



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Monitoring methane emissions in Iran using Sentinel-P5 satellite data: Analyzing emission trends and identifying critical sources (2019-2023)

B. Babaei¹, R. Dousti^{1,*}, E. Javadnia^{1,*}, S. Kiaei¹, A.H Abdi², H. Karami²¹ Department of Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran² Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 14 May 2025
Reviewed: 05 July 2025
Revised: 09 September 2025
Accepted: 22 November 2025

KEYWORDS:

Methane Emissions
Climate Change
Sentinel-5p Satellite
TROPOMI Sensor
Remote Sensing

* Corresponding authors

✉ javadnia@znu.ac.ir

✉ r_dousti@znu.ac.ir

☎ (+9824) 33054504

Background and Objectives: Methane, as the second most important greenhouse gas after carbon dioxide, plays a significant role in intensifying global warming. Its global warming potential (GWP) over a 100-year period is estimated to be about 28 times greater than that of carbon dioxide. According to reports by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), approximately 40% of anthropogenic methane emissions are linked to the energy sector, particularly the oil and gas industries. As one of the major producers of oil and gas worldwide, Iran faces serious challenges in monitoring and controlling methane emissions—a matter of particular importance within the framework of international commitments such as the Paris Agreement. The Sentinel-5P satellite, equipped with the TROPOMI sensor, provides high spatial resolution and daily coverage, enabling continuous monitoring and quantification of methane emissions on a global scale. This study aims to examine the temporal trends of methane emissions in Iran over a five-year period (2019–2023) and to identify critical areas in terms of emission intensity.

Methods: This research was conducted using a descriptive–analytical approach based on time-series data derived from the TROPOMI sensor onboard the Sentinel-5P satellite within the Google Earth Engine platform. Methane concentration data with a spatial resolution of 5.5×7 km were extracted for the entire geographical extent of Iran and processed to obtain annual, seasonal, and monthly averages. To analyze temporal trends and spatial patterns, five-year variation maps and charts were generated to identify dominant trends and high-emission regions.

Findings: The results indicated an increasing trend in the annual mean methane concentration over Iran during the study period, with an estimated annual growth rate of about 0.03%. On average, methane concentrations exceeded the IPCC threshold of 1800 ppb by approximately 101.21 ppb. Seasonal analyses revealed that the highest concentrations occurred in autumn and winter, likely due to increased gas extraction activities and reduced efficiency of leakage control systems during colder periods. The total cumulative methane concentration from all sources during the five-year study period reached a considerable value of 1,487,134,705 ppb.

Conclusion: The findings highlight a serious challenge for Iran in managing and controlling methane emissions. The observed upward trend underscores the urgent need to formulate and implement effective mitigation policies. In this regard, the deployment of advanced leak detection systems and investment in modern emission control technologies can play a significant role in reducing the environmental impacts of methane.



NUMBER OF REFERENCES

35



NUMBER OF FIGURES

10



NUMBER OF TABLES

0

مقاله پژوهشی

پایش انتشار متان در ایران با استفاده از داده‌های ماهواره Sentinel-P5: تحلیل روند انتشار و شناسایی منابع بحرانی (۲۰۱۹-۲۰۲۳)

بهناز بابائی^۱، رضا دوستی^{۱*}، اسلام جوادنیا^{۱*}، سینا کیائی^۱، امیرحسین عبدی^۲، حشمت کرمی^۲^۱ گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران^۲ پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: متان به عنوان دومین گاز گلخانه‌ای مهم پس از دی‌اکسید کربن، نقش چشمگیری در تشدید پدیده گرمایش جهانی دارد. پتانسیل گرمایش جهانی این گاز در بازه زمانی صدساله، حدود ۲۸ برابر بیشتر از دی‌اکسید کربن برآورد شده است. بر اساس گزارش‌های هیئت بین‌دولتی تغییرات اقلیمی (IPCC)، حدود ۴۰ درصد از انتشار متان با منشأ انسانی به بخش انرژی، به‌ویژه صنایع نفت و گاز، مربوط می‌شود. ایران به عنوان یکی از تولیدکنندگان عمده نفت و گاز جهان، با چالشی جدی در زمینه کنترل و پایش انتشار این گاز گلخانه‌ای مواجه است؛ موضوعی که در چارچوب تعهدات بین‌المللی همچون توافق‌نامه پاریس از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ماهواره Sentinel-5P مجهز به حسگر TROPOMI با قابلیت تفکیک مکانی بالا و پوشش روزانه، امکان پایش مستمر و کمی‌سازی انتشار متان را در مقیاس جهانی فراهم کرده است. هدف این پژوهش، بررسی روند تغییرات انتشار متان در ایران طی دوره پنج‌ساله (۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳) و شناسایی مناطق بحرانی از نظر میزان انتشار است.

روش‌ها: این پژوهش با رویکرد توصیفی-تحلیلی و بر پایه سری‌های زمانی داده‌های روزانه سنجنده TROPOMI ماهواره Sentinel-5P در پلتفرم Google Earth Engine انجام شد. داده‌های غلظت متان با تفکیک مکانی ۷×۵/۵ کیلومتر برای کل محدوده جغرافیایی ایران استخراج و به صورت میانگین‌های سالانه، فصلی و ماهانه پردازش گردید. به منظور تحلیل روندهای زمانی و الگوهای مکانی، نقشه‌ها و نمودارهای تغییرات پنج‌ساله تولید و بررسی شدند تا روندهای غالب و نواحی با انتشار بالا شناسایی شوند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که میانگین سالانه غلظت متان در ایران طی دوره مورد مطالعه روندی افزایشی داشته و نرخ رشد سالانه آن حدود ۰/۰۳ درصد برآورد شده است. مقدار میانگین ثبت‌شده، به طور متوسط ۱۰/۱۲۱ ppb بالاتر از آستانه ۱۸۰۰ ppb تعیین‌شده توسط IPCC بوده‌اند. بررسی تغییرات فصلی نشان داد بیشترین میزان انتشار در فصل‌های پاییز و زمستان رخ می‌دهد که احتمالاً ناشی از افزایش فعالیت‌های استخراج گاز و کاهش کارایی سامانه‌های کنترل نشت در دوره‌های سرد سال است. مجموع کل انتشار متان از تمامی منابع طی پنج سال، به رقم قابل توجه ۱'۴۸۷'۱۳۴'۷۰۵ ppb رسید.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این پژوهش بیانگر چالش جدی ایران در زمینه مدیریت و کنترل انتشار متان است. روند افزایشی این گاز گلخانه‌ای، ضرورت تدوین و اجرای سیاست‌های مؤثر کاهش انتشار را برجسته می‌سازد. در این راستا، بهره‌گیری از سامانه‌های پیشرفته تشخیص نشت و سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین کنترل انتشار می‌تواند نقش بسزایی در کاهش اثرات زیست‌محیطی ایفا کند.

* نویسنده مسئول

javadnia@znu.ac.ir

r_dousti@znu.ac.ir

۰۲۴-۲۳۰۵۴۵۰۴

مقدمه

اضطراری اقلیمی " (Climate Emergency Brake) توصیف می‌شود، چراکه با توجه به عمر نسبتاً کوتاه‌تر متان در جو، کاهش انتشار آن می‌تواند نسبت به دی‌اکسید کربن تأثیرات اقلیمی سریع‌تری به همراه داشته باشد. این ویژگی، کاهش متان را به یک راهبرد کلیدی و مؤثر برای مقابله با گرمایش جهانی در بازه زمانی کوتاه‌مدت تبدیل می‌کند. [۲، ۴].

متان از طیف گسترده‌ای از منابع منتشر می‌شود که فعالیت‌های انسانی در سطح جهانی، اصلی‌ترین عامل آن به شمار می‌روند. این منابع شامل

گاز متان (CH₄) پس از کربن دی‌اکسید دومین گاز گلخانه‌ای مهم ناشی از فعالیت‌های انسانی با عمر نسبتاً کوتاه در جو (۱±۹ سال) است که پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) صد ساله‌ی آن ۲۸ برابر بزرگ‌تر از دی‌اکسید کربن می‌باشد و نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییرات اقلیمی ایفا می‌کند [۱-۳]. پتانسیل گرمایش جهانی قابل توجه متان، ضرورت اقدام فوری برای کنترل انتشار آن را در راستای کاهش گرمایش زمین برجسته می‌سازد. کاهش انتشار متان اغلب به عنوان فعال‌سازی "ترمز

فناوری‌های سنجش از دور، به‌ویژه داده‌های ماهواره‌ای، انقلابی در پایش متان ایجاد کرده است؛ به‌گونه‌ای که امکان اندازه‌گیری گسترده‌تر، منسجم‌تر و دقیق‌تری را در سطح جهانی فراهم می‌آورد. این تحول، نمایانگر تغییری پارادایمیک به‌سوی شفافیت و پاسخ‌گویی بی‌سابقه در ردیابی انتشارات گازهای گلخانه‌ای است؛ امری که نقشی کلیدی در تدوین و اجرای سیاست‌های مؤثر زیست‌محیطی ایفا می‌کند [۱، ۱۵].

