

رویکردهای سنجش از دور برای پایش گاز گلخانه‌ای متان: مروری بر تکنولوژی ماهواره‌ای و هوابرد

علی رحیمی، منوچهر فرج‌زاده اصل*، یوسف قویدل رحیمی

گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

* Corresponding Author: farazam@modares.ac.ir

چکیده

سابقه و هدف: پایش گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه متان، به دلیل نقش کلیدی آن در تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی، از اهمیت روزافزون برخوردار است. متان پس از دی‌اکسید کربن، دومین گاز گلخانه‌ای مهم ناشی از فعالیت‌های انسانی محسوب می‌شود و به دلیل پتانسیل بالای گرمایش جهانی خود، تأثیر قابل توجهی بر افزایش دمای زمین دارد؛ به‌طوری‌که اثر گرمایشی آن در بازه زمانی ۲۰ ساله تقریباً ۸۴ برابر دی‌اکسید کربن است. با توجه به افزایش روند انتشار متان در سال‌های اخیر و سهم آن در تغییرات اقلیمی، شناسایی دقیق منابع انتشار و پایش مداوم این گاز در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و جهانی ضروری است تا بتوان راهبردهای مؤثری برای کاهش این انتشارها تدوین کرد. دو رویکرد اصلی برای پایش متان شناخته شده است: روش پایش به بالا که مبتنی بر اندازه‌گیری‌های محلی و محاسبه موجودی انتشار است و روش بالا به پایین که بر داده‌های سنجش از دور و مدل‌سازی معکوس استوار است. رویکرد بالا به پایین به دلیل توانایی پوشش گسترده، امکان پایش مداوم و ارائه دیدگاه جامع‌تر از وضعیت انتشار متان در مناطق مختلف، اهمیت فزاینده‌ای یافته است. به‌ویژه در مناطقی که دسترسی به داده‌های زمینی محدود است، این روش به‌عنوان ابزاری حیاتی در تحلیل منابع انتشار و ارزیابی میزان متان مطرح می‌شود. این مطالعه، به بررسی جامع تکنولوژی و سنجنده‌های سنجش از دوری رویکرد بالا به پای پایش گاز گلخانه‌ای متان پرداخته و اصول، مزایا و محدودیت‌های هریک از تکنیک‌های هوابرد و ماهواره‌ای را مورد بررسی قرار می‌دهد. در این راستا، سنجنده‌های مادون قرمز حرارتی، طیف‌سنجی موج کوتاه و سیستم‌های هوابرد مورد بررسی دقیق قرار گرفته و مزایا، محدودیت‌ها و قابلیت‌های هر یک از این فناوری‌ها در شناسایی و برآورد انتشار متان تحلیل شده است. این پژوهش می‌کوشد تا با ارائه چشم‌اندازی جامع از وضعیت فعلی فناوری‌های پایش بالا به پایین متان، زمینه‌های بهبود و توسعه راهکارهای پایش دقیق‌تر و مؤثرتر را فراهم آورد.

مواد و روش‌ها: این مطالعه با رویکردی مروری و نظام‌مند به تحلیل فناوری‌ها و روش‌های نوین پایش بالا به پایین گاز گلخانه‌ای متان، به‌ویژه سامانه‌های ماهواره‌ای و هوابرد، پرداخته است. برای این منظور، منابع علمی معتبر از بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۵ گردآوری و بررسی شدند تا روند تحولات و آخرین دستاوردهای فنی در این حوزه پوشش داده شود. فناوری‌های سنجش از دور، شامل مادون قرمز حرارتی، مادون قرمز موج کوتاه و لیدار، از نظر دقت مکانی و زمانی، حساسیت به شرایط جوی و محدودیت‌های عملیاتی به صورت تطبیقی ارزیابی شدند. علاوه بر این، سیر تاریخی مأموریت‌های ماهواره‌ای پایشگر گاز گلخانه‌ای متان مرور شده و نقش مکمل پروازهای هوابرد در شناسایی منابع نقطه‌ای و اعتبارسنجی داده‌های ماهواره‌ای مورد تأکید قرار گرفته است.

نتایج و بحث: نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که فناوری‌های سنجش از دور، به‌ویژه مادون قرمز موج کوتاه و لیدار، ابزارهای قدرتمندی برای پایش متان در مقیاس‌های وسیع محسوب می‌شوند. سنجنده‌های مادون قرمز حرارتی و موج کوتاه، به دلیل حساسیت طیفی بالا، توانایی شناسایی و اندازه‌گیری غلظت متان را در جو دارند، اما با چالش‌هایی از جمله تداخل طیفی متان با سایر گازهای جوی مانند بخار آب و دی‌اکسید کربن مواجه هستند که دقت اندازه‌گیری‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از سوی دیگر، لیدار به دلیل ارائه داده‌های سه‌بعدی و اندازه‌گیری مستقیم غلظت متان، دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌های سنجش از دور دارد. با این حال، هزینه بالا و نیاز به تجهیزات پیشرفته، از جمله محدودیت‌های این روش محسوب می‌شود. یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از این فناوری‌ها، محدودیت‌های تفکیک مکانی و زمانی داده‌های سنجنده‌های ماهواره‌ای است. اگرچه این سنجنده‌ها امکان پایش متان را در مقیاس‌های وسیع فراهم می‌کنند، اما در تشخیص منابع انتشار نقطه‌ای، مانند نشت‌های کوچک گاز از تأسیسات نفت و گاز، دچار محدودیت هستند.

موانع محیطی و جوی نیز چالش دیگری در پایش متان به روش سنجش از دور محسوب می‌شوند. پوشش ابر، ذرات معلق و بخار آب در جو می‌توانند موجب جذب و پراکندگی تابش در باندهای مادون قرمز شوند و دقت اندازه‌گیری‌ها را کاهش دهند. همچنین، ناهمبندی در پارامترهای مدل‌سازی معکوس، مانند دما و فشار جو، می‌تواند موجب افزایش خطاهای سیستماتیک در برآورد غلظت متان شود. برای کاهش این چالش‌ها، ترکیب داده‌های چندمنبعی از سنجنده‌های ماهواره‌ای، هوابرد و زمینی پیشنهاد شده است.

نتیجه‌گیری: پایش متان با استفاده از رویکرد بالا به پایین و داده‌های سنجش از دور، به‌ویژه از طریق ماهواره‌ها و سامانه‌های هوابرد، نقش مهمی در نظارت جهانی بر انتشار این گاز و ارزیابی تأثیر آن بر تغییرات اقلیمی دارد. فناوری‌هایی مانند مادون قرمز موج کوتاه، مادون قرمز حرارتی و لیدار، امکان شناسایی منابع انتشار، تخمین غلظت متان و پایش گسترده آن را در مقیاس‌های مختلف فراهم می‌کنند. با این حال، این روش‌ها با چالش‌هایی همچون محدودیت‌های تفکیک مکانی و زمانی، تأثیرپذیری از شرایط جوی و پیچیدگی‌های مدل‌سازی داده‌ها مواجه هستند. توسعه سنجنده‌های پیشرفته‌تر، بهبود مدل‌های انتقال تابش، و ادغام فناوری‌های مبتنی بر یادگیری ماشین در پردازش داده‌های سنجشی، می‌تواند به کاهش این چالش‌ها و افزایش دقت پایش متان کمک کند. در نهایت، ترکیب داده‌های چندمنبعی از سنجنده‌های ماهواره‌ای، هوابرد و زمینی، همراه با بهبود الگوریتم‌های تحلیل داده، می‌تواند موجب افزایش دقت پایش، تفکیک بهتر منابع انتشار و ارائه برآوردهای دقیق‌تر از میزان انتشار متان شود. این پیشرفت‌ها مسیر را برای بهبود سیاست‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و نظارت جامع‌تر بر تغییرات اقلیمی هموار خواهد ساخت.

کلمات کلیدی: گازهای گلخانه‌ای، پایش متان، سنجش از دور، رویکرد بالا به پایین

Remote Sensing Approaches for Methane Monitoring: A Review of Satellite and Airborne Technologies

Ali Rahimi, Manochehr Farajzadeh Asl*, Yosef Ghavidel Rahimi

* Corresponding Author: farajzam@modares.ac.ir

Abstract

Background and Objective: Monitoring greenhouse gases, particularly methane, is increasingly important due to its critical role in climate change and global warming. After carbon dioxide, methane is the second most significant anthropogenic greenhouse gas, with a 20-year global warming potential approximately 84 times that of CO₂. Accurate identification of emission sources and continuous monitoring from local to global scales are essential for developing effective mitigation strategies. Two primary approaches exist for methane monitoring: the bottom-up approach, based on local measurements, and the top-down approach, which relies on remote sensing data and inverse modeling. The top-down approach has gained prominence due to its wide coverage and ability to monitor emissions over large areas, especially in regions with limited ground-based data. This study provides a comprehensive review of remote sensing technologies and sensors used in top-down methane monitoring, evaluating the principles, advantages, and limitations of both airborne and satellite systems.

Materials and Methods: In this systematic review, peer-reviewed sources from 1990 to 2025 were analyzed to assess advances in remote sensing technologies for methane, including thermal infrared, shortwave infrared, and LIDAR, considering spatial accuracy, sensitivity to atmospheric conditions, and operational constraints. Historical satellite missions for methane monitoring were

also reviewed, highlighting the complementary role of airborne platforms in detecting point sources and validating satellite observations.

Results and Discussion: The results indicate that remote sensing technologies, particularly shortwave infrared and LIDAR systems, are effective tools for large-scale methane monitoring. Spectral technologies in thermal and shortwave infrared bands provide high spectral sensitivity, enabling methane detection and concentration estimation; however, spectral interference from water vapor and CO₂ can reduce measurement accuracy. In contrast, LIDAR offers higher precision through direct measurement and three-dimensional data generation, although high costs and the need for advanced equipment remain significant limitations. One of the major challenges in satellite-based methane monitoring is the low spatial and temporal resolution of sensors, which limits the detection of small point sources, such as minor leaks from oil and gas facilities. Additionally, atmospheric conditions—including cloud cover, aerosols, and water vapor—can absorb or scatter infrared radiation, further affecting measurement accuracy. To improve results and reduce errors arising from inverse modeling and atmospheric variability, the integrated use of multi-source data from satellite, airborne, and ground-based measurements is recommended. Such data fusion increases accuracy and spatial resolution, enabling a more comprehensive and precise assessment of methane emission sources.

Conclusion: Top-down methane monitoring using remote sensing data, particularly from satellite and airborne platforms, plays a pivotal role in global emission surveillance and assessing climate impacts. Technologies such as shortwave infrared, thermal infrared, and LIDAR facilitate the identification of emission sources, concentration estimation, and large-scale monitoring. Despite challenges related to spatial and temporal resolution, atmospheric effects, and modeling complexity, the development of advanced sensors, improved radiative transfer models, and machine learning-based data processing can enhance monitoring accuracy. Moreover, integrating multi-source datasets and optimizing analytical algorithms opens new avenues for precise methane source detection and supports the implementation of more effective greenhouse gas mitigation policies.

Keywords: Greenhouse gases, methane monitoring, remote sensing, top-down approach

۱- مقدمه

متان پس از دی اکسید کربن دومین گاز گلخانه‌ای مهم ناشی از فعالیت‌های انسانی محسوب می‌شود و به دلیل پتانسیل گرمایش جهانی بالا، نقش قابل توجهی در تغییرات اقلیمی ایفا می‌کند (Subraveti et al., 2025). با وجود غلظت کمتر آن در جو نسبت به دی اکسید کربن، متان در بازه زمانی ۲۰ ساله، تقریباً ۸۴ برابر مؤثرتر از دی اکسید کربن در به دام انداختن گرما عمل می‌کند و به همین دلیل، یکی از اهداف کلیدی در راهبردهای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به شمار می‌رود (Omemen et al., 2025). منابع انتشار متان شامل تالاب‌های طبیعی، دامداری، محل‌های دفن زباله، سوزاندن زیست‌توده و استخراج و انتقال سوخت‌های فسیلی است (Wójcik-Gront et al., 2025). درک دقیق انتشار متان و بررسی تغییرات مکانی و زمانی آن جهت کاهش اثرات تغییرات اقلیمی از اهمیت بالایی برخوردار است.

به‌طور کلی، سکوه‌های تشخیص متان به سه نوع اصلی زمینی، فضایی و ماهواره ای تقسیم می‌شوند (Erland et al., 2022). بر این اساس، دو رویکرد اصلی پایین به بالا و بالا به پایین برای پایش انتشار متان وجود دارد. روش‌های پایین به بالا بر داده‌های موجودی انتشار، مدل‌های فرایندی و اندازه‌گیری‌های مستقیم شار گاز متکی هستند و انتشار را در مقیاس‌های کوچک، مانند سطح منبع، برآورد می‌کنند. در مقابل، روش‌های بالا به پایین از مشاهدات اتمسفری و مدل‌سازی معکوس برای تخمین شار متان در مقیاس‌های منطقه‌ای تا جهانی استفاده می‌کنند (Du et al., 2024). رویکرد بالا به پایین به‌ویژه در شناسایی منابع انتشار نامعلوم، ارزیابی عدم قطعیت‌های موجود در برآوردهای پایین به بالا و پایش تغییرات گسترده زمانی و مکانی انتشار گازهای گلخانه‌ای مفید است (Montazeri et al., 2021).

