi.org/10.5194/acp-21-4339-2021>
15. Mousavi, S. M., & Falahatkar, S. (2020). Spatiotemporal distribution patterns of atmospheric methane using GOSAT data in Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 4191–4207. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00378-5>
 16. Mousavi, S. M., Dinan, N. M., Ansarifard, S., Borhani, F., Darvishi, A., Mustafa, F., & Naghibi, A. (2024). Unveiling the drivers of atmospheric methane variability in Iran: A 20-year exploration using spatiotemporal modeling and machine learning. *Environmental Challenges*, 15, 100946. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100946>
 17. Nguyen, N. H. (2024). From source to sink: Measuring and modeling processes affecting methane emissions and loss [Doctoral dissertation, California Institute of Technology].
 18. Saunio, M., Stavert, A. R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Raymond, P. A., Dlugokencky, E. J., Houweling, S., Patra, P. K., Ciais, P., Arora, V. K., Bastviken, D., Bergamaschi, P., Blake, D. R., Brailsford, G., Bruhwiler, L., Carlson, K. M., Carrol, M., ... Zhuang, Q. (2020). The global methane budget 2000–2017. *Earth System Science Data*, 12, 1561–1623. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>
 19. Seber, G. A. F., & Lee, A. J. (2003). *Linear regression analysis* (2nd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780471722199>
 20. Tarazkar, M. H., Kargar Dehbidi, N., Ansari, R. A., & Pourghasemi, H. R. (2021). Factors affecting methane emissions in OPEC member countries: Does the agricultural production matter? *Environment, Development and Sustainability*, 23(5), 6734–6748. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00887-8>
 21. Veefkind, J. P., Aben, I., McMullan, K., Förster, H., de Vries, J., Otter, G., Claas, J., Eskes, H. J., de Haan, J. F., Kleipool, Q., van Weele, M., Hasekamp, O., Hoogeveen, R., Landgraf, J., Snel, R., Tol, P., Ingmann, P., Voors, R., Kruizinga, B., & 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>
 22. World Bank. (2017). *World Development Indicators*. World Bank. <https://www.worldbank.org/>
 23. World Bank. (2020). *World Development Indicators*. World Bank. <https://www.worldbank.org/>