امروزه طیف متنوعی از حسگرهای ماهواره‌ای به‌طور خاص برای پایش گازهای گلخانه‌ای توسعه یافته‌اند، از جمله Sentinel-5P، GOSAT، Sentinel-2 و Sentinel-3. GHGSat. این ابزارها از فناوری‌هایی نظیر طیف‌سنجی مادون‌قرمز موج کوتاه (SWIR) و مادون‌قرمز حرارتی (TIR) برای شناسایی امضای طیفی منحصربه‌فرد متان در جو بهره می‌برند [۱۱، ۱۵، ۱۶]. در میان نسل کنونی ماهواره‌های پایش جو، ماهواره Sentinel-5P که مجهز به ابزار TROPOMI (ابزار پایش تروپوسفری) است، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این ماهواره در ۱۳ اکتبر ۲۰۱۷ به‌عنوان بخشی از برنامه کوپرنیک آژانس فضایی اروپا (ESA) پرتاب شد و پوشش جهانی روزانه به‌همراه وضوح مکانی نسبتاً بالایی در حدود $7 \times 5/5$ کیلومتر مربع ارائه می‌دهد (که از مقدار اولیه 7×7 کیلومتر مربع بهبود یافته است [۱۷، ۱۸]). این ویژگی‌ها، TROPOMI را به ابزاری مناسب برای پایش مستمر و دقیق متان در مقیاس‌های منطقه‌ای تا ملی تبدیل کرده است و بسیاری از محدودیت‌های ذاتی روش‌های سنتی زمینی را برطرف می‌سازد.

مطالعات پیشین به‌طور گسترده توانایی سنجنده‌ی TROPOMI را در شناسایی انتشاردهندگان عمده‌ی متان – که اغلب با عنوان ابرانتشاردهندگان (Super Emitters) شناخته می‌شوند – و همچنین در تخمین میدان‌های انتشار منطقه‌ای نشان داده‌اند [۱]. به‌طور خاص، داده‌های TROPOMI در مطالعات متعددی برای شناسایی و کمی‌سازی ستون‌های متان ناشی از منابع گوناگون مانند تأسیسات نفت و گاز، محل‌های دفن زباله، و معادن زغال‌سنگ به‌کار گرفته شده‌اند [۲۲-۱۹]. با این حال، باید توجه داشت که در حالی که TROPOMI پوشش مکانی گسترده‌ای با قابلیت شناسایی ناهنجاری‌های قابل‌توجه ارائه می‌دهد، اما محدودیت‌هایی در وضوح مکانی و آستانه‌ی تشخیص دارد. این موضوع باعث می‌شود نشت‌های متان با شدت پایین یا پراکندگی زیاد (مثلاً از منابع کشاورزی یا سیستم‌های توزیع شهری) به‌درستی شناسایی نشوند [۱]. این نکته برای تفسیر نتایج مطالعات مبتنی بر TROPOMI حیاتی است، زیرا داده‌های حاصل عمدتاً نمایانگر منابع متراکم‌تر و با شدت بالاتر انتشارات هستند و ممکن است تصویر کاملی از تمامی منابع پراکنده یا کوچک‌تر ارائه ندهند.

چشم‌انداز جغرافیایی و صنعتی منحصربه‌فرد ایران، این کشور را به یکی از مورد‌های جذاب برای مطالعه انتشار متان در منطقه جنوب غرب آسیا تبدیل کرده است. فعالیت‌های گسترده در حوزه‌ی تولید و فرآورش نفت و گاز طبیعی، سهم قابل‌توجهی در بودجه‌ی متان ایران دارند. در واقع، داده‌ها نشان می‌دهند که بخش انرژی، به‌ویژه از طریق نشت

دامداری، سیستم‌های نفت و گاز، استخراج زغال‌سنگ، محل‌های دفن زباله، تصفیه فاضلاب و کشت برنج هستند. در این میان، بخش انرژی، به‌ویژه صنایع نفت و گاز، مسئول تقریباً ۴۰ درصد از کل انتشار متان ناشی از فعالیت‌های انسانی است [۴، ۵]. در این بخش، انتشارهای فراری حاصل از نشت‌های ناخواسته در تجهیزات تحت فشار مانند شیرآلات، فلنچ‌ها و همچنین احتراق ناقص در فرآیند مشعل‌سوزی، سهم قابل توجه و در عین حال پیچیده‌ای از کل انتشار متان را به خود اختصاص می‌دهند. ماهیت پراکنده و متناوب این نشت‌ها، اندازه‌گیری و کنترل آن‌ها را به‌ویژه دشوار می‌سازد [۶، ۷].

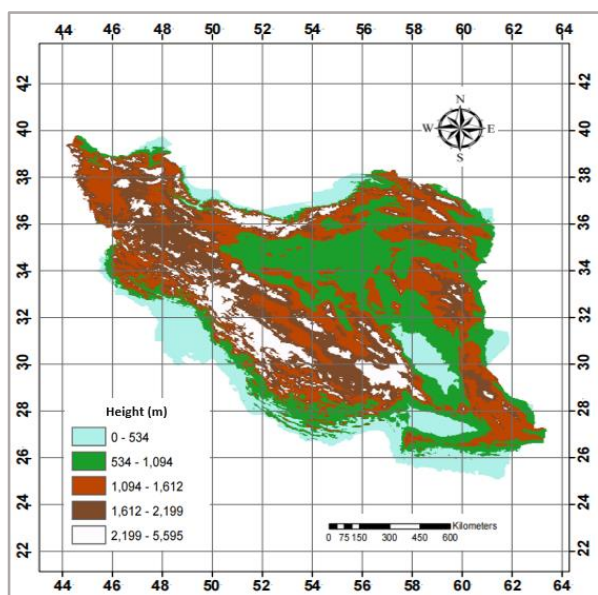
افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو، ضرورت همکاری جهانی را برجسته ساخته و زمینه‌ساز شکل‌گیری توافق‌نامه‌های بین‌المللی نظیر توافق‌نامه پاریس شده است. این توافق‌نامه، به‌عنوان یکی از اسناد کلیدی در سیاست‌گذاری اقلیمی، اهدافی حیاتی را دنبال می‌کند؛ از جمله، برداشتن گامی مؤثر در جهت کاهش گرمایش جهانی، برای جلوگیری از افزایش $1/5$ تا 2 درجه‌ی دمای کره‌ی زمین، در مقایسه با دوره‌ی پیش از صنعتی شدن و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سطح جهانی [۸]. شناسایی و اندازه‌گیری دقیق انتشار این گازها، به‌ویژه در مورد گازهایی مانند متان، از اهمیت بالایی برخوردار است؛ با این حال، به دلیل پراکندگی و ناپیوستگی منابع آن‌ها در طول زنجیره‌های تأمین، تولید و توزیع، این فرایند غالباً با چالش‌های جدی مواجه است [۹، ۱].

ایران، به‌عنوان یکی از تولیدکنندگان اصلی نفت و گاز در جهان، با چالشی جدی در زمینه‌ی پایش و کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه ناشی از سوزاندن گاز، مواجه است [۱۰]. بر اساس توافق‌نامه پاریس، ایران تعهداتی داوطلبانه برای کاهش ۴ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۰۳۰ ارائه داده و همچنین کاهش ۸ درصد اضافی را به‌صورت مشروط و در صورت رفع برخی موانع بین‌المللی پذیرفته است. شایان ذکر است که تنها بخش انرژی مسئول بیش از ۸۰ درصد از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشور است. روندهای موجود در انتشار متان، به‌طور مستقیم بر میزان پیشرفت یا عدم تحقق تعهدات بین‌المللی ایران تأثیرگذار است [۱۱]. دستیابی به این اهداف اغلب با عوامل ژئوپلیتیکی پیچیده‌ای مانند تحریم‌های بین‌المللی، که دسترسی به منابع مالی و فناوری‌های نوین را محدود می‌سازند، و همچنین یارانه‌های داخلی انرژی، که انگیزه برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک را تضعیف می‌کنند، با مانع مواجه می‌شود. این تلاقی بین اهداف زیست‌محیطی در سطح ملی و واقعیت‌های ژئوپلیتیکی در سطح بین‌المللی، لایه‌ای از پیچیدگی راهبردی به چالش کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در ایران می‌افزاید [۱۲-۱۴].

در گذشته، اندازه‌گیری انتشار متان عمدتاً به روش‌های سنتی زمینی متکی بود. این رویکردها به‌طور ذاتی با محدودیت‌هایی از جمله پوشش مکانی و زمانی محدود، هزینه‌های عملیاتی بالا، و ناتوانی در شناسایی مؤثر انتشارات پراکنده و متناوب همراه بودند. با این حال، ظهور

ناهمگونی توپوگرافیک، در کنار موقعیت راهبردی ایران در مجاورت منابع آبی اصلی مانند دریای خزر در شمال و خلیج فارس و دریای عمان در جنوب، شرایط جغرافیایی منحصربه‌فردی را ایجاد کرده است [۲۶، ۲۵].