پایش متان با استفاده از روش‌های بالا به پایین عمدتاً مبتنی بر تکنیک‌های سنجش از دور است که شامل اندازه‌گیری‌های هوابرد و ماهواره‌ای می‌شود. این روش‌ها از سنجنده‌های مختلفی بهره می‌برند که بر اساس ویژگی‌های طیفی متان طراحی شده‌اند. مهم‌ترین تکنیک‌های مورد استفاده در این زمینه عبارت‌اند از مادون قرمز حرارتی، مادون قرمز موج کوتاه و لیدار. سنجنده‌های مادون قرمز حرارتی و موج کوتاه از باندهای جذبی مشخص متان در طیف مادون قرمز برای شناسایی و تخمین غلظت این گاز استفاده می‌کنند، در حالی که لیدار با ارسال پالس‌های لیزری و تحلیل بازتاب آن، امکان پایش با حد تفکیک مکانی بالاتر را فراهم می‌سازد (Lambert-Girard et al., 2015). ترکیب این تکنیک‌ها دقت و گستره پایش متان را بهبود بخشیده و قابلیت شناسایی منابع انتشاری را که در روش‌های سنتی زمینی قابل مشاهده نیستند، افزایش داده است (Nagao et al., 2022).

این مقاله مروری به بررسی جامع تکنولوژی و سنجنده‌های سنجش از دوری رویکرد بالا به پایین پایش گاز گلخانه‌ای متان پرداخته و اصول، مزایا و محدودیت‌های هر یک از تکنیک‌های هوابرد و ماهواره‌ای را مورد بررسی قرار می‌دهد. ساختار مقاله به این صورت تنظیم شده است: در بخش ۲، رویکرد بالا به پایین پایش گازهای گلخانه‌ای معرفی می‌شود. در بخش ۳، دسته‌بندی تکنیک‌های مختلف سنجش از دور ماهواره‌ای و هوابرد، از جمله مادون قرمز حرارتی، مادون قرمز موج کوتاه و لیدار، به تفصیل بررسی خواهند شد و تاریخچه استفاده از سنجنده‌های مربوط به هر یک از این روش‌ها مورد تحلیل قرار خواهد گرفت. در بخش ۴، چالش‌های فعلی و چشم‌انداز آینده رویکرد بالا به پایین پایش متان و در بخش ۵، نتیجه‌گیری و اهمیت نقش آن در سیاست‌گذاری‌های اقلیمی و کاهش انتشار بررسی می‌شود. با مرور پیشرفت‌های اخیر در این حوزه، این مطالعه به درک بهتر انتشار متان کمک کرده و به توسعه راهبردهای کارآمدتر در پایش جهانی این گاز یاری خواهد رساند.

۲- مواد و روش‌ها

این مطالعه با رویکردی مروری و نظام‌مند، به تحلیل و ارزیابی فناوری‌ها و روش‌های نوین در پایش بالا به پایین گاز گلخانه‌ای متان پرداخته است. تمرکز اصلی پژوهش بر بررسی عملکرد، مزایا، محدودیت‌ها و ویژگی‌های عملیاتی سامانه‌های سنجش از دور ماهواره‌ای و هوابرد در شناسایی و برآورد انتشار متان در مقیاس‌های منطقه‌ای تا جهانی است. به‌منظور گردآوری داده‌ها و اطلاعات علمی مرتبط، مجموعه‌ای از منابع معتبر شامل مقالات پژوهشی داوری‌شده، گزارش‌های فنی مأموریت‌های فضایی، مستندات رسمی سازمان‌های فضایی بین‌المللی و همچنین مقالات مروری منتشرشده در سال‌های اخیر، مورد بررسی قرار گرفت. بازه زمانی انتخاب‌شده برای پوشش منابع، از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۵ در نظر گرفته شده است تا روند تاریخی تحولات و نیز آخرین دستاوردهای فنی در این حوزه را دربر گیرد.

منابع علمی عمدتاً از پایگاه‌های علمی معتبر، از جمله ScienceDirect، Scopus و Google Scholar استخراج شدند. در فرایند جست‌وجو، برای افزایش دقت و جامعیت، مجموعه‌ای از معیارهای تخصصی به‌منظور اطمینان از ارتباط مستقیم و اعتبار علمی منابع مدنظر قرار گرفت. تنها پژوهش‌هایی در تحلیل‌هایی وارد شدند که به‌طور مشخص بر پایش متان از طریق فناوری‌های ماهواره‌ای یا هوابرد تمرکز داشته و داده‌های کمی یا تحلیل‌های فنی قابل اتکا ارائه کرده باشند. همچنین دقت شد تا منابع منتخب شامل اطلاعات دقیق درخصوص مشخصات فنی سنجنده‌ها، الگوریتم‌های بازیابی داده و شاخص‌های ارزیابی دقت اندازه‌گیری باشند.

تحلیل منابع به صورت کیفی و تطبیقی انجام گرفت. در این چارچوب، فناوری‌های مختلف سنجش از دور، از جمله طیف‌سنجی مادون قرمز حرارتی، طیف‌سنجی مادون قرمز موج کوتاه و سامانه‌های هوابرد، از منظر دقت مکانی و زمانی، حساسیت به شرایط جوی و محدودیت‌های عملیاتی، مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند.

سیر تاریخی مأموریت‌های ماهواره‌ای پایش متان، از سامانه‌هایی چون SCIAMACHY و IASI تا سامانه‌های پیشرفته‌تری نظیر TROPOMI و GOSAT، به صورت هدفمند مرور و تحلیل شده است. همچنین، نقش مکمل پروازهای هوابرد در آشکارسازی منابع نقطه‌ای متان و اعتبارسنجی داده‌های ماهواره‌ای به طور ویژه مورد توجه قرار گرفته است.

این بررسی جامع، با ارائه تصویری یکپارچه از وضعیت موجود در پایش بالا به پایین گاز متان، در راستای شناسایی شکاف‌های دانشی، تبیین چالش‌های فنی و ترسیم افق‌های آینده، می‌تواند به سیاست‌گذاران و پژوهشگران در توسعه سامانه‌های نظارتی دقیق‌تر و تدوین راهبردهای مؤثرتر برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای یاری رساند.

۳- نتایج و بحث

رویکرد بالا به پایین به معنای استفاده از تکنیک‌های غیرتماسی و سنجش از دور برای پایش گازهای گلخانه‌ای است که این امکان را فراهم می‌کند تا از فواصل دور به بررسی غلظت گاز در جو پرداخته شود (Fung et al., 2023). این رویکرد به عنوان یکی از روش‌های نوین و کارآمد در پایش گازهای گلخانه‌ای، به ویژه متان، طی سال‌های اخیر مورد توجه گسترده قرار گرفته و با برخورداری از مزایای متعدد، به ابزاری مؤثر برای سنجش و ارزیابی انتشار این گازها تبدیل شده است.

یکی از مزایای اصلی این روش، امکان انجام اندازه‌گیری‌های بی‌وقفه و با دقت بالا در مقیاس‌های وسیع است (Liu et al., 2023). رویکرد بالا به پایین می‌تواند اطلاعات قابل اطمینانی را در سطح جهانی در اختیار محققان و سیاست‌گذاران قرار دهد (Hardwick et al., 2016). این رویکرد با کمک داده‌های ماهواره‌ای، سنجش‌های هوابرد و مدل‌های جوی می‌تواند غلظت متان را در لایه‌های مختلف جو و حتی در مناطق دورافتاده، که دسترسی به آن‌ها دشوار است، اندازه‌گیری کند (He et al., 2024), (Pandey et al., 2021).

علاوه بر این، یکی دیگر از مزایای مهم این رویکرد، توانایی آن در نظارت مستمر بر منابع مختلف انتشار گاز متان از جمله منابع طبیعی مانند تالاب‌ها، و منابع انسانی مانند صنایع نفت و گاز و کشاورزی است. این مزیت به ویژه برای شناسایی و پایش دقیق منابع متان در مقیاس‌های وسیع اهمیت دارد (Chen et al., 2022). این روش همچنین امکان بررسی تغییرات زمانی غلظت گاز متان را در یک دوره زمانی معین فراهم می‌آورد که می‌تواند در پیش‌بینی و ارزیابی تأثیرات تغییرات اقلیمی و سلامت محیط‌زیست مفید باشد (Song et al., 2023), (Aghayeva et al., 2024).

با این حال، رویکرد بالا به پایین با چالش‌ها و محدودیت‌هایی نیز همراه است که باید در نظر گرفته شوند. یکی از چالش‌های مهم در این روش، وابستگی آن به شرایط جوی و اتمسفری است. وجود ابرها، ذرات معلق، بخار آب و دیگر گازهای جو می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر دقت اندازه‌گیری‌ها داشته باشد (Heymann et al., 2012). به ویژه در شرایط جوی نامساعد، این عوامل ممکن است موجب خطاهای سیستمی و کاهش دقت اندازه‌گیری‌ها شوند (Schneising et al., 2019). علاوه بر این، رویکرد بالا به پایین به انتخاب دقیق طول موج‌ها و باندهای طیفی نیاز دارد، زیرا گازهای مختلف می‌توانند باندهای جذب مشابهی داشته باشند و تداخل‌های طیفی ممکن است منجر به خطای اندازه‌گیری غلظت گاز شوند.

۳-۱- دسته‌بندی روش‌های پایش بالا به پایین

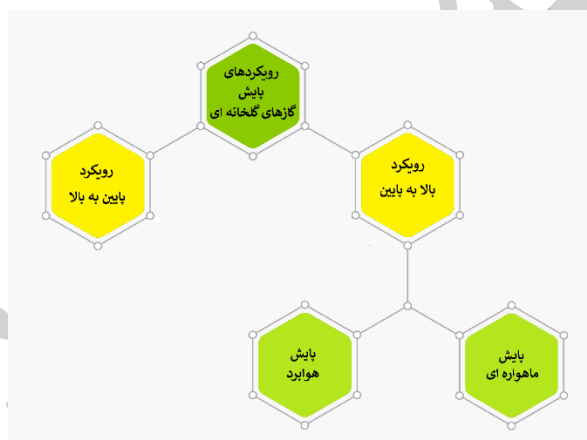
شکل ۱ رویکردهای مختلف پایش گازهای گلخانه‌ای را نمایش می‌دهد. رویکرد بالا به پایین از مجموعه‌ای از روش‌ها و فناوری‌های سنجش از دور برای پایش گاز گلخانه‌ای متان بهره می‌برد که هر یک دارای ویژگی‌ها، مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند. این

رویکرد بر اساس نوع سکوی سنجش به دو دسته اصلی سنجش از دور ماهواره‌ای و هوابرد تقسیم می‌شود (Zhang et al., 2023). در هر دو دسته، ابزارها و تکنیک‌های مشابهی برای شناسایی و اندازه‌گیری گازهای گلخانه‌ای به کار گرفته می‌شود.

یکی از تکنیک‌های اصلی در سنجش از دور گاز متان، طیف‌سنجی مادون قرمز است که در دو روش اصلی، مادون قرمز حرارتی و مادون قرمز موج کوتاه، به کار می‌رود. هر دو روش از جذب طیفی تابش در باندهای خاص مادون قرمز برای شناسایی متان بهره می‌برند. این فناوری‌ها دقت بالایی در اندازه‌گیری دارند و امکان پایش غلظت متان را در مقیاس‌های وسیع فراهم می‌کنند، اما عواملی مانند شرایط جوی و تداخل طیفی ممکن است بر دقت داده‌های به‌دست‌آمده تأثیر بگذارند (Jiang et al., 2024).

فناوری لیدار نیز در رویکرد سنجش از دور بالا به پایین گاز متان به کار می‌رود و با بهره‌گیری از تابش لیزری، غلظت این گاز را در جو با دقت بالا اندازه‌گیری می‌کند. این روش، به دلیل توانایی شبیه‌سازی عمقی و حساسیت بالای خود، ابزاری قدرتمند برای شناسایی منابع انتشار متان محسوب می‌شود. همچنین، برخلاف روش‌های اپتیکی وابسته به نور خورشید، لیدار امکان جمع‌آوری داده‌های دقیق منابع انتشار را حتی در شرایط جوی نامساعد یا پوشش ابری فراهم می‌کند (Innocenti et al., 2017), (Bartholomew et al., 2017).

تنوع و گستردگی فناوری‌های به‌کاررفته در رویکرد بالا به پایین، آن را به ابزاری کارآمد برای پایش و ارزیابی انتشار متان تبدیل کرده است که بسته به شرایط محیطی و اهداف تحقیقاتی، می‌توان از هر یک از این فناوری‌ها برای بهینه‌سازی پایش گازهای گلخانه‌ای بهره برد.

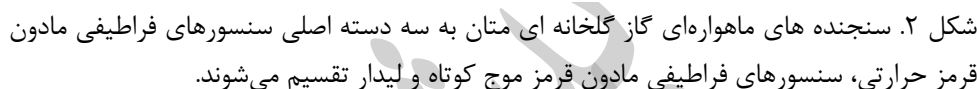


شکل ۱. دو رویکرد اصلی بالا به پایین و پایین به بالا برای پایش انتشار گازهای گلخانه‌ای وجود دارد. رویکرد بالا به پایین معمولاً شامل فناوری رصد ماهواره‌ای و هوایی است، در حالی که رویکرد از پایین به بالا معمولاً مبتنی بر کسب اندازه‌گیری داده‌های آماری می‌باشد.

۳-۱-۱- تکنیک‌های پایش سنجش از دور ماهواره‌ای متان

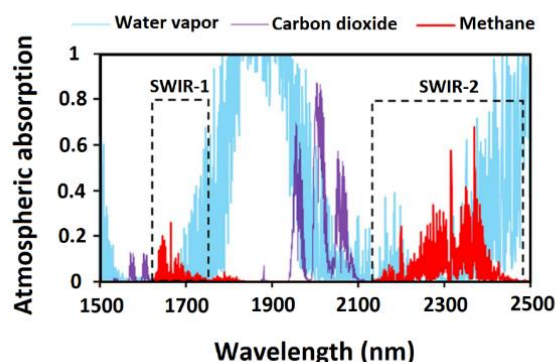
سنجش از دور ماهواره‌ای به یکی از روش‌های اصلی برای پایش غلظت گاز گلخانه‌ای متان تبدیل شده است. این تکنیک به دلیل قابلیت فراهم آوردن مشاهدات پویا، پایدار و پیوسته از متان در سطح جهانی، اهمیت زیادی پیدا کرده است. تشخیص مبتنی بر ماهواره عمدتاً بر استفاده از داده‌های سنجنده‌های ماهواره‌ای برای شناسایی منابع انتشار گاز متان در مقیاس جهانی متمرکز است (Tiemann et al., 2024). اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای امکان نمونه‌برداری مکرر را در مقیاس‌های منطقه‌ای تا جهانی فراهم کرده و می‌توانند تخمین‌هایی را در مناطقی که نمونه‌برداری به روش‌های دیگر ممکن نیست، ارائه دهند (Gupta et al., 2008).

شکل ۲ انواع تکنیک‌های پایش ماهواره‌ای گاز متان نمایش می‌دهد. اصل تشخیص ماهواره‌ای متان بر اساس جذب انتخابی تابش توسط مولکول‌های متان در طول موج‌های خاص است که منجر به ایجاد یک طیف جذب مشخص می‌شود. به منظور بازیابی غلظت متان، اطلاعات طیف‌های مشاهده‌شده توسط سنجنده‌های ماهواره‌ای استخراج می‌شوند. بسته به طول موج، محموله‌های



بازپراکنش خورشیدی یکی از تکنیک‌های پرکاربرد در پایش ماهواره‌ای گازهای گلخانه‌ای است که از نور خورشید به‌عنوان منبع اصلی انرژی برای انجام سنجش‌های جوی بهره می‌گیرد. این روش با استفاده از بازتاب و پراکندگی نور خورشید توسط مولکول‌های موجود در جو و سطح زمین، به اندازه‌گیری غلظت گازها می‌پردازد.

سیستم‌های سنجنده غیرفعال، عمدتاً بر روی نواحی طیفی مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز با طول موج کوتاه متمرکز هستند (Zhang et al., 2014). شکل ۳ ویژگی‌های جذب گازهای گلخانه‌ای متان، دی‌اکسید کربن و بخار آب را در طیف‌های جذب مادون قرمز موج کوتاه نشان می‌دهد که توسط شبیه‌سازی‌های انتقال تشعشعی تولید شده است. گاز گلخانه‌ای متان عمدتاً در دو محدوده طیفی مادون قرمز موج کوتاه، شامل ۱.۶ تا ۱.۸ میکرومتر به عنوان باند جذب ضعیف (SWIR-1) و ۲.۱ تا ۲.۵ میکرومتر به عنوان باند جذب قوی (SWIR-2)، جذب تابش را نشان می‌دهد (Varchand et al., 2024).



شکل ۳. گازهای گلخانه‌ای متان، دی‌اکسید کربن و بخار آب به دلیل ویژگی‌های کوانتومی خاص مولکول‌های خود، رفتار متفاوتی در جذب، انتشار و پراکندگی نور از خود نشان می‌دهد. گاز گلخانه‌ای متان در دو محدوده طیفی مادون قرمز موج کوتاه، شامل ۱.۶ تا ۱.۸ میکرومتر به‌عنوان باند جذب ضعیف (SWIR-1) و ۲.۱ تا ۲.۵ میکرومتر به‌عنوان باند جذب قوی (SWIR-2)، جذب تابش را نشان می‌دهد (Varchand et al., 2024).

تکنیک بازپراکنش خورشیدی در شناسایی منابع سطحی انتشار متان، مانند مزارع، تالاب‌ها و میادین نفت و گاز، بسیار مؤثر است. این تکنیک می‌تواند غلظت گاز گلخانه‌ای متان را در کل ستون جو، از لبه جو تا سطح زمین که منابع اصلی انتشار و جذب متان در آن قرار دارند، اندازه‌گیری کند (Butz et al., 2010). به دلیل وابستگی بازپراکنش خورشیدی به تابش نور خورشید، این تکنیک تنها در طول روز و در شرایط آسمان صاف، با زاویه خورشیدی حداقل ۱۰ درجه بالاتر از افق، قادر به سنجش گازهای گلخانه‌ای است (Ehret et al., 2017). همین وابستگی به تابش نور خورشید سبب ایجاد محدودیت‌هایی در پایش منابع انتشار مناطق تاریک و عرض‌های جغرافیایی بالا شده است (Kiemle et al., 2011). علاوه بر این، عواملی همچون بخار آب، ذرات معلق و تداخل گازهای دیگر در جو می‌توانند موجب کاهش دقت داده‌های سنجش گاز متان شوند. از این‌رو، علاوه بر انتخاب باندهای جذب طیفی متان، استفاده از مدل‌ها و الگوریتم‌های مناسب برای تصحیح اثرات مزاحم و بهبود کیفیت داده‌ها ضروری است. انتخاب بهینه باندهای جذب متان همراه با پردازش پیشرفته داده‌ها و تحلیل دقیق طیف نوری، باعث افزایش دقت بازیابی غلظت متان و کاهش خطاهای سنجش می‌شود (Sharifi Hashjin et al., 2019). ترکیب داده‌های حاصل از بازپراکنش خورشیدی با داده‌های دیگر تکنیک‌ها، مانند مادون قرمز حرارتی، می‌تواند به طور قابل توجهی دقت پایش گازهای گلخانه‌ای را افزایش دهد. این ترکیب، امکان تحلیل دقیق‌تر و جامع‌تر رفتار گازهای گلخانه‌ای در جو را فراهم کرده و به شبیه‌سازی‌های دقیق‌تر و نتایج معتبرتری در ارزیابی منابع انتشار کمک می‌کند.

در طول دهه‌های اخیر، طیف‌سنجی مادون قرمز موج کوتاه به‌عنوان یک روش مؤثر در پایش گاز متان از فضا توسعه یافته است. جدول ۱ فهرستی از سنجنده‌هایی که با تکنیک بازپراکنش خورشیدی در طیف مادون قرمز موج کوتاه به سنجش گاز گلخانه‌ای متان پرداخته‌اند را نمایش می‌دهد. نخستین تلاش‌ها در این حوزه با سنجنده SCIAMACHY بر روی ماهواره Envisat در سال ۲۰۰۲ آغاز شد. مطالعه‌ای با استفاده از این سنجنده نشان داده است که این ابزار می‌تواند غلظت متان را با دقت بالا در تروپوسفر پایینی اندازه‌گیری کند. نتایج سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۴ نشان می‌دهد که میزان غلظت متان در حوضه سیچوان چین، شمال آمریکای جنوبی و جلگه هند بیشتر از مقدار پیش‌بینی شده در مدل‌ها بوده است. همچنین، انتشار متان از مزارع برنج در آسیا بین ماه‌های آگوست تا اکتبر افزایش داشته و مدل‌ها احتمالاً میزان واقعی متان مناطق گرمسیری را کمتر برآورد کرده‌اند (Frankenberg et al., 2006). اگرچه سنجنده SCIAMACHY دستاوردهایی در شبیه‌سازی و اندازه‌گیری غلظت متان داشت، اما با محدودیت‌هایی همچون نویز بالا و پوشش مکانی محدود مواجه بود که به کاهش دقت و کارایی آن در پایش گسترده گازهای گلخانه‌ای منجر می‌شد (Bovensmann et al., 2004).

سپس، در سال ۲۰۰۹، ماهواره GOSAT با سنجنده TANSO-FTS دقت بالاتری در برآورد غلظت متان ارائه داد (Malina et al., 2021). پس از آن، GOSAT-2 (۲۰۱۸) با بهبود نسبت سیگنال به نویز، دقت اندازه‌گیری‌ها را افزایش داد (Imasu et al., 2023). در مطالعه‌ای که توسط ژو و همکاران (۲۰۱۶) انجام شد، داده‌های متان این سنجنده از مناطق زمینی و اقیانوسی با داده‌های ایستگاه‌های مرجع سطح زمین مقایسه گردید. نتایج نشان داد که پراکندگی گاز متان بیشتر از گاز دی اکسید کربن بوده و داده‌های متان مناطق اقیانوسی تطابق بهتری با اندازه‌گیری‌های ایستگاه‌های مرجع داشته و خطای کمتری نسبت به داده‌های مناطق زمینی دارند (Zhou et al., 2016).

مأموریت‌های بعدی پایش ماهواره ای گاز های گلخانه ای مانند OCO-2 (۲۰۱۴) و OCO-3 (۲۰۱۹) نیز اگرچه عمدتاً برای اندازه‌گیری گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن طراحی شده بودند، اما توانایی سنجش متان را نیز داشتند (Eldering et al., 2018). این پیشرفت‌ها نشان‌دهنده گسترش قابلیت‌های ماهواره‌ها در پایش دقیق‌تر گازهای گلخانه‌ای و کمک به بهبود مدل‌های اقلیمی بوده است.

تحولی مهم در این حوزه با پرتاب ماهواره Sentinel-5P در سال ۲۰۱۷ و سنجنده TROPOMI رقم خورد که در حالت خاص، قدرت تفکیک مکانی بی‌سابقه‌ای به اندازه ۷ در ۵.۵ کیلومتر را در اندازه‌گیری متان فراهم کرد (Mastrogiacomio et al., 2025). همین حد تفکیک مکانی بالا، همراه با توانایی سنجنده در ارائه داده‌های روزانه و گسترده، موجب شد که پژوهشگران حوزه پایش گاز متان توجه ویژه‌ای به این داده‌ها داشته باشند. آن‌ها نه تنها از داده‌های TROPOMI برای رصد دقیق‌تر تغییرات متان در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و جهانی بهره برده‌اند، بلکه این اطلاعات را به‌عنوان منبعی کلیدی برای بهبود و تکمیل فهرست‌های انتشار متان به کار گرفته‌اند. ترکیب این داده‌ها با مدل‌های انتشار و سایر منابع اطلاعاتی، امکان شناسایی دقیق‌تر منابع انسانی و طبیعی متان را فراهم کرده و به کاهش عدم قطعیت در برآوردهای انتشار این گاز کمک کرده است (Nesser et al., 2024; Dubey et al., 2023; Gao et al., 2023; de Foy et al., 2023).