ایران دارای چهار فصل متمایز است که با نوسانات قابل توجه در پارامترهای اقلیمی مانند دما، بارش، پوشش برف و الگوهای باد همراه‌اند. این شرایط جوی پویا، همراه با توپوگرافی پیچیده، چالش‌هایی اساسی را برای پایش‌های ماهواره‌ای ایجاد می‌کند [۲۷، ۲۵]. برای مثال، نواحی کوهستانی و پوشش ابری پایدار می‌توانند موجب ایجاد شکاف‌های داده‌ای در تصاویر ماهواره‌ای شوند، در حالی‌که تغییرات فصلی در وضعیت جوی، ممکن است بر الگوهای انتشار و قابلیت آشکارسازی ستون‌های متان تأثیر بگذارد [۱۷]. درک دقیق این پیچیدگی‌های محیطی، برای پردازش مؤثر داده‌های سنجش از دور و تفسیر صحیح روندهای انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه متان، امری حیاتی است. شکل ۱ نقشه‌ی تغییرات ارتفاعی ایران را نشان می‌دهد که در آن، نواحی مرتفع و هموار به‌روشنی قابل مشاهده هستند و بیانگر تنوع ارتفاعی گسترده در سراسر کشور می‌باشند.



شکل ۱: نقشه‌ی تغییرات ارتفاعی کشور ایران با تغییر ارتفاع (صفر (سطح آب‌های آزاد) تا ارتفاع حداکثر ۵۵۹۵ متر)

Fig. 1: Topographic Elevation Map of Iran (Ranging from 0 m [sea level] up to 5595 m maximum elevation)

داده‌های مورد استفاده

منبع داده Sentinel-5P TROPOMI

داده‌های اصلی مورد استفاده در این مطالعه از حسگر TROPOMI نصب‌شده روی ماهواره Sentinel-5 Precursor (S5P) به‌دست آمد. TROPOMI یک طیف‌سنج تصویربرداری با دید نادر است که بازتاب‌ها را در طیف وسیعی از باندهای فرابنفش (UV) تا مادون‌قرمز موج کوتاه (SWIR) ثبت می‌کند. این ماهواره در ارتفاع ۸۲۴ کیلومتری از سطح

شعله‌سوزی (flaring)، و تهویه گاز (venting)، یکی از اصلی‌ترین منابع انتشار متان در کشور است. نقاط داغ انتشار متان در ایران پیش‌تر در پژوهش‌ها شناسایی شده‌اند. به‌عنوان نمونه، محل دفن زباله آزادکوه (کهریزک) در جنوب تهران یکی از منابع مهم متان در مقیاس شهری گزارش شده که در مطالعاتی با استفاده از داده‌های سنجش‌از‌دور، میانگین غلظت متان تا حدود ۱۹۷۰ ppm در آن ثبت شده است [۲۳]. علاوه بر آن، مطالعات مرتبط با فعالیت‌های شعله‌سوزی گاز (gas flaring) نیز جایگاه ایران را در میان کشورهای پراکنش‌کننده متان تثبیت می‌کنند. به‌طور خاص، گزارش‌ها ایران را در سال ۲۰۱۵ سومین کشور بزرگ در زمینه سوزاندن گاز معرفی کرده‌اند [۲۴]. این واقعیت تأکیدی است بر نقش کلیدی بخش نفت و گاز در انتشار گازهای گلخانه‌ای کشور و لزوم سیاست‌گذاری و پایش دقیق در این حوزه.

با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه در مطالعات انتشار متان در ایران و بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور، تحلیل جامع و بلندمدت مکانی-زمانی انتشار این گاز گلخانه‌ای در سطح ملی، به‌ویژه با تمرکز بر تأسیسات نفت و گاز، همچنان جای خالی محسوسی در ادبیات پژوهش دارد. چنین تحلیلی می‌تواند درک دقیق و به‌روز از روندهای انتشار را ارائه دهد، مناطق بحرانی پایدار را شناسایی کند و دیدی دقیق و پویا از الگوهای انتشار فراهم کند؛ دیدی که برای تدوین سیاست‌های کاهش انتشارات و پایش تعهدات اقلیمی ایران ضروری است.

بنابراین، اهداف این تحقیق عبارتند از:

- تحلیل روندهای زمانی انتشار متان در سراسر ایران از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳، در سه مقیاس سالانه، فصلی و ماهانه؛
- شناسایی مناطق بحرانی و نقاط داغ با تمرکز ویژه بر مناطق دارای فعالیت‌های نفت و گاز؛
- ارزیابی میزان فراتر رفتن غلظت متان از آستانه‌ی جهانی ۱۸۰۰ ppb که توسط هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) به‌عنوان حد هشدار مطرح شده است؛
- ارزیابی توانمندی‌ها و محدودیت‌های داده‌های Sentinel-5P TROPOMI و پلتفرم Google Earth Engine برای پایش ملی و هدفمند انتشار متان در ایران.

منطقه مورد مطالعه

این تحقیق در گستره‌ی جغرافیایی ایران انجام شده است؛ کشوری با مساحتی بالغ بر ۱۶۴۸،۱۹۵ کیلومتر مربع که آن را در رتبه‌ی شانزدهم بزرگ‌ترین کشورهای جهان قرار می‌دهد. ایران در جنوب‌غربی آسیا واقع شده و بین عرض‌های جغرافیایی ۲۵°۰۳' تا ۳۹°۴۷' شمالی و طول‌های ۴۴°۱۴' تا ۶۳°۲۰' شرقی نسبت به نصف‌النهار گرینویچ امتداد دارد. توپوگرافی ایران عمدتاً کوهستانی و نیمه‌خشک است و با میانگین ارتفاعی بیش از ۱۲۰۰ متر از سطح دریا مشخص می‌شود. وجود رشته‌کوه‌های برجسته‌ای نظیر زاگرس و البرز، به‌همراه قله‌های پراکنده متعدد، به این کشور تنوع ارتفاعی چشمگیری بخشیده است. این

(کیفیت بهینه) است. در محصول سطح سوم (Level-3) داده‌های متان در GEE، پیکسل‌هایی با مقدار qa_value کمتر از ۵، حذف می‌شوند. با وجود این فیلترگذاری، احتمال باقی‌ماندن پیکسل‌های دارای خطا یا مصنوعات گرافیکی وجود دارد [۱۷].

وجود شکاف‌های داده که به‌صورت نواحی سفید در خروجی‌های گرافیکی مشاهده می‌شوند، ویژگی ذاتی سنجش از دور ماهواره‌ای غیرفعال است. این شکاف‌ها اغلب در مناطق دارای پوشش ابر مداوم، زوایای بالای خورشید، یا مناطق کوهستانی پیچیده مانند زاگرس و البرز رخ می‌دهند که بازایی دقیق داده را مختل می‌کند [۱۷]. این محدودیت‌ها بر ضرورت تفسیر دقیق نتایج و درک تعادل بین پوشش مکانی وسیع و دقت داده تأکید می‌کنند. همچنین، استفاده از پارامتر تصحیح‌شده متان در این مطالعه نشان می‌دهد که تصحیح بازتاب سطح به‌عنوان یک گام ضروری در بازایی دقیق، از پیش در پردازش مجموعه‌داده GEE اعمال شده است [۷، ۱۷، ۳۱].

تحلیل داده

پس از پردازش داده‌ها، غلظت متان با آستانه 1800 ppb تعیین‌شده توسط IPCC که نشان‌دهنده افزایش $2/5$ برابری نسبت به دوران پیشاصنعتی است، مقایسه شد. عبور از این آستانه به‌عنوان یک شاخص کلیدی تغییرات اقلیمی، نگرانی‌های فزاینده‌ای برای پژوهشگران و سیاست‌گذاران ایجاد کرده است [۳۳، ۳۲]. تحلیل آماری بر میانگین‌های سالانه، فصلی و ماهانه انجام شد و شامل محاسبه معیارهای آماری کلیدی نظیر حداقل، حداکثر، میانگین و انحراف معیار بود تا درک جامع‌تری از الگوها و تغییرپذیری انتشار متان در سراسر کشور حاصل گردد.

نتایج

تحلیل داده‌های حاصل از ماهواره Sentinel-5P (ابزار TROPOMI) در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳، روندها و الگوهای قابل توجهی از انتشار متان در ایران را در مقیاس‌های سالانه، فصلی و ماهانه، به‌همراه توزیع‌های جغرافیایی متمایز، نمایان می‌سازد.

تحلیل روندهای سالانه غلظت متان (۲۰۱۹-۲۰۲۳)

تحلیل داده‌های حاصل از سنجنده TROPOMI در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ نشان‌دهنده روندی افزایشی در میانگین سالانه غلظت متان در سطح ایران است (شکل ۲). در بازه پنج‌ساله مورد بررسی، میانگین سالانه غلظت متان در جو ایران از $1884/40 \text{ ppb}$ در سال ۲۰۱۹ به $1910/36 \text{ ppb}$ در سال ۲۰۲۳ افزایش یافته که نشان‌دهنده نرخ رشد سالانه‌ای در حدود $0/3\%$ است. این مقادیر به‌طور پیوسته و با میانگین $10/21 \text{ ppb}$ از حد آستانه‌ای 1800 ppb تعیین‌شده توسط IPCC فراتر رفته‌اند. در طول این دوره، مجموع تجمعی غلظت متان از تمامی منابع به مقدار قابل توجه $1,487,134,705 \text{ ppb}$ رسید. شکل ۳ و ۴ به‌ترتیب

زمین قرار دارد و پوشش جهانی روزانه با چرخه تکرار ۱۴ روزه و وضوح مکانی 5.5×7 کیلومتر را فراهم می‌سازد [۱۷، ۱۸].

پارامتر کلیدی مورد استفاده در این پژوهش، کسر مولی خشک میانگین ستونی متان (XCH_4) بود که یک شاخص حیاتی برای پایش تغییرات منطقه‌ای و بلندمدت در غلظت متان اتمسفری محسوب می‌شود. توانایی TROPOMI در ارائه پوشش تقریباً روزانه با وضوح مکانی نسبتاً بالا برای یک ابزار پایش جهانی، آن را به ابزاری مؤثر در شناسایی ناهنجاری‌های بزرگ‌مقیاس متان و تعیین میدان‌های انتشار منطقه‌ای تبدیل کرده است [۱، ۲۸]. با این حال، باید توجه داشت که هرچند TROPOMI در شناسایی "ابرنشاردهندگان" متان بسیار موفق عمل می‌کند، اما به دلیل محدودیت‌های وضوح مکانی و تشخیص ذاتی، ممکن است در ثبت نشت‌های کوچک یا پراکنده موفق نباشد. بنابراین، داده‌های این مطالعه عمدتاً بیانگر منابع بزرگ و متمرکز متان هستند و ممکن است تمامی منابع بالقوه را شامل نشوند.

پلتفرم پردازش داده (Google Earth Engine (GEE):

کلیه مراحل گردآوری و پیش‌پردازش داده‌ها با استفاده از پلتفرم GEE انجام شد. این پلتفرم، یک محیط ابری قدرتمند برای تحلیل داده‌های مکانی-زمانی در مقیاس سیاره‌ای است و دسترسی به مجموعه‌داده‌های عظیم ماهواره‌ای را فراهم می‌کند GEE. با پشتیبانی از API‌های پایتون و جاوا اسکریپت، امکان فیلترگذاری، پردازش و استخراج داده‌ها را تسهیل می‌نماید و انجام تحلیل‌های وسیع را حتی در مناطقی با محدودیت منابع محاسباتی ممکن می‌سازد. برای این تحقیق، از پارامتر $CH_4_column_volume_mixing_ratio_dry_air_bias_corrected$ استفاده شد که با نسبت اختلاط ستونی-میانگین هوای خشک (XCH_4) مطابقت دارد و به‌صورت پیش‌فرض در GEE با تصحیح بازتاب سطح (surface albedo) پردازش شده است [۲۹، ۳۰].

روش تحقیق

مراحل پردازش داده

رویکرد پژوهش، توصیفی-تحلیلی بوده و بر تحلیل سری‌های زمانی داده‌های روزانه Sentinel-5P TROPOMI در محدوده جغرافیایی ایران طی سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ متمرکز بوده است. داده‌های مربوط به غلظت متان ابتدا در پلتفرم GEE گردآوری و پیش‌پردازش شدند. در ادامه، نقشه‌های میانگین سالانه و نمودارهای سری‌زمانی تغییرات فصلی و ماهانه متان با بهره‌گیری از نرم‌افزار MATLAB تولید و تحلیل گردید.

کنترل کیفیت و فیلترگذاری

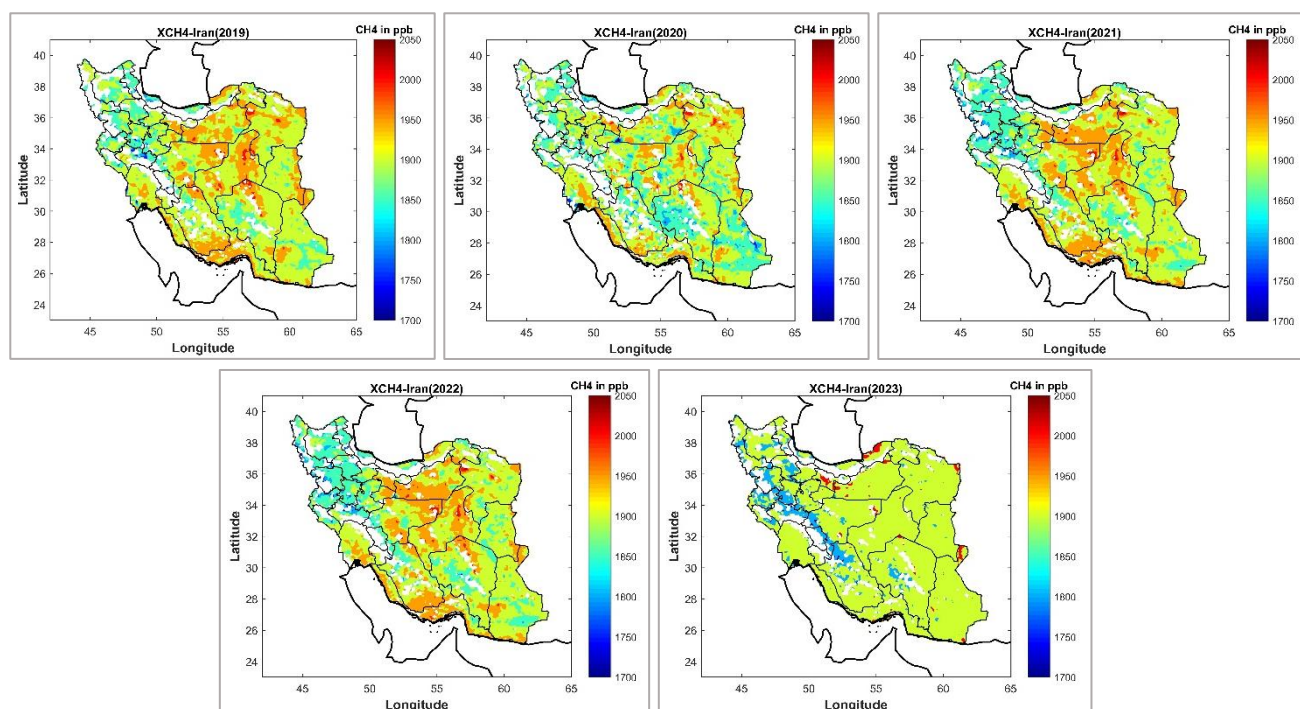
داده‌های Sentinel-5P تحت تأثیر عواملی نظیر پوشش ابر، شدت تابش خورشید، زاویه اوج خورشید، عامل جرم هوا در تروپوسفر، ناهنجاری‌های اقیانوسی و سرعت باد قرار دارند [۱۷، ۱۸]. به‌منظور اطمینان از کیفیت داده‌ها، برای هر پیکسل مقدار تضمین کیفیت (qa_value) اختصاص داده می‌شود که عددی بین ۰ (خطای پردازش یا کیفیت پایین) تا ۱

مدیریت پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از غلظت فزاینده متان در جو تأکید دارد.

نمایش‌های گرافیکی سالانه نیز اغلب بخش‌هایی با رنگ سفید را نشان می‌دادند که بیانگر شکاف داده برای مناطق یا بازه‌های زمانی خاص بودند (شکل ۲). این شکاف‌ها صرفاً به معنای داده‌های مفقود نیستند، بلکه محدودیت‌های ذاتی سنجش از دور ماهواره‌ای غیرفعال را برجسته می‌کنند. عواملی همچون پوشش ابر مداوم، زوایای اوج خورشید بالا (که میزان نور خورشید موجود برای بازیابی داده‌ها را کاهش می‌دهد) یا توپوگرافی پیچیده مناطق کوهستانی ایران می‌توانند به‌طور قابل توجهی بر کامل بودن و کیفیت داده‌های پایش تأثیر بگذارند. این امر بر لزوم موازنه میان پوشش مکانی گسترده و کامل بودن داده‌ها، که یکی از چالش‌های رایج در پایش جوی ماهواره‌ای است، تأکید دارد.