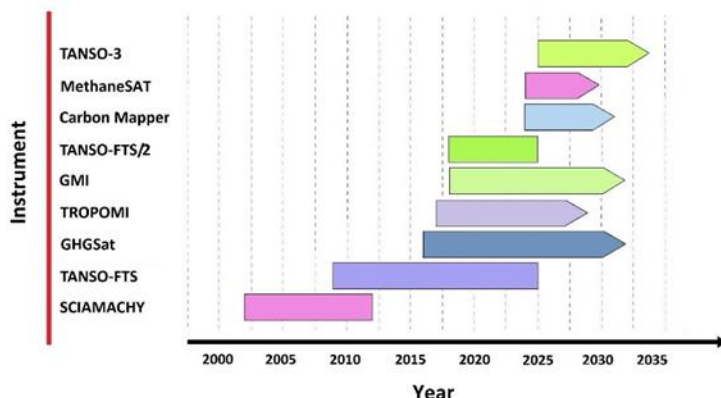
در مطالعه‌ای که توسط لیو و همکاران (۲۰۲۴) انجام شد، از داده‌های سنجنده TROPOMI برای برآورد انتشار سالانه متان در منطقه خاورمیانه طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱ استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که میزان انتشار متان در برخی مناطق، به‌ویژه در تهران و اصفهان، به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از مقادیر گزارش‌شده در پایگاه‌های داده‌ای EDGAR و CEDS است. به‌طور خاص، برآوردهای مبتنی بر مشاهدات ماهواره‌ای نشان دادند که میزان انتشار متان در تهران تا ۵۰٪ و در اصفهان تا ۷۰٪ بیشتر از مقادیر ارائه‌شده در این پایگاه‌های داده‌ای است. این اختلاف نشان می‌دهد که ممکن است روش‌های سنتی برآورد انتشار متان، به‌ویژه در کلان‌شهرها، مقدار واقعی را کمتر از میزان موجود تخمین زده باشند (Liu et al., 2024).

ماهواره MethaneSAT در مارس ۲۰۲۴ به فضا پرتاب شد. این مأموریت با تمرکز بر پایش دقیق انتشار متان، به‌ویژه در صنایع نفت و گاز، طراحی شده است. هدف اصلی این ماهواره، کمک به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهبود درک الگوهای انتشار متان از منابع صنعتی است و از داده‌های آن برای ارائه راهکارهای مؤثر در مقابله با تغییرات اقلیمی و بهبود سیاست‌های محیط‌زیستی استفاده خواهد شد (Chan Miller et al., 2024). شکل ۴، سال‌های فعالیت سنجنده‌های ماهواره‌ای پایش گاز متان با استفاده از تکنیک طیف‌سنجی مادون قرمز موج کوتاه نمایش می‌دهد که توسعه و پیشرفت این فناوری در سال‌های اخیر در آن مشهود است. این پیشرفت‌ها در فناوری‌های سنجش از دور، نه تنها قابلیت‌های بالایی برای پایش دقیق‌تر و جامع‌تر انتشار متان در سطح جهانی فراهم کرده‌اند، بلکه به تحلیل‌های دقیق‌تری در زمینه تغییرات اقلیمی و مدیریت انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز کمک خواهند کرد.

جدول ۱. سنجنده‌های ماهواره‌ای در پایش متان با طیف‌سنجی مادون قرمز موج کوتاه

منبع	قدرت تفکیک مکانی	باند مادون قرمز موج کوتاه پایش متان	زمان گذر	سال پرتاب	آژانس	سنجنده / ماهواره
------	------------------	-------------------------------------	----------	-----------	-------	------------------

Envisat/SCIAMACHY	ESA	2003	10:00	1630-1670 nm	30 × 60 KM2	Frankenberg et al., 2006
TANSO-FTS/GOSAT	JAXA	2009	13:00	1630-1700 nm	10 × 10 KM2	Inoue et al., 2016
GHGSat/ GHGSat	GHGSat, Inc	2016	09:30	1600-1700 nm	0.05 × 0.05 KM2	Jervis et al., 2021
TROPOMI/S5P	ESA-NSO	2017	13:30	2310-2390 nm	5.5 × 7 KM2	Cheng et al., 2024
GMI/GaoFen-5	CNSA	2018	10:30	2145-2365 nm	10.3 × 10.3 KM2	Xiao et al., 2018
TANSO-FTS-2/GOSAT-2	JAXA	2018	13:00	1630-1700 nm	9.7 × 9.7 KM2	Imasu et al., 2023



شکل ۴. بازه‌های زمانی فعالیت سنجنده‌های ماهواره‌ای پایش متان با تکنیک طیف‌سنجی مادون قرمز موج کوتاه

۳-۱-۱-۲- مادون قرمز حرارتی

یکی از تکنیک‌های پرکاربرد در ماهواره‌های پایش گازهای گلخانه‌ای، از جمله متان، استفاده از سنجنده‌های حساس به طیف مادون قرمز حرارتی است. بر اساس قانون پلانک، تمام اجسام با دمای بالاتر از صفر مطلق، تابش الکترومغناطیسی تولید می‌کنند که شدت و طول موج آن به دما و خصوصیات سطح جسم بستگی دارد. این تابش عمدتاً در طول موج‌های مادون قرمز منتشر می‌شود (Havens et al., 2015). زمین و جو نیز به‌عنوان منابع طبیعی این تابش عمل کرده و تابش‌های مادون قرمز حرارتی تولید می‌کنند.

از آنجاکه اندازه‌گیری میزان جذب حرارت در طول موج‌های مادون قرمز، نقش کلیدی در تخمین پتانسیل گرمایش جهانی گازهای گلخانه‌ای دارد، طیف‌سنجی مادون قرمز حرارتی برای شناسایی این گازها و بررسی اثر فعالیت‌های انسانی بر تغییرات آب‌وهوایی جهانی، ضروری است (Elrod et al., 1999).

سنجنده‌های مادون قرمز حرارتی نصب‌شده روی ماهواره‌ها، تابش‌های حرارتی منتشرشده از سطح زمین و جو را اندازه‌گیری می‌کنند. این تابش‌ها شامل اطلاعاتی درباره انتشار گازهای گلخانه‌ای در مسیر تابش هستند. متان بخشی از تابش مادون قرمز را در باندهای مشخصی جذب می‌کند؛ از جمله باندی در محدوده ۷.۴ تا ۸ میکرومتر که امکان شناسایی و اندازه‌گیری غلظت متان را در محدوده مادون قرمز حرارتی فراهم می‌کند (Scafutto et al., 2018). این جذب باعث کاهش شدت تابش در طول موج‌های مربوطه می‌شود که توسط سنجنده‌ها ثبت شده و به‌عنوان داده برای محاسبه غلظت متان استفاده می‌شود (Kubicki et al., 2024). این داده‌های خام با استفاده از مدل‌های انتقال تابش پردازش می‌شوند که تأثیر عواملی مانند بخار آب، دی‌اکسیدکربن و ذرات معلق در جو را بر تابش اندازه‌گیری‌شده تصحیح می‌کنند (Schneising et al., 2019). در نهایت، داده‌های پردازش‌شده به نقشه‌های توزیع متان تبدیل می‌شوند که برای پایش منابع انتشار، مانند میادین نفت و گاز، مناطق کشاورزی و تالاب‌ها به کار می‌روند.

یکی از مزایای مهم سنجنده های مادون قرمز حرارتی، عدم وابستگی آن‌ها به نور خورشید است. این سنجنده ها می‌توانند هم در روز و هم در شب داده جمع‌آوری کنند (Eisele et al., 2015) و با استفاده از تحلیل عمق نوری، غلظت گازهای گلخانه‌ای را در ارتفاعات مختلف جو تخمین بزنند (Barton-Grimley et al., 2022).

با وجود مزایای متعدد، این روش محدودیت‌هایی نیز دارد. گازهایی مانند دی‌اکسیدکربن و بخار آب، که باندهای جذب مشابهی با متان دارند، می‌توانند تحلیل داده‌ها را پیچیده کنند. همچنین، حضور ابرها و رطوبت زیاد در جو ممکن است تابش حرارتی را مسدود کرده و دقت اندازه‌گیری را کاهش دهد (Crosson., 2008). حدتفکیک مکانی مکانی این روش نیز نسبت به تکنیک‌هایی مانند لیدار یا تصویربرداری ابرطیفی پایین‌تر است و در مناطق با غلظت پایین متان ممکن است دقت کمتری داشته باشد. علاوه بر این، این تکنیک به اختلاف دمای سطح زمین و جو وابسته است و در مناطقی با اختلاف دمای کم، مانند مناطق قطبی در زمستان، دقت اندازه‌گیری کاهش می‌یابد (Lindqvist et al., 2024).

شکل ۵ برنامه زمانی فعالیت سنجنده‌های ماهواره‌ای را نمایش می‌دهد که با تکنیک طیف‌سنجی مادون قرمز حرارتی به پایش گاز متان پرداخته‌اند. تاریخچه استفاده از سنجنده‌های مادون قرمز حرارتی در پایش گاز گلخانه‌ای متان به دهه‌ها پیش برمی‌گردد و این تکنولوژی پیشرفت‌های قابل توجهی را در این حوزه به دنبال داشته است. همانطور که جدول ۲ نشان می‌دهد، یکی از نخستین ماهواره‌ها که از این تکنولوژی بهره برد، سنجنده IMG (۱۹۹۷) بود که سوار بر ماهواره ADEOS توسط آژانس MITI ژاپن برای شناسایی گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه متان، از طیف‌سنجی مادون قرمز حرارتی استفاده کرد (Imasu., 1998). در مطالعه‌ای که توسط کلربو و همکاران (۱۹۹۸) انجام شد، امکان پایش جهانی گاز متان با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی‌شده این سنجنده بررسی گردید. در این تحقیق، حساسیت تابش‌های طیفی مادون قرمز حرارتی ثبت‌شده توسط سنجنده به تغییرات غلظت متان ارزیابی شد. نتایج نشان داد که بازایی ستون کلی متان با استفاده از این سنجنده امکان‌پذیر است، اما دقت آن تحت تأثیر مشخصات طیفی و نسبت سیگنال به نویز قرار دارد. علاوه بر این، به دلیل دید نادر این سنجنده، بازایی پروفایل‌های عمودی متان به چالش کشیده می‌شود (Clerbaux et al., 1998).

با آغاز قرن بیست و یکم، سنجنده‌های پیشرفته‌ای همچون AIRS (۲۰۰۲) بر روی ماهواره AQUA ناسا، TES (۲۰۰۴) بر روی ماهواره Aura، و CrIS (۲۰۱۱) بر روی ماهواره‌های Suomi NPP، با بهره‌گیری از فناوری مادون قرمز حرارتی، امکان اندازه‌گیری غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو را فراهم کردند. این سنجنده‌ها نقش اساسی در پایش گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن و متان ایفا کرده‌اند (Xiong et al., 2013; Worden et al., 2013; Fu et al., 2016).

پژوهشگران کوشیده‌اند با استفاده از داده‌های این سنجنده‌ها، منابع انتشار متان را شناسایی کرده و پروفایل‌های عمودی غلظت این گاز را در جو بررسی کنند. باین‌حال، نتایج این مطالعات گاه تفاوت‌های چشمگیری نشان داده و در برخی موارد با یکدیگر همخوانی نداشته‌اند. در مطالعه‌ای که توسط شیونگ و همکاران (۲۰۰۸) انجام شد، پروفایل‌های عمودی متان با استفاده از داده‌های مادون قرمز حرارتی سنجنده AIRS تحلیل گردید. یافته‌ها نشان دادند که این داده‌ها حساسیت بالایی نسبت به لایه‌های میانی و بالایی تروپوسفر دارند. همچنین، تغییرات فصلی و تمرکز متان در برخی مناطق، به‌ویژه نواحی دارای شرایط جوی خاص، حاکی از الگوهای پیچیده توزیع متان در جو است که نیاز به بررسی‌های بیشتر دارد (Xiong et al., 2008). وردن و همکاران (۲۰۱۲) نیز با بهره‌گیری از داده‌های مادون قرمز حرارتی سنجنده TES، به بررسی متان و سایر گازهای جوی پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که این داده‌ها می‌توانند اطلاعات دقیق‌تری از پروفایل‌های عمودی متان در لایه‌های پایینی و میانی تروپوسفر ارائه دهند. این در حالیست که، در تروپوسفر بالا، به دلیل مشکلات کالیبراسیون و خطاهای دمایی، محدودیت‌هایی در دقت اندازه‌گیری مشاهده شد (Worden et al., 2012).

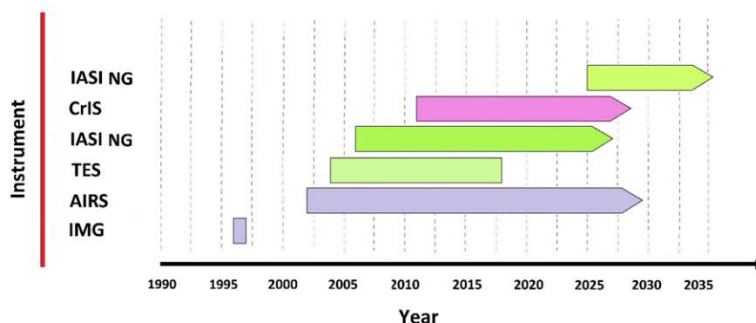
سنجنده IASI (۲۰۰۶)، که بر روی ماهواره‌های MetOp نصب شده است، با بهره‌گیری از فناوری مادون قرمز حرارتی، برای شناسایی گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه متان در جو به‌کار گرفته شد (Siddans et al., 2017). در پژوهشی که با استفاده از داده‌های این سنجنده انجام شد، پروفایل متان در تروپوسفر میانی و بالایی در شرایط آسمان صاف و بر فراز آبهای مناطق استوایی، مورد

بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که متان در نیمکره شمالی دارای یک چرخه فصلی قوی است و غلظت آن از عرض‌های جغرافیایی شمالی به جنوبی کاهش می‌یابد. الگوهای توزیع متان با مدل‌های جوی مطابقت دارند، اما تغییرپذیری بیشتری نشان می‌دهند. همچنین، شواهدی از انتقال متان به ارتفاعات بالاتر دیده شد، از جمله توده‌ای بزرگی از متان در جنوب آسیا که احتمالاً به دلیل انتشار از شالیزارهای برنج و انتقال آن توسط جریان‌های موسمی است (Crevoisier et al., 2009).