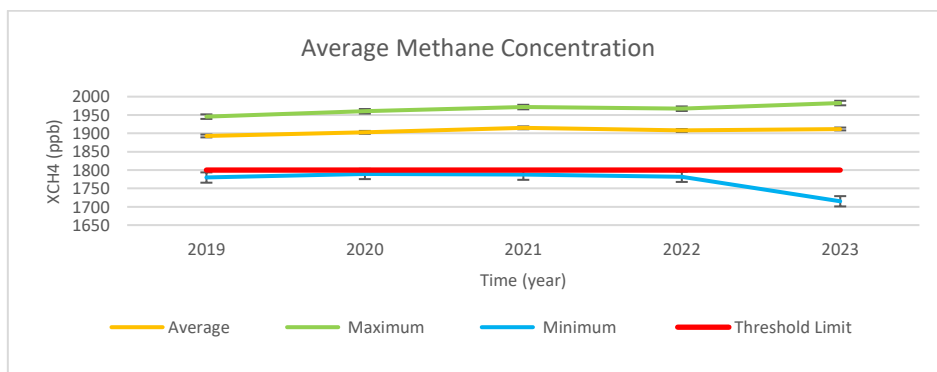
میانگین سالانه و مجموع سالانه غلظت متان در سطح کشور را به‌صورت نموداری نمایش می‌دهند.

بررسی مقادیر حداکثر و حداقل سالانه نیز بر پیچیدگی‌های این روند تأکید دارد. در حالی که مقادیر حداکثر به‌طور مداوم حدود ۲۰۰ تا ۲۵۰ ppb بالاتر از آستانه ۱۸۰۰ ppb ثبت شدند، مقادیر حداقل در برخی سال‌ها کاهش یافته‌اند؛ به‌ویژه در سال ۲۰۲۳ که کمترین مقدار ثبت‌شده به ۱۶۸۶/۳۶ ppb رسید و برای نخستین بار در دوره مطالعه به زیر ۱۷۰۰ ppb سقوط کرد. افزایش دامنه‌ی بین مقادیر حداقل و حداکثر می‌تواند نشانگر دو پدیده هم‌زمان باشد: از یک‌سو تشدید منابع موجود تولید متان، و از سوی دیگر، ظهور احتمالی نقاط داغ جدید یا رویدادهای محلی با شدت بالا و پراکندگی زمانی بیشتر. این گسترش در دامنه‌ی مقادیر ثبت‌شده، بر ضرورت پایش مستمر و دقیق برای



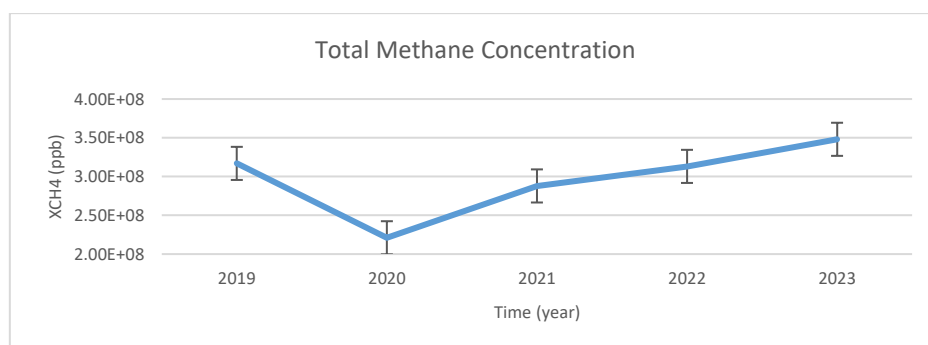
شکل ۲: تغییرات مکانی سالانه غلظت متان در ایران طی سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۲ بر اساس داده‌های سنجنده TROPOMI (ماهواره Sentinel-5P)

Fig. 2: Annual Spatial Variations of Methane Concentrations in Iran (2019–2022), based on Sentinel-5P (TROPOMI) observations.



شکل ۳: نمودار تغییرات میانگین سالانه غلظت متان در ایران (۲۰۱۹–۲۰۲۳)

Fig. 3: Annual Average Methane Concentration Trends in Iran (2019–2023)



شکل ۴: مجموع غلظت سالانه متان در ایران (۲۰۲۳-۲۰۱۹)
Fig. 4: Total Annual Methane Concentration in Iran (2019-2023)

می‌سازد. در طول دوره مطالعاتی، میانگین غلظت متان در اغلب ماه‌ها به‌طور مستمر بالاتر از آستانه ۱۸۰۰ ppb باقی ماند. برخی ماه‌ها با اوج‌های قابل توجه همراه بودند؛ برای مثال: فوریه و سپتامبر در سال ۲۰۱۹، آگوست و اکتبر در سال ۲۰۲۰، دسامبر و سپتامبر در سال ۲۰۲۱، ژوئن و آگوست در سال ۲۰۲۲، و دسامبر و سپتامبر در سال ۲۰۲۳. در مقابل، ماه‌هایی مانند ژوئن ۲۰۱۹، فوریه ۲۰۲۰، آگوست ۲۰۲۱، فوریه ۲۰۲۲ و اکتبر ۲۰۲۳، کمترین مقادیر حداقلی را ثبت کردند. این نوسانات ماهانه می‌توانند حاصل ترکیبی از عوامل زیست‌محیطی، شرایط اقلیمی، و تغییرات در شدت یا نوع فعالیت‌های انسانی باشند. آمار جامع مربوط به تغییرات ماهانه غلظت متان برای هر سال در نمودارهای شکل‌های ۶ تا ۱۰ ارائه شده‌اند.

توزیع جغرافیایی و نقاط داغ انتشار متان در ایران

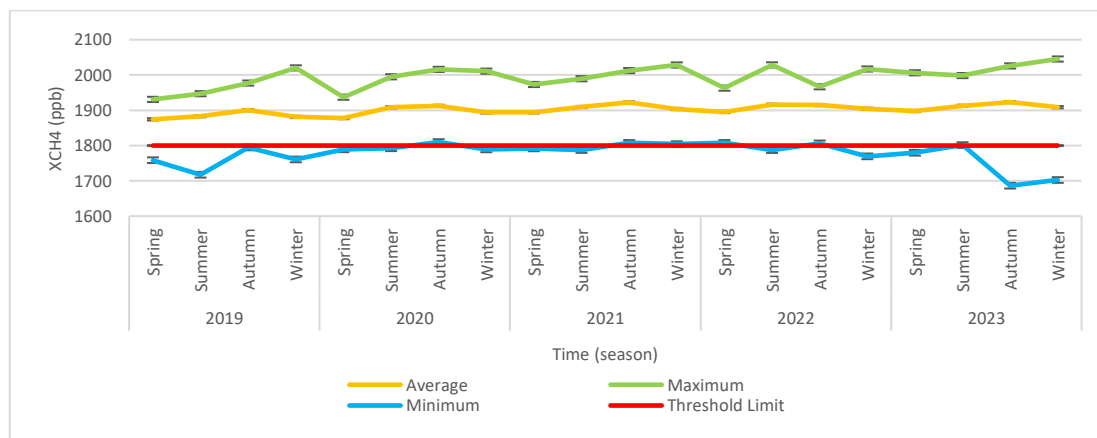
تحلیل مکانی انتشار متان در ایران طی دوره مطالعاتی (۲۰۲۳-۲۰۱۹) نشان‌دهنده وجود نقاط داغ جغرافیایی مشخص، به‌ویژه در استان‌های جنوبی و جنوب‌غربی کشور، است. این مناطق به‌طور مداوم سطوح بالایی از انتشار متان را نشان دادند که به‌طور قوی با تمرکز فعالیت‌های صنعت نفت و گاز در این نواحی همبستگی دارد. پایداری این انتشارات بالا بر نقش کلیدی صنعت سوخت‌های فسیلی در افزایش غلظت متان جوی ایران تأکید می‌کند.

الگوهای فصلی غلظت متان (۲۰۲۳-۲۰۱۹)

تحلیل الگوهای فصلی در دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد که بالاترین انتشار متان در ایران عمدتاً در فصل‌های پاییز و زمستان رخ داده است. این اوج تکرارشونده در ماه‌های سردتر به‌احتمال زیاد با افزایش تقاضای انرژی برای گرمایش مرتبط است، که می‌تواند فعالیت‌های استخراج گاز طبیعی را افزایش داده و منجر به نشت بیشتر متان شود. افزون‌براین، کارایی سامانه‌های کنترل نشت در زیرساخت‌های نفت و گاز ممکن است در دماهای پایین‌تر کاهش یابد، که این نیز به تشدید انتشارهای فراری می‌انجامد. این الگوی فصلی، به آسیب‌پذیری عملکردی زیرساخت‌های انرژی در برابر نوسانات دمایی اشاره دارد. در مقابل، فصل تابستان عموماً پایین‌ترین مقادیر ثبت‌شده را در هر سال به خود اختصاص داده است. با این حال، در تمامی فصل‌ها و طی همه سال‌های مورد بررسی، میانگین فصلی غلظت متان همواره بالاتر از آستانه ۱۸۰۰ ppb قرار داشته و اغلب بیش از ۱۰۰ ppb از این مقدار فراتر رفته است. این مسئله حاکی از تداوم سطح بالای متان در جو ایران صرف‌نظر از تغییرات فصلی است. جزئیات آماری مربوط به این نوسانات در شکل ۵ ارائه شده است.