IASI-NG نسخه پیشرفته و به‌روز شده IASI است که برای استقرار بر روی ماهواره‌های نسل جدید MetOp-SG طراحی شده است. هدف این برنامه، افزایش دقت و قابلیت‌های اندازه‌گیری گازهای گلخانه‌ای از طریق فناوری پیشرفته مادون قرمز و جمع‌آوری داده‌هایی با قدرت تفکیک مکانی بالاتر است. این سنجنده به‌طور ویژه برای پایش دقیق تغییرات اقلیمی و شناسایی منابع انتشار آلاینده‌ها در مقیاس جهانی توسعه یافته است. علاوه بر این، این سنجنده قادر است به‌طور هم‌زمان اطلاعات جامع‌تری در مورد ساختار جو و وضعیت اقلیمی ارائه دهد که در بهبود مدل‌های پیش‌بینی اقلیمی و مدیریت آلودگی هوا نقش بسزایی خواهد داشت (He et al., 2025).

جدول ۲. سنجنده‌های ماهواره‌ای در پایش متان با طیف‌سنجی مادون قرمز حرارتی

منبع	قدرت تفکیک مکانی / کیلومتر مربع	باند مادون قرمز موج کوتاه پایش متان	زمان گذر	سال پرتاب	آژانس	سنجنده / ماهواره
Suzuki et al., 1999	8 × 8 KM ²	7100-8300 nm	10:30/22:30	1996	MITI	IMG/ADEOS
Pagano et al., 2010	45 × 45 KM ²	6200-8200 nm	13:30/01:30	2002	NASA	AIRS/AQUA
Clerbaux et al., 2008	5 × 8 KM ²	7580-8850 nm	13:30/01:30	2004	NASA	TES/AURA
August et al., 2012	12 × 12 KM ²	7100-8300 nm	09:30/21:30	2006	EUMETSAT	IASI/METOP-ABC
Fu et al., 2016	14 × 14 KM ²	7300-8000 nm	13:30/01:30	2011	NOAA	CrIS/Suomi NPP



شکل ۵. بازه‌های زمانی فعالیت سنجنده‌های ماهواره‌ای پایش متان با تکنیک طیف‌سنجی مادون قرمز حرارتی.

۳-۱-۱-۳- لیدار

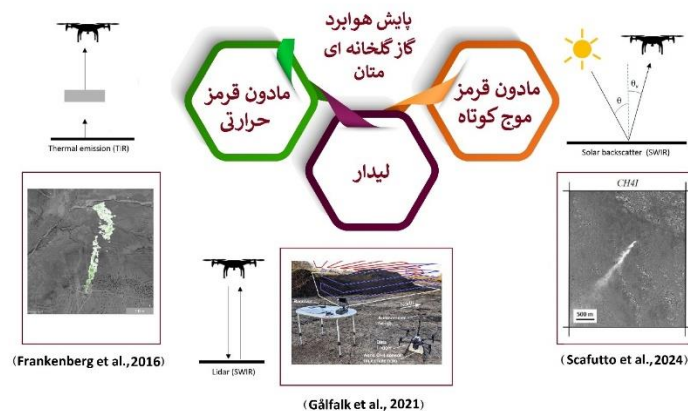
فناوری لیدار به‌عنوان ابزاری قدرتمند در سنجش از دور، امکان شناسایی و پایش دقیق گازهای گلخانه‌ای را فراهم می‌کند. این فناوری با استفاده از تابش لیزری، به‌طور دقیق فاصله‌ها و ویژگی‌های سطح زمین را اندازه‌گیری کرده و ترکیب گازهای موجود در جو را با دقت بالا شبیه‌سازی می‌کند. بهره‌گیری از فناوری لیدار در پایش انتشار متان، دقت و حساسیت بالایی ارائه می‌دهد و قادر است نرخ‌های انتشار کمتر از ۱.۵ کیلوگرم در ساعت را شناسایی کند. این توانایی منجر به شناسایی بیش از ۹۰ درصد از انتشار متان در حوضه‌های تولید نفت و گاز می‌شود. علاوه بر این، قدرت تفکیک فضایی بالا در اسکن‌های لیدار، امکان تعیین موقعیت جغرافیایی منابع انتشار را با دقتی حدود ۲ متر فراهم می‌آورد و این امر زمینه را برای اجرای راهبردهای شناسایی دقیق و قابل اعتماد منابع انتشار گاز فراهم می‌کند (Hua et al., 2024).

ماهواره‌های مجهز به لیدار، پالس‌های لیزری را در محدوده‌های طیفی خاص، مانند مادون قرمز نزدیک یا مادون قرمز موج کوتاه، به سمت جو یا سطح زمین ارسال می‌کنند (Harding., 2018). گازهای گلخانه‌ای، از جمله متان، در این طول‌موج‌ها دارای باندهای جذب مشخصی هستند که موجب تغییر در ویژگی‌های تابش بازگشتی می‌شود. سنجنده‌های لیدار با اندازه‌گیری دقیق زمان بازگشت تابش و تحلیل تغییرات طیفی آن، میزان جذب و در نتیجه غلظت گاز را در لایه‌های مختلف جو محاسبه می‌کنند (Jiang et al., 2024). داده‌های حاصل از این فرایند، پس از پردازش، به نقشه‌های توزیع مکانی و زمانی متان تبدیل می‌شوند. قدرت تفکیک فضایی بالای این نقشه‌ها، امکان جداسازی منابع انتشار، ارزیابی دقیق میزان انتشار و پایش تغییرات زمانی آن‌ها را فراهم می‌آورد (Thorpe et al., 2024).

یکی از مزایای کلیدی فناوری لیدار، توانایی آن در پایش گاز متان در تمامی فصول و عرض‌های جغرافیایی، بدون وابستگی به نور خورشید، است. علاوه بر این، به دلیل تأثیرگذاری اندک عوامل جوی همچون ذرات معلق و بخار آب، سنجنده‌های لیدار از خطای سیستماتیک بسیار پایینی در تخمین نسبت اختلاط متان در ستون هوای خشک برخوردارند (Pierangelo et al., 2016). استفاده از سنجنده‌های لیدار برای پایش گاز متان به‌طور قابل توجهی در دهه‌های اخیر پیشرفت کرده است. در اواخر دهه ۱۹۹۰، مفهوم استفاده از سنجنده‌های لیدار برای پایش گازهای گلخانه‌ای به‌طور جدی مطرح شد. یکی از نخستین سیستم‌های لیداری که به این منظور طراحی شد، سیستم‌های لیزری مبتنی بر فناوری برگشت تابش بودند که می‌توانستند اطلاعاتی در مورد ترکیبات جو و گازهای موجود در آن جمع‌آوری کنند. این تکنولوژی، به‌ویژه برای اندازه‌گیری گازهای دی‌اکسیدکربن و متان، بسیار کاربردی بود. ماهواره MERLIN یکی از مأموریت‌هایی است که از فناوری لیدار برای سنجنش متان بهره می‌برد و نقشی کلیدی در پایش تغییرات اقلیمی ایفا خواهد کرد. این پروژه نتیجه همکاری مشترک مرکز ملی مطالعات فضایی فرانسه و مرکز هوافضای آلمان است و بر طبق برنامه زمانبندی پروژه قرار است در سال ۲۰۲۸ به فضا پرتاب شده و حداقل ۳ سال به انجام فعالیت‌های خود در فضا بپردازد. این ماهواره با هدف اندازه‌گیری دقیق توزیع متان در جو زمین توسعه یافته است. در این مأموریت، برای نخستین بار، ترکیب جو از فضا با استفاده از تکنیک IPDA اندازه‌گیری خواهد شد. این روش بر اندازه‌گیری لیدار جذب تفاضلی (DIAL) متکی است که از یک لیزر پالسی با دو طول‌موج مجزا بهره می‌برد. یکی از طول‌موج‌ها دقیقاً بر روی یک ویژگی طیفی خط جذب متان تنظیم شده و دیگری، که از جذب متأثر نمی‌شود، به‌عنوان مرجع عمل می‌کند. تکنیک IPDA امکان سنجنش متان را در تمام فصول و عرض‌های جغرافیایی فراهم کرده و تأثیر عوامل مزاحمی همچون ذرات معلق و حساسیت متقاطع به بخار آب را به حداقل می‌رساند. این فناوری دقت بالایی در اندازه‌گیری نسبت اختلاط متان در ستون هوای خشک ارائه داده و سطح خطای سیستماتیک را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد (Pierangelo et al., 2016).

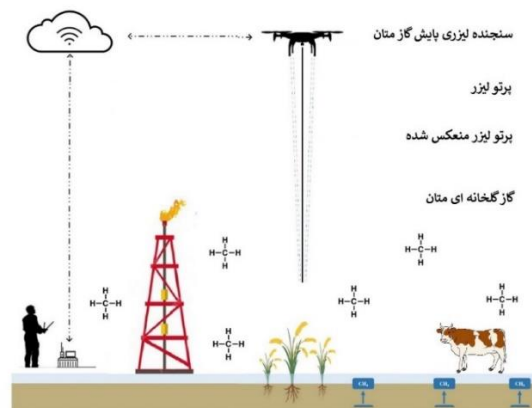
۳-۱-۲- تکنیک‌های پایش هوابرد متان

پایش هوابرد به مجموعه روش‌هایی اطلاق می‌شود که با استفاده از سکوها، سنجنش از دور هوایی مانند هواپیماها، پهپادها و بالن‌ها، داده‌های مرتبط با انتشار گازهای گلخانه‌ای را جمع‌آوری می‌کنند. شکل ۶ فناوری‌های به‌کار رفته در این روش را نمایش می‌دهد که شامل سنسورهای نوری و لیزری، طیف‌سنج‌های مادون قرمز موج کوتاه و حرارتی هستند. این فناوری‌ها امکان شبیه‌سازی و تحلیل دقیق انتشار متان را در مقیاس‌های مختلف فراهم می‌آورند. این تجهیزات قابلیت اندازه‌گیری مستقیم غلظت متان و تحلیل ویژگی‌های انتشار آن در سطح زمین و جو را دارند.



شکل ۶. سکوه‌های هوابرد، پایش متان از سنجنده‌های مختلفی بهره می‌برند که بر اساس ویژگی‌های طیفی متان طراحی شده‌اند. مهم‌ترین تکنیک‌های مورد استفاده در این زمینه عبارت‌اند از مادون قرمز حرارتی، مادون قرمز موج کوتاه و لیدار. در سال‌های اخیر، پهپادهای نظارتی در تحقیقات علمی و کاهش خسارات ناشی از بلایای طبیعی به کار گرفته شده‌اند (Thompson et al., 2015). این پهپادها به دلیل امکان پرواز در ارتفاعات پایین و زیر ۱۰۰ متر، در مقایسه با هواپیماهای سرنشین‌دار، کارایی بالاتری در پایش انتشار محلی گازهای گلخانه‌ای دارند (Meshcherinov et al., 2025). در پایش هوابرد متان، بیشتر سنجنده‌های نصب‌شده روی هواپیماها و پهپادهای کوچک از طیف‌سنجی جذب لیزری بهره می‌برند که روشی دقیق و مؤثر برای تشخیص غلظت این گاز در محیط‌های مختلف انتشار است (Kistner et al., 2024). شکل ۷ نحوه پایش هوابرد گاز متان با استفاده از فن آوری لیدار را نمایش می‌دهد. در این روش، نور لیزر از میان نمونه‌ی گازی عبور کرده و مولکول‌های متان، بخش خاصی از آن را جذب می‌کنند. میزان جذب متناسب با غلظت متان منتشرشده است و این فرآیند مطابق قانون بیر-لامبرت توصیف می‌شود (Sang et al., 2019).

طیف‌سنجی جذب لیزری قادر است غلظت‌های بسیار پایین متان را با دقت بالا تشخیص دهد (Weng., 2024). این قابلیت به سکوه‌های هوابرد پایش متان امکان می‌دهد نشت‌های این گاز را با نرخ‌های بسیار پایین، مانند ۴۳ گرم در ساعت، شناسایی کرده و به تحلیل توزیع عمودی آن کمک کنند (Kistner et al., 2024). این روش علاوه بر دقت بالا، دارای مزایایی نظیر اندازه‌گیری سریع و بی‌درنگ، عدم نیاز به تماس مستقیم با نمونه و امکان پایش در محیط‌های صنعتی و طبیعی است (Fosco et al., 2024). یکی دیگر از مزایای کلیدی این روش در مقایسه با سنسجش ماهواره‌ای، هزینه‌های پایین و دقت بالای اندازه‌گیری در مقیاس محلی است. این ویژگی در شبیه‌سازی‌های مقیاس میدانی و بررسی منابع انتشار، برتری قابل‌توجهی ایجاد می‌کند (Hollenbeck et al., 2021).



شکل ۷. پایش هوابرد گاز متان با استفاده از فناوری طیف‌سنجی جذب لیزری برای تشخیص غلظت گاز متان در محیط‌های مختلف انتشار توسط پهپادهای کوچک انجام می‌گیرد. در این روش، نور لیزر از میان نمونه گازی عبور کرده و مولکول‌های متان بخشی از آن را در طول موج‌های خاص جذب می‌کنند.

پایش هوابرد متان یکی از روش‌های نوین و مؤثر در شناسایی و ردیابی منابع انتشار گازهای گلخانه‌ای است که کاربردهای گسترده‌ای در ارزیابی تأثیرات محیطی و تغییرات اقلیمی دارد. پژوهش‌های متعددی در زمینه پایش هوابرد متان انجام شده که نشان‌دهنده قابلیت‌های این روش در شناسایی دقیق‌تر منابع انتشار، به خصوص در سطح محلی و منطقه‌ای است. این روش به‌ویژه جهت شناسایی منابع مختلف انتشار متان، از جمله تالاب‌ها، دامداری‌ها، محل‌های دفن زباله و تأسیسات نفت و گاز، اهمیت ویژه‌ای دارد. در مطالعه‌ای که در چارچوب کمپین METHANE-To-Go Africa انجام شد، فیهن و همکاران (۲۰۲۲) به کاربرد داده‌های هوابرد برای شناسایی منابع انتشار متان در تأسیسات نفت و گاز اشاره کردند. آنها تأکید کردند که این روش می‌تواند به شبیه‌سازی و مدل‌سازی دقیق‌تر انتشار گازها در این مناطق کمک کند. نتایج این تحقیق نشان داد که تأسیسات قدیمی‌تر که تولید کمتری دارند، انتشار بیشتری نسبت به تأسیسات جدیدتر داشتند (Fiehn et al., 2022). همچنین پژوهش‌های دیگری نیز نشان دادند که استفاده از داده‌های سنجنده‌های هوابرد در مناطقی که پایش ماهواره‌ای با محدودیت‌های جدی روبه‌رو است، می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری از نشت‌ها و شناسایی منابع مختلف انتشار متان فراهم کند (Dooley et al., 2024; Reum et al., 2025; Maazallahi et al., 2025).

ترکیب پایش هوابرد با روش‌های دیگر، مانند پایش ماهواره‌ای و سنجش زمینی، می‌تواند داده‌های جامع و دقیقی درباره انتشار متان در سطح زمین و جو فراهم کند. با این حال، این روش نیز با چالش‌هایی از جمله نیاز به تجهیزات پیشرفته و تأثیرپذیری از شرایط جوی روبه‌رو است، به طوری که عواملی مانند جهت و سرعت باد می‌توانند دقت اندازه‌گیری‌ها را تحت تأثیر قرار دهند (Conrad et al., 2023).

۴- چالش‌ها و چشم‌انداز رویکرد بالا به پایین پایش متان

رویکرد بالا به پایین پایش گاز متان، علی‌رغم پیشرفت‌های قابل‌توجه در فناوری‌های سنجش از دور، همچنان با چالش‌های متعددی مواجه است که بر دقت، کارایی و گستره‌ی کاربرد این روش تأثیر می‌گذارد. این چالش‌ها را می‌توان به سه دسته‌ی کلی محدودیت‌های فناوری، موانع محیطی و جوی، و چالش‌های مرتبط با مدل‌سازی و تحلیل داده‌ها تقسیم‌بندی کرد. یکی از مهم‌ترین چالش‌های فناوری در پایش بالا به پایین متان، محدودیت‌های تفکیک مکانی و زمانی داده‌های به‌دست‌آمده از سنجنده‌های ماهواره‌ای است. سنجنده‌های فعلی، علی‌رغم توانایی اندازه‌گیری غلظت متان در مقیاس‌های وسیع، در تشخیص دقیق منابع نقطه‌ای انتشار، مانند نشت‌های کوچک در تأسیسات نفت و گاز یا انتشارهای پراکنده‌ی کشاورزی، با محدودیت‌هایی روبه‌رو هستند (Cooper et al., 2022). تفکیک مکانی پایین برخی سنجنده‌های ماهواره‌ای، به‌ویژه در باندهای طیفی مادون قرمز حرارتی، موجب کاهش دقت در شناسایی منابع انتشار کوچک و عدم تشخیص آن‌ها از پس‌زمینه‌ی جوی می‌شود (Mehrdad et al., 2024). علاوه بر این، تفکیک زمانی محدود در برخی مأموریت‌های ماهواره‌ای، به دلیل دوره بازدید مجدد طولانی، پایش مداوم متان را دشوار می‌سازد. این مسئله موجب می‌شود رویدادهای گذرا و ناپایدار از دید سنجنده‌ها پنهان بمانند. در نتیجه، تعیین دقیق کمیت انتشار متان صرفاً بر اساس مشاهدات ماهواره‌ای، به دلیل پراکندگی داده‌ها و پوشش نامنظم زمانی، با محدودیت‌هایی همراه است (He et al., 2025).

موانع محیطی و جوی نیز از دیگر چالش‌های اساسی این روش محسوب می‌شوند. تداخل طیفی متان با دیگر گازهای جوی، به‌ویژه بخار آب و دی‌اکسیدکربن، چالش بزرگی در تحلیل داده‌های طیفی ایجاد می‌کند و نیازمند استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته‌ی حذف اثرات مزاحم است (Hu et al., 2024). حضور ابرها، ذرات معلق و بخار آب در جو می‌تواند موجب جذب و پراکندگی تابش در باندهای مادون قرمز شود و دقت اندازه‌گیری‌های سنجنده‌ها را کاهش دهد (Thorpe et al., 2017).

چالش‌های مدل‌سازی و تحلیل داده‌ها نیز به‌عنوان یکی از موانع مهم در رویکرد بالا به پایین پایش متان شناخته می‌شوند. مدل‌های انتقال تابش که برای تصحیح تأثیرات جوّی و استخراج اطلاعات غلظت گاز متان استفاده می‌شوند، به دقت بالایی در پارامترهای ورودی مانند دما، فشار و رطوبت نیاز دارند (Jiang et al., 2024). ناهماهنگی در این پارامترها می‌تواند موجب ایجاد عدم قطعیت در داده‌های به‌دست‌آمده شود. پویایی جوّی و تغییرات سریع در ترکیب گازهای مختلف، نیز می‌تواند موجب اختلال در محاسبات غلظت متان و افزایش خطای سیستماتیک شود (Kostinek et al., 2021).

مدل‌سازی معکوس به‌عنوان یک روش تحلیلی برای کمی‌سازی انتشار متان به کار گرفته می‌شود؛ زیرا ردیابی مستقیم این گاز در طول زمان از طریق داده‌های خام ماهواره‌ای با عدم قطعیت‌های بالایی همراه است. در نتیجه، جزئیات مربوط به اندازه‌گیری‌های شار متان تا حدی از بین می‌رود. مدل‌سازی معکوس این عدم قطعیت‌ها را کاهش داده و دقت پایش را افزایش می‌دهد (Houweling et al., 2017). این فرآیند از مدل‌های انتقال جوی برای شبیه‌سازی حرکت مولکول‌های متان در جو استفاده می‌کند و با ترکیب داده‌های مشاهداتی انتشار و اطلاعات اولیه، به شناسایی و تعیین منبع انتشار متان می‌پردازد. مدل‌سازی معکوس برای حل معادلات پیوستگی جرم نیازمند داده‌های هواشناسی، موجودی انتشار و مشاهدات ماهواره‌ای است. مدل‌های لاگرانژی و اوپلری دو دسته اصلی از مدل‌های مورد استفاده در این روش هستند. مدل‌های لاگرانژی انتشار ذرات، مسیر حرکت مولکول‌های متان را به‌صورت ذرات مجزا در جو ردیابی می‌کنند، در حالی که مدل‌های اوپلری، انتشار متان را به‌عنوان یک میدان پیوسته در یک شبکه سلولی از جو شبیه‌سازی می‌کنند (Cooper et al., 2022).

مدل‌سازی معکوس نقش کلیدی در بهبود دقت تخمین انتشار متان از منابع مختلف دارد و با کاهش عدم قطعیت‌های موجود در داده‌های ماهواره‌ای، امکان تحلیل دقیق‌تر تغییرات مکانی و زمانی این گاز گلخانه‌ای را فراهم می‌کند. استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته تحلیل داده در پردازش داده‌های سنجشی می‌تواند به کاهش خطاهای سیستماتیک و بهبود تفکیک منابع انتشار کمک کند. علاوه بر این، ترکیب داده‌های چندمنبعی از سنجنده‌های ماهواره‌ای، هوابرد و زمینی به‌عنوان یک رویکرد آینده‌نگرانه، می‌تواند دقت پایش را افزایش داده و برآوردهای انتشار متان را بهبود بخشد.

۵- نتیجه‌گیری

پایش متان با رویکرد بالا به پایین، به ویژه از طریق فناوری‌های سنجش از دور ماهواره‌ای و سامانه‌های هوابرد، نقش حیاتی و تعیین‌کننده‌ای در نظارت جهانی بر انتشار این گاز گلخانه‌ای ایفا می‌کند. این رویکرد امکان شناسایی دقیق منابع انتشار، تخمین کمی غلظت متان در جو و پایش گسترده آن را در مقیاس‌های منطقه‌ای تا جهانی فراهم می‌سازد. فناوری‌هایی نظیر طیف‌سنجی مادون قرمز موج کوتاه، مادون قرمز حرارتی و لیدار، هر یک با ویژگی‌ها و مزایای خاص خود، ابزاری مؤثر در این زمینه محسوب می‌شوند.

با این حال، محدودیت‌هایی در عملکرد این روش‌ها وجود دارد که می‌تواند دقت و قابلیت اطمینان پایش را تحت تأثیر قرار دهد. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به تفکیک مکانی و زمانی محدود سنجنده‌ها، تأثیرپذیری قابل توجه از شرایط جوی نظیر پوشش ابری، بخار آب و ذرات معلق، و پیچیدگی‌های ذاتی در مدل‌سازی انتقال تابش و معکوس‌سازی داده‌های سنجشی اشاره کرد. همچنین، چالش‌هایی در تجمیع داده‌های مختلف و اعتبارسنجی نتایج با مشاهدات میدانی وجود دارد که نیازمند توسعه بیشتر فناوری‌ها و روش‌های تحلیل داده است.

پیشرفت‌های آتی در طراحی و توسعه سنجنده‌های با تفکیک‌پذیری بالاتر، بهبود مدل‌های انتقال تابش و شبیه‌سازی جوی و به‌کارگیری الگوریتم‌های پیشرفته مبتنی بر یادگیری ماشین و هوش مصنوعی در پردازش و بازیابی داده‌های سنجشی، می‌تواند به کاهش خطاها و افزایش دقت پایش متان کمک کند. علاوه بر این، ادغام داده‌های چندمنبعی از سامانه‌های ماهواره‌ای، هوابرد و ایستگاه‌های زمینی، به همراه توسعه الگوریتم‌های تحلیل داده‌های چندزمانه و چندبعدی، می‌تواند تفکیک دقیق‌تر منابع انتشار و تخمین‌های کمی قابل اطمینان‌تر را ممکن سازد.

در نهایت، این پیشرفت‌ها نقش مهمی در تقویت ابزارهای نظارتی اقلیمی ایفا می‌کنند و می‌توانند مبنایی مستحکم برای تدوین سیاست‌های مؤثر در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای فراهم آورند. بدین ترتیب، پایش جامع و دقیق متان، ضمن ارتقاء دانش علمی، می‌تواند به شکل‌گیری راهبردهای بهتر مدیریت تغییرات اقلیمی و حمایت از اهداف کاهش انتشار جهانی کمک کند.