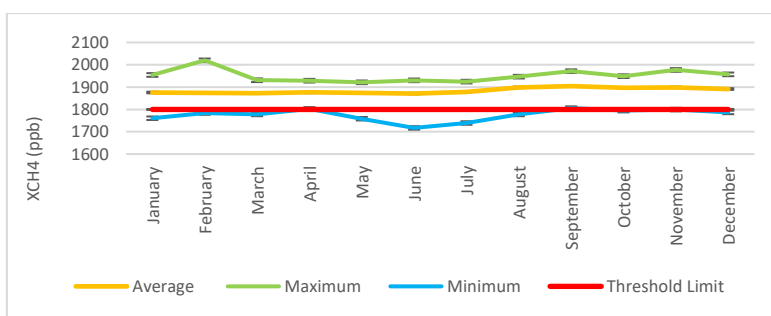
تغییرات ماهانه غلظت متان (۲۰۲۳-۲۰۱۹)

تحلیل داده‌های ماهانه غلظت متان در ایران طی سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳، الگوهای زمانی دقیق‌تری از تغییرات این گاز گلخانه‌ای را نمایان



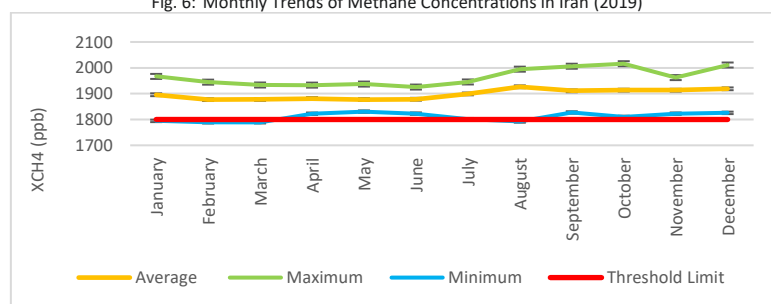
شکل ۵: نمودار تغییرات فصلی غلظت متان در ایران طی سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ بر اساس داده‌های Sentinel-5P (TROPOMI)

Fig. 5: Seasonal variations in methane concentrations in Iran (2019-2023) from Sentinel-5P (TROPOMI)



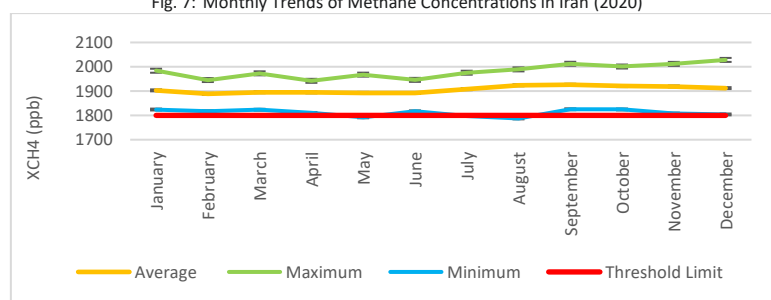
شکل ۶: روند تغییرات ماهانه غلظت متان در ایران (۲۰۱۹)

Fig. 6: Monthly Trends of Methane Concentrations in Iran (2019)



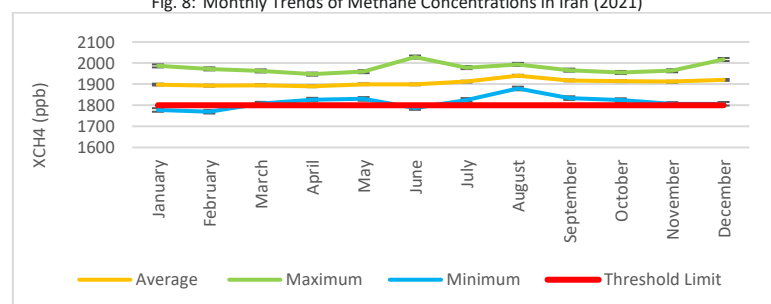
شکل ۷: روند تغییرات ماهانه غلظت متان در ایران (۲۰۲۰)

Fig. 7: Monthly Trends of Methane Concentrations in Iran (2020)



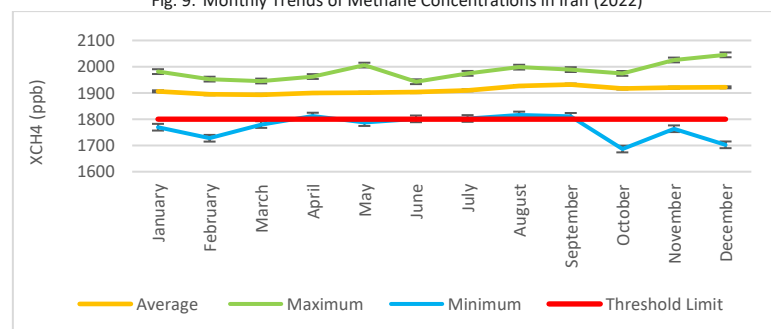
شکل ۸: روند تغییرات ماهانه غلظت متان در ایران (۲۰۲۱)

Fig. 8: Monthly Trends of Methane Concentrations in Iran (2021)



شکل ۹: روند تغییرات ماهانه غلظت متان در ایران (۲۰۲۲)

Fig. 9: Monthly Trends of Methane Concentrations in Iran (2022)



شکل ۱۰: روند تغییرات ماهانه غلظت متان در ایران (۲۰۲۳)

Fig. 10: Monthly Trends of Methane Concentrations in Iran (2023)

با این حال، وضوح مکانی TROPOMI برای شناسایی نشت‌های کوچک یا پراکنده کافی نیست و احتمال کم‌برآوردی کل انتشار وجود دارد. شرایط جوی (پوشش ابر، زاویه خورشید، توپوگرافی پیچیده) نیز می‌تواند باعث ایجاد شکاف داده شود. اگرچه فیلتر qa_value و تصحیح آلبدو کیفیت داده‌ها را بهبود می‌بخشند، اما امکان باقی ماندن مصنوعات وجود دارد. این محدودیت‌ها ضرورت رویکرد چندحسگری و چندلایه را برای برآورد جامع‌تر بودجه متان نشان می‌دهد.

نتایج این مطالعه با پژوهش‌های قبلی درباره انتشار متان در ایران همسو است. شناسایی محل دفن زباله تهران به عنوان یک نقطه داغ پایدار با یافته‌های محمدی و آخوندزاده (۲۰۲۳) مطابقت دارد که غلظت حدود ۱۹۷۰ ppm را در محل آرادکوه گزارش کرده بودند [۲۳]. این تداوم، اهمیت کاهش هدفمند این منبع را برجسته می‌کند.

همچنین، سهم قابل توجه بخش نفت و گاز با نتایج وهاب‌پور و همکاران (۲۰۱۸) همخوان است که ایران را سومین کشور بزرگ در سوزاندن گاز در سال ۲۰۱۵ معرفی کرده بودند [۲۴]. مشاهدات ماهواره‌ای این مطالعه، تأییدی مستقل و به‌روز از وسعت این انتشارها ارائه می‌دهد.

یافته‌ها ضرورت تدوین سیاست‌های قوی برای کاهش انتشار متان و تحقق تعهدات توافق پاریس را برجسته می‌کند. پیشنهادها شامل توسعه سامانه‌های پیشرفته تشخیص نشت، بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی، و سرمایه‌گذاری هدفمند در فناوری‌های کنترل انتشار است.

الگوهای موفق جهانی، مانند برنامه ابرانتشاردهنده متان سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (US EPA)، نشان می‌دهند که داده‌های ماهواره‌ای می‌توانند ابزار نظارت و اجرای مؤثر سیاست‌ها باشند [۳۴]. با این حال، در ایران موانع اقتصادی ناشی از یارانه‌های سنگین انرژی و موانع فناورانه ناشی از تحریم‌ها، اجرای این اقدامات را دشوار می‌سازد [۳۵].

پیشرفت فناوری‌های ماهواره‌ای فرصت‌های مهمی برای ارتقاء دقت پایش فراهم کرده است. ترکیب داده‌های Sentinel-5P با ماهواره‌های وضوح بالا مانند GHGsat، PRISMA، Sentinel-2 و Sentinel-3، همراه با اعتبارسنجی زمینی، می‌تواند برآورد منابع کوچک‌تر را ممکن سازد.

به‌کارگیری مدل‌های پیشرفته انتقال جوی، همچون GEOS-Chem، و تمرکز مطالعات آینده بر منابع مشخص (مانند کارایی سوزاندن در میادین نفت و گاز یا محل‌های دفن زباله)، می‌تواند به دقت و کارایی راهکارهای کاهش کمک کند.

ماموریت‌های جدیدی چون Carbon Mapper، MethaneSAT و GeoCarb امکان ردیابی تقریباً بلادرنگ انتشارها را فراهم خواهند ساخت و مسیر را برای اجرای مؤثرتر سیاست‌ها و ارزیابی مستمر نتایج کاهش هموار می‌کنند.