منابع

Aghayeva, K., & Krauklit, G. (2024). Innovative software for analysing satellite data and methane emissions using radiative transfer model. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Технічні науки*, 29(3), 65–76. DOI: 10.24025/2306-4412.3.2024.337282

August, T., et al. (2012). IASI on Metop-A: Operational Level 2 retrievals after five years in orbit. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 113(11), 1340–1371. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2012.02.028

Bartholomew, J., et al. (2017). Wide area methane emissions mapping with airborne IPDA lidar. In *SPIE Proc.* Vol. 10406, 34–47. DOI: 10.1117/12.2276713

Barton-Grimley, R. A., et al. (2022). Evaluation of the High Altitude Lidar Observatory (HALO) methane retrievals during the summer 2019 ACT-America campaign. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15(15), 4623–4650. DOI: 10.5194/amt-15-4623-2022

Bovensmann, H., et al. (2004). SCIAMACHY on ENVISAT: In-flight optical performance and first results. In *SPIE Proc.* Vol. 5235, 160–173. DOI: 10.1117/12.514228

Butz, A., et al. (2010). CH₄ retrievals from space-based solar backscatter measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D24). DOI: 10.1029/2010JD014514

Chan Miller, C., et al. (2024). Methane retrieval from MethaneAIR using the CO₂ proxy approach. *Atmospheric Measurement Techniques*, 17(18), 5429–5454. DOI: 10.5194/amt-17-5429-2024

Chen, Z., et al. (2022). Methane emissions from China: a high-resolution inversion of TROPOMI satellite observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(16), 10809–10826. DOI: 10.5194/acp-22-10809-2022

Cheng, L., et al. (2024). Preliminary Global NO₂ Retrieval from EMI-II Onboard GF5B/DQ1 and Comparison to TROPOMI. *Remote Sensing*, 16(21), 4087. DOI: 10.3390/rs16214087

Clerbaux, C., et al. (2009). Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(16), 6041–6054. DOI: 10.5194/acp-9-6041-2009

Clerbaux, C., et al. (1998). Remote sensing of CO, CH₄, and O₃ using a spaceborne nadir-viewing interferometer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D15), 18999–19013. DOI: 10.1029/98JD01422

Clerbaux, C., et al. (2008). Measurements of SO₂ profiles in volcanic plumes from the NASA TES. *Geophysical Research Letters*, 35(22). DOI: 10.1029/2008GL035994

Conrad, B. M., et al. (2023). Robust probabilities of detection and quantification uncertainty for aerial methane detection. *Remote Sensing of Environment*, 288, 113499. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113499

Cooper, J., et al. (2022). Methane detection and quantification in the upstream oil and gas sector. *Environmental Science: Atmospheres*, 2(1), 9–23. DOI: 10.1039/D1EA00046B

Crevoisier, C., et al. (2009). Tropospheric methane in the tropics – first year from IASI hyperspectral infrared observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(17), 6337–6350. DOI: 10.5194/acp-9-6337-2009

Crosson, E. (2008). A cavity ring-down analyzer for measuring atmospheric levels of methane, carbon dioxide, and water vapor. *Applied Physics B*, 92(3), 403–408. DOI: 10.1007/s00340-008-3135-y

de Foy, B., et al. (2023). Investigating high methane emissions from urban areas detected by TROPOMI and their association with untreated wastewater. *Environmental Research Letters*, 18(4), 044004. DOI: 10.1088/1748-9326/acc118

Dooley, J. F., et al. (2024). A New Technique for Airborne Measurements to Quantify Methane Emissions Over a Wide Range: Implementation and Validation. *EGUsphere*, 2024, 1–26. DOI: 10.5194/egusphere-2024-760

Du, M., et al. (2024). City-level livestock methane emissions in China from 2010 to 2020. *Scientific Data*, 11(1), 251. DOI: 10.1038/s41597-024-03233-4

Dubey, L., Cooper, J., Staffell, I., Hawkes, A., & Balcombe, P. (2023). Comparing satellite methane measurements to inventory estimates: A Canadian case study. *Atmospheric Environment: X*, 17, 100198. DOI: 10.1016/j.aeaoa.2023.100198

- Ehret, G., Bousquet, P., Pierangelo, C., Alpers, M., Millet, B., Abshire, J. B., ... & Wirth, M. (2017). MERLIN: A French-German Space Lidar Mission Dedicated to Atmospheric Methane. *Remote Sensing*, 9(10), 1052. DOI: 10.3390/rs9101052
- Eisele, A., Chabrillat, S., Hecker, C., Hewson, R., Lau, I. C., Rogass, C., ... & Kaufmann, H. (2015). Advantages using the thermal infrared (TIR) to detect and quantify semi-arid soil properties. *Remote Sensing of Environment*, 163, 296–311. DOI: 10.1016/j.rse.2015.04.001
- Eldering, A., Taylor, T. E., O'Dell, C. W., & Pavlick, R. (2019). The OCO-3 mission: measurement objectives and expected performance based on one year of simulated data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(4), 2341–2370. DOI: 10.5194/amt-12-2341-2019
- Elrod, M. J. (1999). Greenhouse warming potentials from the infrared spectroscopy of atmospheric gases. *Journal of Chemical Education*, 76(12), 1702. DOI: 10.1021/ed076p1702
- Erland, B. M., Thorpe, A. K., & Gamon, J. A. (2022). Recent advances toward transparent methane emissions monitoring: a review. *Environmental Science & Technology*, 56(23), 16567–16581. DOI: 10.1021/acs.est.2c02136
- Fiehn, A., Eckl, M., Pühl, M., Bräuer, T., Gottschaldt, K. D., Aufmhoff, H., ... & Roiger, A. (2025). Airborne quantification of Angolan offshore oil and gas methane emissions. *EGUsphere*, 2025, 1–30. DOI: 10.5194/egusphere-2025-635
- Fosco, D., De Molfetta, M., Renzulli, P., & Notarnicola, B. (2024). Progress in monitoring methane emissions from landfills using drones: An overview of the last ten years. *Science of The Total Environment*, 945, 173981. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173981
- Frankenberg, C., Meirink, J. F., Bergamaschi, P., Goede, A. P. H., Heimann, M., Körner, S., ... & Wagner, T. (2006). Satellite chartography of atmospheric methane from SCIAMACHY on board ENVISAT: Analysis of the years 2003 and 2004. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D7). DOI: 10.1029/2005JD006235
- Frankenberg, C., Thorpe, A. K., Thompson, D. R., Hulley, G., Kort, E. A., Vance, N., ... & Green, R. O. (2016). Airborne methane remote measurements reveal heavy-tail flux distribution in Four Corners region. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(35), 9734–9739. DOI: 10.1073/pnas.1605617113

Fu, D., Bowman, K. W., Worden, H. M., Natraj, V., Worden, J. R., Yu, S., ... & Han, Y. (2016). High-resolution tropospheric carbon monoxide profiles retrieved from CrIS and TROPOMI. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(6), 2567–2579. DOI: 10.5194/amt-9-2567-2016

Fung, P. L., Al-Jaghbeer, O., Pirjola, L., Aaltonen, H., & Järvi, L. (2023). Exploring the discrepancy between top-down and bottom-up approaches of fine spatio-temporal vehicular CO₂ emission in an urban road network. *Science of the Total Environment*, 901, 165827. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165827

Gålfalk, M., Nilsson Påledal, S., & Bastviken, D. (2021). Sensitive drone mapping of methane emissions without the need for supplementary ground-based measurements. *ACS Earth and Space Chemistry*, 5(10), 2668–2676. DOI: 10.1021/acsearthspacechem.1c00106

Gao, M., Xing, Z., Vollrath, C., Hugenholtz, C. H., & Barchyn, T. E. (2023). Global observational coverage of oil and gas methane sources with TROPOMI. *Research Square Preprint*. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2681923/v1

Gupta, P., & Christopher, S. A. (2008). An evaluation of Terra-MODIS sampling for monthly and annual particulate matter air quality assessment over the Southeastern United States. *Atmospheric Environment*, 42(26), 6465–6471. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.04.010

Hancock, S. E., Jacob, D. J., Chen, Z., Nesser, H., Davitt, A., Varon, D. J., ... & Maasakkers, J. D. (2025). Satellite quantification of methane emissions from South American countries: a high-resolution inversion of TROPOMI and GOSAT observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25(2), 797–817. DOI: 10.5194/acp-25-797-2025

Harding, D. (2018). Pulsed laser altimeter ranging techniques and implications for terrain mapping. In J. Shan & C. K. Toth (Eds.), *Topographic Laser Ranging and Scanning* (2nd ed., pp. 201–220). CRC Press. DOI: 10.1201/9781315154381-5

Hardwick, S., & Graven, H. (2016). Satellite observations to support monitoring of greenhouse gas emissions. Grantham Institute Briefing Paper No. 16, Imperial College London. DOI: Not assigned; PDF link

Havens, K. J., & Sharp, E. J. (2015). Thermal imaging techniques to survey and monitor animals in the wild: A methodology. Academic Press. DOI: 10.1016/B978-0-12-803384-5.00001-4

- He, B., Xue, Y., Lu, X., Zhao, L., Jin, C., Wang, P., ... & Yuan, T. (2025). Monitoring oil and gas field CH₄ leaks by Sentinel-5P and Sentinel-2. *Fuel*, 383, 133889. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.133889
- He, H., Zheng, T., Zhao, J., Yuan, X., Sun, E., Li, H., ... & Wang, W. (2024). Improved Gaussian regression model for retrieving ground methane levels by considering vertical profile features. *Frontiers in Earth Science*, 12, 1352498. DOI: 10.3389/feart.2024.1352498
- He, T. L., Oomen, G. M., Tang, W., Bouarar, I., Chance, K., Clerbaux, C., ... & Brasseur, G. P. (2025). Challenges and opportunities offered by geostationary space observations for air quality research and emission monitoring. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 106(5). DOI: 10.1175/BAMS-D-23-0145.1
- Heymann, J., Bovensmann, H., Buchwitz, M., Burrows, J. P., Deutscher, N. M., Notholt, J., ... & Warneke, T. (2012). SCIAMACHY WFM-DOAS XCO₂: reduction of scattering related errors. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(10), 2375–2390. DOI: 10.5194/amt-5-2375-2012
- Hollenbeck, D., Zulevic, D., & Chen, Y. (2021). Advanced leak detection and quantification of methane emissions using sUAS. *Drones*, 5(4), 117. DOI: 10.3390/drones5040117
- Houweling, S., Bergamaschi, P., Chevallier, F., Heimann, M., Kaminski, T., Krol, M., ... & Patra, P. (2017). Global inverse modeling of CH₄ sources and sinks: an overview of methods. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(1), 235–256. DOI: 10.5194/acp-17-235-2017
- Hu, K., Feng, X., Zhang, Q., Shao, P., Liu, Z., Xu, Y., ... & Xia, M. (2024). Review of satellite remote sensing of carbon dioxide inversion and assimilation. *Remote Sensing*, 16(18), 3394. DOI: 10.3390/rs16183394
- Hua, Z., Huang, J., Shi, D., Yuan, K., Hu, S., & Wang, Y. (2024). Atmospheric carbon dioxide profile detection with a continuous-wave differential absorption lidar. *Optics and Lasers in Engineering*, 180, 108340. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2024.108340
- Imasu, R. (1998). Global distribution feature of methane and carbon monoxide as observed by DEOS/IMG sensor. In: ASSFTS8, 16–18 November, Toulouse, France. DOI: ندارد (مقاله کنفرانسی بدون DOI)
- Imasu, R., Matsunaga, T., Nakajima, M., Yoshida, Y., Shiomi, K., Morino, I., ... & Shi, C. (2023). Greenhouse gases Observing SATellite 2 (GOSAT-2): mission overview. *Progress in Earth and Planetary Science*, 10(1), 33. DOI: 10.1186/s40645-023-00562-2

Innocenti, F., Robinson, R., Gardiner, T., Finlayson, A., & Connor, A. (2017). Differential absorption lidar (DIAL) measurements of landfill methane emissions. *Remote Sensing*, 9(9), 953.

DOI: 10.3390/rs9090953

Inoue, M., Morino, I., Uchino, O., Nakatsuru, T., Yoshida, Y., Yokota, T., ... & Tanaka, T. (2016). Bias corrections of GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ with TCCON data and their evaluation using aircraft measurement data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(8), 3491–3512.

DOI: 10.5194/amt-9-3491-2016

Jacob, D. J., Turner, A. J., Maasakkers, J. D., Sheng, J., Sun, K., Liu, X., ... & Frankenberg, C. (2016). Satellite observations of atmospheric methane and their value for quantifying methane emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(22), 14371–14396.

DOI: 10.5194/acp-16-14371-2016

Jervis, D., McKeever, J., Durak, B. O., Sloan, J. J., Gains, D., Varon, D. J., ... & Tarrant, E. (2021). The GHGSat-D imaging spectrometer. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(3), 2127–2140.

DOI: 10.5194/amt-14-2127-2021

Jiang, Y., Zhang, L., Zhang, X., & Cao, X. (2024). Methane Retrieval Algorithms Based on Satellite: A Review. *Atmosphere*, 15(4), 449.

DOI: 10.3390/atmos15040449

Kiemle, C., Quatrevalet, M., Ehret, G., Amediek, A., Fix, A., & Wirth, M. (2011). Sensitivity studies for a space-based methane lidar mission. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(10), 2195–2211.

DOI: 10.5194/amt-4-2195-2011

Kistner, L., Schmoll, R., & Kroll, A. (2024). An airborne measurement system to detect, locate, and quantify methane emissions with attitude-based wind speed estimation. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 13(2), 211–218.

DOI: 10.5194/jsss-13-211-2024

Kostinek, J., Roiger, A., Eckl, M., Fiehn, A., Luther, A., Wildmann, N., ... & Butz, A. (2021). Estimating Upper Silesian coal mine methane emissions from airborne in situ observations and dispersion modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(11), 8791–8807.

DOI: 10.5194/acp-21-8791-2021

Kubicki, J., Kopczyński, K., & Młyńczak, J. (2024). RETRACTED: Climatic consequences of the process of saturation of radiation absorption in gases. (مقاله بازپس گرفته شده وضعیت غیرفعال یا حذف شده DOI)

Lambert-Girard, S., Allard, M., Piché, M., & Babin, F. (2015). Differential optical absorption spectroscopy lidar for mid-infrared gaseous measurements. *Applied Optics*, 54(7), 1647–1656. DOI: 10.1364/AO.54.001647

Li, L., Chen, Y., Fan, L., Sun, D., He, H., Dai, Y., ... & Chen, F. (2024). A high-precision retrieval method for methane vertical profiles based on dual-band spectral data from the GOSAT satellite. *Atmospheric Environment*, 317, 120183. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2024.120183

Lindqvist, H., Kivimäki, E., Häkkinen, T., Tsuruta, A., Schneising, O., Buchwitz, M., ... & Tamminen, J. (2024). Evaluation of Sentinel-5P TROPOMI methane observations at northern high latitudes. *Remote Sensing*, 16(16), 2979. DOI: 10.3390/rs16162979

Liu, M., van der A, R., van Weele, M., Bryan, L., Eskes, H., Veefkind, P., ... & Ding, J. (2024). Current potential of CH₄ emission estimates using TROPOMI in the Middle East. *Atmospheric Measurement Techniques*, 17(17), 5261–5277. DOI: 10.5194/amt-17-5261-2024

Liu, Z., Deng, Z., & Huang, X. (2023). A carbon-monitoring strategy through near-real-time data and space technology. *The Innovation*, 4(1), 100346. DOI: 10.1016/j.xinn.2022.100346

Maazallahi, H., Stavropoulou, F., Sutanto, S. J., Steiner, M., Brunner, D., Mertens, M., ... & Röckmann, T. (2025). Airborne in situ quantification of methane emissions from oil and gas production in Romania. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25(3), 1497–1511. DOI: 10.5194/acp-25-1497-2025

Malina, E., Muller, J. P., & Walton, D. (2021). A simple and quick sensitivity analysis method for methane isotopologues detection with GOSAT-TANSO-FTS. *UCL Open Environment*, 3. DOI: 10.14324/111.444/ucloe.000013

Mastrogiacomo, J. P., Crippa, M., MacDonald, C. G., Roehl, C., & Wunch, D. (2025). Estimating urban CH₄ emissions from satellite-derived enhancement ratios of CH₄, CO₂, and CO. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 130(4), e2025JD043394. DOI: 10.1029/2025JD043394

Mehrdad, S. M., Zhang, B., Guo, W., Du, S., & Du, K. (2024). First Investigation of Long-Term Methane Emissions from Wastewater Treatment Using Satellite Remote Sensing. *Remote Sensing*, 16(23), 4422. DOI: 10.3390/rs16234422

Meshcherinov, V., Kazakov, V., Spiridonov, M., Suvorov, G., & Rodin, A. (2025). Lidar-based gas analyzer for remote sensing of atmospheric methane. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 424, 136899. DOI: 10.1016/j.snb.2024.136899

- Montazeri, A., Zhou, X., & Albertson, J. D. (2021). Simultaneous quantification and changepoint detection of point source gas emissions using recursive Bayesian inference. *arXiv preprint* arXiv:2109.01603.
DOI: 10.48550/arXiv.2109.01603
- MuRong, Z., Guo, J. S., Zhang, Y. X., Jiang, Y., Zh, G. Y., & Bai, P. (2021). Research and application of SVM analysis model for spectral fingerprint of mixed gas. *Journal of Physics: Conference Series*, 1721(1), 012054.
DOI: 10.1088/1742-6596/1721/1/012054
- Nagao, T. M., & Suzuki, K. (2022). Characterizing vertical stratification of the cloud thermodynamic phase with a combined use of CALIPSO lidar and MODIS SWIR measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(21), e2022JD036826.
DOI: 10.1029/2022JD036826
- Nesser, H., Jacob, D. J., Maasakkers, J. D., Lorente, A., Chen, Z., Lu, X., ... & Randles, C. A. (2024). High-resolution US methane emissions inferred from an inversion of 2019 TROPOMI satellite data: contributions from individual states, urban areas, and landfills. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(8), 5069–5091.
DOI: 10.5194/acp-24-5069-2024
- Omemen, K. M., & Aldbbah, M. O. (2025). Climate Change: Key Contributors and Sustainable Solutions. *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability*, 3(1), 10–27.
DOI: 10.61123/ijees.2025.105
- Pagano, T. S., Chahine, M. T., & Fetzer, E. J. (2010, October). The Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) on the NASA Aqua Spacecraft: A general remote sensing tool for understanding atmospheric structure, dynamics, and composition. In *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XV* (Vol. 7827, pp. 162–169). SPIE.
DOI: 10.1117/12.865335
- Pandey, S., Houweling, S., Lorente, A., Borsdorff, T., Tsvilidou, M., Bloom, A. A., ... & Aben, I. (2021). Using satellite data to identify the methane emission controls of South Sudan's wetlands. *Biogeosciences*, 18(2), 557–572.
DOI: 10.5194/bg-18-557-2021
- Pierangelo, C., Millet, B., Esteve, F., Alpers, M., Ehret, G., Flamant, P., ... & Chevallier, F. (2016). Merlin (methane remote sensing Lidar mission): An overview. *EPJ Web of Conferences*, 119, 26001.
DOI: 10.1051/epjconf/201611926001
- Reum, F., Marshall, J., Bittig, H. C., Bretschneider, L., Broström, G., Dissanayake, A. L., ... & Roiger, A. (2025). Airborne observations reveal the fate of the methane from the Nord Stream pipelines. *Nature Communications*, 16(1), 351.
DOI: 10.1038/s41467-024-45034-2

Sang, J., Yang, X., He, T., & Li, J. (2019, May). High sensitive detection of atmospheric methane using infrared laser absorption spectroscopy. In LTO 2019 (Vol. 11170, pp. 82–89). SPIE.

DOI: 10.1117/12.2531687

Scafutto, R. D. M., de Souza Filho, C. R., Riley, D. N., & de Oliveira, W. J. (2018). Evaluation of thermal infrared hyperspectral imagery for the detection of onshore methane plumes: Significance for hydrocarbon exploration and monitoring. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, 311–325.
DOI: 10.1016/j.jag.2017.09.012

Scafutto, R. D. P. M., van der Werff, H., Bakker, W. H., van der Meer, F., & de Souza Filho, C. R. (2021). An evaluation of airborne SWIR imaging spectrometers for CH₄ mapping: Implications of band positioning, spectral sampling and noise. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 94, 102233.
DOI: 10.1016/j.jag.2020.102233

Schneising, O., Buchwitz, M., Reuter, M., Bovensmann, H., Burrows, J. P., Borsdorff, T., ... & Wunch, D. (2019). A scientific algorithm to simultaneously retrieve carbon monoxide and methane from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(12), 6771–6802.
DOI: 10.5194/amt-12-6771-2019

Sharifi Hashjin, S., Darvishi Boloorani, A., Khazai, S., & Abdollahi Kakroodi, A. (2019). Selecting optimal bands for sub-pixel target detection in hyperspectral images based on implanting synthetic targets. *IET Image Processing*, 13(2), 323–331.
DOI: 10.1049/iet-ipr.2018.5324

Siddans, R., Knappett, D., Kerridge, B., Waterfall, A., Hurley, J., Latter, B., ... & Parker, R. (2017). Global height-resolved methane retrievals from the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) on MetOp. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(11), 4135–4164.
DOI: 10.5194/amt-10-4135-2017.

Song, H., Sheng, M., Lei, L., Guo, K., Zhang, S., & Ji, Z. (2023). Spatial and Temporal Variations of Atmospheric CH₄ in Monsoon Asia Detected by Satellite Observations of GOSAT and TROPOMI. *Remote Sensing*, 15(13), 3389.
DOI: 10.3390/rs15133389

Subraveti, S. G., & Anantharaman, R. (2025). Methane enrichment from dilute sources: Performance limits and implications for methane removal and abatement. *ChemRxiv Preprint*.
DOI: 10.26434/chemrxiv-2025-q70cw-v2

Suzuki, M., Tsuno, K., Okumura, E., Kobayashi, H., Imasu, R., Shimoda, H., & Ogawa, T. (1999). Conceptual design study for an IMG follow-on instrument: atmospheric radiation spectrometer (ATRAS) proposed for mission demonstration satellite (MDS). In *Infrared*

Spaceborne Remote Sensing VII (Vol. 3759, pp. 118–129). SPIE.
DOI: 10.1117/12.373175

Thompson, D. R., et al. (2015). Real-time remote detection and measurement for airborne imaging spectroscopy: a case study with methane. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(10), 4383–4397.
DOI: 10.5194/amt-8-4383-2015

Thorpe, A. K., et al. (2017). Airborne DOAS retrievals of methane, carbon dioxide, and water vapor concentrations at high spatial resolution: application to AVIRIS-NG. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(10), 3833–3850.
DOI: 10.5194/amt-10-3833-2017

Thorpe, M., et al. (2024). Aerial Gas Mapping LiDAR for Methane Emissions Management at Oil and Gas Infrastructure. EGU General Assembly 2024, Abstract EGU24-13335.
DOI: 10.5194/egusphere-egu24-13335

Tiemann, E., et al. (2024). Machine learning for methane detection and quantification from space – a survey. *arXiv preprint*.
DOI: 10.48550/arXiv.2408.15122

Varchand, H. K., et al. (2024). Investigation of Spectral Bands and Sensor Parameters for Methane Emission Detection Imaging Spectrometer. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 109100.
DOI: 10.1016/j.jqsrt.2024.109100

Weng, B. (2024). The road to climate change mitigation via methane emissions monitoring. *Nature Reviews Electrical Engineering*, 1(2), 69–70.
DOI: 10.1038/s44287-023-00014-5

Wójcik-Gront, E., & Wnuk, A. (2025). Evaluating Methane Emission Estimates from Intergovernmental Panel on Climate Change Compared to Sentinel-Derived Air–Methane Data. *Sustainability*, 17(3), 850.
DOI: 10.3390/su17030850

Worden, J., et al. (2012). Profiles of CH₄, HDO, H₂O, and N₂O with improved lower tropospheric vertical resolution from Aura TES radiances. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(2), 397–411.
DOI: 10.5194/amt-5-397-2012

Worden, J., et al. (2013). CH₄ and CO distributions over tropical fires during October 2006 as observed by the Aura TES satellite instrument and modeled by GEOS-Chem. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(7), 3679–3692.
DOI: 10.5194/acp-13-3679-2013

Xiao, C. (2018). Emissivity image generation of Gaofen-5's thermal infrared bands using ASTER data. In EORSA 2018 (pp. 1–4). IEEE.
DOI: 10.1109/EORSA.2018.8598711

Xiong, X., et al. (2008). Characterization and validation of methane products from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS). *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113(G3).
DOI: 10.1029/2007JG000500

Xiong, X., et al. (2013). Detection of methane depletion associated with stratospheric intrusion by AIRS. *Geophysical Research Letters*, 40(10), 2455–2459.
DOI: 10.1002/grl.50464

Zhang, S., et al. (2023). Atmospheric remote sensing for anthropogenic methane emissions: Applications and research opportunities. *Science of The Total Environment*, 893, 164701.
DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164701

Zhang, Z., & Moore, J. C. (2014). *Mathematical and physical fundamentals of climate change*. Elsevier.
DOI: 10.1016/B978-0-12-407427-3.00001-6

Zhou, M., et al. (2016). Validation of TANSO-FTS/GOSAT XCO₂ and XCH₄ glint mode retrievals using TCCON data from near-ocean sites. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(3), 1415–1430.
DOI: 10.5194/amt-9-1415-2016