نتیجه‌گیری

این تحقیق، تحلیل مکانی-زمانی جامعی از انتشار گاز متان در ایران در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-5P TROPOMI ارائه می‌دهد. نتایج نشان‌دهنده روند نگران‌کننده و

علاوه بر مناطق اصلی تولید نفت و گاز، در برخی ماه‌ها انتشارات قابل‌توجهی در مجاورت استان تهران مشاهده شد. این مشاهدات با یافته‌های محمدی و آخوندزاده (۲۰۲۳/۱۴۰۲) هم‌خوانی دارد که محل دفن زباله آرادکوه در کهریزک را به‌عنوان منبعی پایدار و قابل‌توجه برای انتشار متان با غلظت‌های تقریبی ۱۹۷۰ ppm شناسایی کرده بودند [۲۳].

شناسایی مکرر این دو منطقه—مناطق غنی از منابع هیدروکربنی در جنوب و محل دفن زباله تهران—به‌عنوان نقاط داغ پایدار در بازه‌های زمانی مختلف و مطالعات مستقل، بر اهمیت آن‌ها به‌عنوان اهداف اولویت‌دار برای اقدامات کاهش هدفمند تأکید می‌کند. تمرکز انتشارات متان در منابع انسانی‌محور و قابل شناسایی نشان می‌دهد که مداخلات متمرکز می‌توانند به‌طور بالقوه کاهش قابل‌توجهی در ردپای متان ملی ایران به همراه داشته باشند.

بحث

یافته‌های این مطالعه نشان‌دهنده روند صعودی هشداردهنده در انتشار متان ایران از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ است، به‌طوری که میانگین سالانه غلظت‌ها همواره بالاتر از آستانه ۱۸۰۰ ppb قرار داشته است. این افزایش پایدار با روند جهانی رشد بودجه متان همسو بوده و فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه در بخش‌های سوخت فسیلی و کشاورزی، مهم‌ترین محرک‌های آن به شمار می‌آیند. همبستگی قوی بین نقاط داغ متان و مناطق دارای فعالیت‌های متمرکز نفت و گاز در جنوب و جنوب‌غرب ایران، این برداشت را تقویت می‌کند که صنعت نفت و گاز از عوامل اصلی انتشار CH₄ در کشور و جهان است.

چالش انتشار با پدیده انتشارات فراری (نشت‌های ناخواسته و سوزاندن ناقص) پیچیده‌تر می‌شود و اندازه‌گیری دقیق و کنترل مؤثر را دشوار می‌سازد. تغییرات فصلی، با اوج‌گیری انتشارات در پاییز و زمستان، بیانگر آسیب‌پذیری‌های عملیاتی در بخش انرژی است که احتمالاً با افزایش تقاضای گاز برای گرمایش و کاهش کارایی سامانه‌های کنترل نشت در دماهای پایین مرتبط است.

افزایش مداوم انتشار متان، با وجود تعهدات ایران در توافق پاریس، نشان‌دهنده شکاف در اجرای سیاست‌های اقلیمی است. این وضعیت چالش‌های جدی کشورهای تولیدکننده سوخت فسیلی را در گذار به الگوهای کم‌انتشار آشکار می‌سازد؛ به‌ویژه زمانی که محدودیت‌های ژئوپلیتیکی مانند تحریم‌ها یا سیاست‌های داخلی همچون یارانه سنگین انرژی، انگیزه سرمایه‌گذاری در کاهش انتشار را کاهش می‌دهند.

روش‌شناسی مطالعه با بهره‌گیری از داده‌های Sentinel-5P TROPOMI و پردازش آن‌ها در بستر GEE، امکان پایش مستمر و در مقیاس ملی را با وضوح مکانی نسبتاً بالا (۵/۵ × ۷ کیلومتر) فراهم کرد. این رویکرد محدودیت‌های روش‌های زمینی سنتی را تا حد زیادی برطرف نمود و قابلیت پردازش کارآمد داده‌های مکانی-زمانی وسیع را فراهم ساخت.

Environmental science & technology, 2022. 56(4): p. 2143-2152. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04873>

[4] Shindell, D., et al., *Global methane assessment: Benefits and costs of mitigating methane emissions*. 2021, United Nations Environment Programme.

[5] Alvarez, R.A., et al., *Assessment of methane emissions from the US oil and gas supply chain*. Science, 2018. 361(6398): p. 186-188. <https://doi.org/10.1126/science.aar7204>

[6] Zhang, Y., et al., *Quantifying methane emissions from the largest oil-producing basin in the United States from space*. Science advances, 2020. 6(17): p. eaaz5120. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5120>

[7] Jacob, D.J., et al., *Satellite observations of atmospheric methane and their value for quantifying methane emissions*. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016. 16(22): p. 14371-14396. <https://doi.org/10.5194/acp-16-14371-2016>

[8] UNFCCC, *The paris agreement*. United Nations, 2015.

[9] Kyoto Protocol *United Nations framework convention on climate change*. Kyoto Protocol, Kyoto, 1997. 19(8): p. 1-21.

[10] Mousavi, A., et al., *A policy context and process analysis to implement the Paris Agreement on climate change in the health system of Iran*. BMC Public Health, 2025. 25(1): p. 893. <https://doi.org/10.1186/s12889-025-22029-3>

[11] Yousef, S., *Iran's commitments toward meeting the goals of Paris Agreement: harnessing the global temperature rise*. Региональные проблемы, 2018. 21(3-1): p. 112-114. [https://doi.org/10.31433/1605-220X-2018-21-3\(1\)-112-114](https://doi.org/10.31433/1605-220X-2018-21-3(1)-112-114)

[12] Sabory, N.R., M.S.S. Danish, and T. Senjyu, *Afghanistan's Energy and Environmental Scenario*, in *Energy and Environmental Outlook for South Asia*. 2020, CRC Press. p. 17-38. <https://doi.org/10.1201/9781003131878-2>

[13] Oyewunmi, T., *Transnational Approaches to Controlling Methane Emissions from Oil and Gas Operations (Chapter 13)*. Reducing Emissions of Short-Lived Climate Pollutants: Perspectives on Law and Governance (Brill, 2023) pp, 2023: p. 364-391. https://doi.org/10.1163/9789004684089_015

[14] Boyd, R., J. Turner, and B. Ward, *Intended nationally determined contributions: what are the implications for greenhouse gas emissions in 2030?* 2015.

[15] Yoshida, Y., et al., *Retrieval algorithm for CO₂ and CH₄ column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse gases observing satellite*. Atmospheric Measurement Techniques, 2011. 4(4): p. 717-734. <https://doi.org/10.5194/amt-4-717-2011>

[16] Inoue, M., et al., *Validation of XCO₂ derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data*. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013. 13(19): p. 9771-9788. <https://doi.org/10.5194/acp-13-9771-2013>

[17] Sentinels. *Sentinel-5P TROPOMI* [Online]. Available:.. 2017.

افزایشی انتشار متان در کشور است، به‌طوری‌که غلظت‌های میانگین سالانه به‌طور مداوم از آستانه مجاز ۱۸۰۰ ppb مطابق معیارهای IPCC فراتر رفته‌اند. استان‌های جنوبی و جنوب غربی ایران که مرکز فعالیت‌های گسترده نفت و گاز هستند، به‌عنوان کانون‌های بحرانی (نقاط داغ) شناسایی شده‌اند. همچنین، انتشار قابل توجه و پایداری از محل دفن زباله‌های تهران گزارش شده است. علاوه بر این، الگوی فصلی مشخصی مشاهده شد که بیشترین میزان انتشار در ماه‌های پاییز و زمستان به ثبت رسیده است. این یافته‌ها چالش جدی مدیریت و کنترل انتشار متان در ایران را برجسته می‌سازد و اهمیت استفاده از داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-5P TROPOMI که با پلتفرم گوگل ارث انجین پردازش شده‌اند را برای پایش ملی این گاز گلخانه‌ای اثبات می‌کند.

نتایج این پژوهش، داده‌های مستقل و قابل اطمینانی فراهم می‌کند که می‌تواند به شکل مؤثری سیاست‌های اقلیمی ایران را جهت تحقق تعهدات بین‌المللی و توسعه استراتژی‌های هدفمند کاهش انتشار متان یاری رساند. با توجه به روند رو به رشد انتشار، ضرورت اجرای سیاست‌های قوی و کارآمد کاهش انتشار گاز متان در ایران امری فوری و حیاتی است. این اقدامات باید شامل نصب و راه‌اندازی سیستم‌های پیشرفته تشخیص نشت، بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی و سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین کنترل انتشار باشد. در نهایت، پایش ماهواره‌ای مستمر و تحقیقات تکمیلی برای ارزیابی اثربخشی این سیاست‌ها و دستیابی به کاهش‌های معنادار در انتشار متان ضروری بوده و می‌تواند نقشی کلیدی در تلاش‌های جهانی مقابله با تغییرات اقلیمی ایفا کند.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله، نویسندگان به نسبت برابر مشارکت داشته‌اند.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از همکاری که ما را در انجام این تحقیق یاری کردند، صمیمانه تشکر می‌کنیم.

تعارض منافع

«هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

[1] Dubey, L., J. Cooper, and A. Hawkes, *Minimum detection limits of the TROPOMI satellite sensor across North America and their implications for measuring oil and gas methane emissions*. Science of The Total Environment, 2023. 872: p. 162222. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162222>

[2] Rogelj, J., et al., *Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 C*. Nature, 2016. 534(7609): p. 631-639. <https://doi.org/10.1038/nature18307>

[3] Irakulis-Loitxate, I., et al., *Satellites detect abatable super-emissions in one of the world's largest methane hotspot regions*.

sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2021. 2(1): p. 2391.

[33] Solomon, S., et al., *AR4 Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2007, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

[34] Agency, U.S.E.P. *Methane super-emitter program*. 2025 [cited 2025 Retrieved August 9, 2025].

[35] Kohan, B.G. and H. Dahouei, *Reforming Iran's Energy Policy: Strategies for Sustainability, Subsidies, and Global Integration*. journal of public & international affairs, 2025.

[18] TROPOMI. *TROPOMI-TROPOspheric Monitoring Instrument*. Available:.. 2017.

[19] Pandey, S., et al., *Daily detection and quantification of methane leaks using Sentinel-3: a tiered satellite observation approach with Sentinel-2 and Sentinel-5p*. Remote Sensing of Environment, 2023. 296: p. 113716. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113716>

[20] Sadavarte, P., et al., *Methane emissions from superemitting coal mines in Australia quantified using TROPOMI satellite observations*. Environmental Science & Technology, 2021. 55(24): p. 16573-16580. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03976>

[21] Liu, M., et al., *A new divergence method to quantify methane emissions using observations of Sentinel-5P TROPOMI*. Geophysical Research Letters, 2021. 48(18): p. e2021GL094151. <https://doi.org/10.1029/2021GL094151>

[22] Maasakkers, J.D., et al., *Using satellites to uncover large methane emissions from landfills*. Science Advances, 2022. 8(31): p. eabn9683. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abn9683>

[23] Mohammadi, M. and M. Akhoondzadeh, *Monitoring and detection of methane gas in Tehran in Google Earth Engine*. Journal of Geoinformatics in Civil Engineering, 2023. 1(1): p. 41-52.

[24] Vahabpour, A., et al., *A study on environmental effects of gas flaring in Iran and its role for the country's commitments in Paris agreement*. Strategic Studies of public policy, 2018. 8(27): p. 133-154.

[25] Matthews, R. and H.F. Nashli, *The archaeology of Iran from the Palaeolithic to the Achaemenid empire*. 2022: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003224129>

[26] Zarrinkafsh, M.K., *"Geomorphological Characteristics of the Zagros and Alborz Mountain Ranges"*. Iranian Journal of Earth Sciences, 2003: p. 1(1), 1-14.

[27] Iran, I. *Iran-Greece Chamber of Commerce*. 2019.

[28] Lorente, A., et al., *Accounting for surface reflectance spectral features in TROPOMI methane retrievals*. Atmospheric Measurement Techniques Discussions, 2022. 2022: p. 1-15. <https://doi.org/10.5194/amt-2022-255>

[29] Hossein, A.A. *Google Earth Engine*. Available:.. 2018.

[30] Gorelick, N., et al., *Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone*. Remote sensing of Environment, 2017. 202: p. 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

[31] Butz, A., et al., *TROPOMI aboard Sentinel-5 Precursor: Prospective performance of CH₄ retrievals for aerosol and cirrus loaded atmospheres*. Remote sensing of environment, 2012. 120: p. 267-276. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.030>

[32] Masson-Delmotte, V., et al., *Climate change 2021: the physical science basis*. Contribution of working group I to the

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



بهناز بابائی فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد رشته مهندسی نقشه‌برداری-ژئودزی از دانشگاه زنجان در سال ۱۴۰۴ می‌باشد و علایق تحقیقاتی او شامل شناسایی و مکان‌یابی نقاط انتشار، پایش تغییرات و بررسی تأثیرات انتشار گاز گلخانه‌ای متان به خصوص در بخش صنعت نفت و گاز در کشور ایران است.

Babaei, B. Department of Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

✉ behnaz3598@gmail.com



رضا دوستی استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری دانشگاه زنجان است. ایشان مدرک کارشناسی ارشد خود را سال ۱۳۹۱ در رشته مهندسی نقشه‌برداری گرایش ژئودزی از دانشگاه زنجان و مدرک دکتری خود را سال ۱۴۰۰ در رشته ژئوفیزیک و ژئودزی از دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان اخذ نموده‌اند. پژوهش‌های اخیر ایشان در زمینه مدل‌سازی عددی تحولات ژئودینامیکی زمین و همچنین مبانی ریاضیاتی سیستم‌های مختصات و سیستم‌های تصویر می‌باشد.

Dousti, R. Assistant Professor at the Department of Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

✉ r_dousti@znu.ac.ir



سینا کیانی دارای تحصیلات کارشناسی و کارشناسی ارشد از دانشگاه زنجان در رشته مهندسی نقشه‌برداری. وی از سال ۱۳۹۹ در مقطع دکتری در رشته مهندسی نقشه‌برداری-سیستم اطلاعات مکانی مشغول به تحصیل می‌باشد. فعالیت پژوهشی ایشان در



در حال حاضر به عنوان کارشناس و محقق سنجش از دور در پژوهشگاه فضایی ایران مشغول به فعالیت است. حوزه تخصصی ایشان شامل پایش آتش سوزی جنگل ها و مراتع، تحلیل و تغییرات کاربری اراضی، و پایش محصولات کشاورزی با بهره گیری از داده ها و تصاویر ماهواره ای است. تمرکز اصلی فعالیت های او بر توسعه مدل های مکانی دقیق و کاربردی جهت مدیریت بهینه منابع طبیعی و پایش تغییرات محیطی است.

Abdi. A.H, M.Sc. in Remote Sensing and GIS, Researcher at the Iranian Space Research Center, Iran

✉ Amir.h1547@gmail.com

حشمت کرمی مدرک کارشناسی ارشد خود را در رشته سنجش از دور و GIS از دانشگاه هرمزگان در سال ۱۳۹۵ دریافت کرده و در حال حاضر دانشجوی دکتری سنجش از دور و GIS در دانشگاه تهران و پژوهشگر پژوهشگاه فضایی ایران است. فعالیت های پژوهشی وی بر کاربردهای سنجش از دور و GIS در حوزه های مختلفی چون پایش ماهواره ای زیست محیطی مانند جنگل ها، تالاب ها، آب های زیرزمینی و سایر کاربردهای مرتبط متمرکز است. زمینه های تخصصی او شامل پردازش تصاویر ماهواره ای، سری زمانی و کاربردهای سنجش از دور و GIS در مدیریت زمین می باشد.

Karami .H, PhD student in Remote Sensing and GIS, Researcher at the Iranian Space Research Center, Iran

✉ heshmat.karami@ut.ac.ir

زمینه کاهش گازهای گل خانه ای و همچنین ایجاد بسترها و استانداردهای مورد نیاز در حیطه نفت و گاز می باشد.

Kiaei, S. Department of Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

✉ sina61ir@yahoo.com



اسلام جوادنیا استادیار گروه مهندسی نقشه برداری در دانشکده مهندسی دانشگاه زنجان است. ایشان مدرک کارشناسی ارشد و دکتری خود را در رشته مهندسی نقشه برداری - سنجش از دور به ترتیب در سال های ۱۳۸۶ و ۱۳۹۶ از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی دریافت کرده اند. فعالیت های پژوهشی

اخیر ایشان در زمینه کاربرد یادگیری ماشین در برآورد پارامترهای جوی از تصاویر ماهواره ای و همچنین به کارگیری سنجش از دور در پایش تغییرات اقلیمی، کشاورزی، مدیریت جنگل ها، مدیریت کاربری و پوشش اراضی و مدل سازی محیطی با استفاده از داده های سنجش از دور متمرکز است. زمینه های تخصصی وی عبارت اند از پردازش تصاویر اپتیک و راداری، یادگیری ماشین و توسعه کاربردهای سنجش از دور.

Javadnia, E. Assistant Professor at the Department of Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

✉ Javadnia@znu.ac.ir

امیر حسین عبدی دارای مدرک کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) از دانشگاه هرمزگان می باشد.

Citation (Vancouver): Babaei B, Dousti R, Javadnia E, Kiaei S, H Abdi A, Karami H. [Monitoring methane emissions in Iran using Sentinel-P5 satellite data: Analyzing emission trends and identifying critical sources (2019-2023)]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(2): 333-344

doi <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2025.12508.1109>



COPYRIGHTS

© 2025 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)