

Original Article

Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)

DOI: [10.22077/jdcr.2025.8956.1119](https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.8956.1119)

A Review of Different Bottom-Up Monitoring Approaches for the Greenhouse Gas Methane

Ali Rahimi¹, Manochehr Farajzadeh Asl^{2*}, Yosef Ghavidel Rahimi²

1. PhD Student of Climatology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2. Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Corresponding author: farajzam@modares.ac.ir

Extended abstract

Introduction

Methane (CH₄) is the second most significant greenhouse gas contributing to anthropogenic global warming after carbon dioxide (CO₂). Due to its high global warming potential and shorter atmospheric lifetime compared to CO₂, controlling and mitigating its emissions is a major challenge in environmental policies and climate change mitigation efforts. Approximately 75% of methane emissions originate from human activities, primarily in agriculture (livestock farming and rice cultivation), waste management (organic waste decomposition and landfills), and the oil and gas industry (extraction, transportation, and storage of fossil fuels). Accurate and comprehensive methane monitoring is essential for identifying major emission sources, developing effective mitigation strategies, and implementing regulatory policies. Methane monitoring methods are generally categorized into two main approaches: bottom-up monitoring, which assesses emissions through localized measurements and source-specific data modeling, and top-down monitoring, which relies on satellite observations, atmospheric measurements, and large-scale modeling to estimate emissions. This study aims to review and analyze various bottom-up monitoring methods, assess their advantages and limitations, and highlight their role in reducing methane emissions and improving environmental management.

Materials and Methods

This study is a systematic review that explores the theoretical and practical foundations of bottom-up monitoring, categorizing it into five major approaches: (1) direct on-site emission measurements, (2) indirect estimations and empirical modeling, (3) sensor networks and localized monitoring systems, (4) laboratory studies, and (5) sampling techniques and chemical analysis. The research examines the latest scientific advancements and authoritative studies, analyzing the advantages, limitations, and technical constraints of each bottom-up monitoring method. Additionally, the potential for integrating bottom-up monitoring with top-down approaches is explored to develop more precise and comprehensive methane emission assessment models.

Results and Discussion

Findings indicate that bottom-up monitoring is one of the most accurate methods for identifying and quantifying methane emission sources. By utilizing advanced sensors and innovative direct measurement techniques, this approach enables high-resolution spatial and temporal tracking of emissions, thereby reducing uncertainties in global emission models. Furthermore, data obtained from bottom-up monitoring enhances the validation and comparability of methane emission models, providing a stronger foundation for climate policy development. However, this approach faces several challenges, including high implementation costs, spatial and geographical limitations, the requirement for specialized equipment, and the need for standardized measurement protocols, which may hinder large-scale applications.

Conclusion

Overall, bottom-up monitoring is a crucial tool for environmental management and greenhouse gas emission control, offering valuable data for policymakers, regulatory agencies, and research institutions. This approach supports environmental organizations and emission-intensive industries in implementing targeted and efficient emission

reduction programs. However, its inherent limitations necessitate integration with top-down approaches to achieve a more precise and comprehensive understanding of methane emissions at local, regional, and global scales. The synergy between these two monitoring strategies enhances estimation accuracy, reduces data uncertainties, and provides a scientifically robust basis for policy formulation and methane mitigation efforts. Ultimately, advancements in measurement techniques, the development of high-precision monitoring technologies, and the standardization of monitoring processes will be pivotal in effective methane emission management and climate change mitigation.

Keywords: Global warming, Environmental management, Emission measurement, Gas sensors.

مستخلص
چکیده
مقدمه
روش کار
نتیجه گیری

مروری بر رویکردهای مختلف پایش از پایین به بالای گاز گلخانه‌ای متان

علی رحیمی^۱، منوچهر فرج‌زاده اصل^۲، یوسف قویدل رحیمی^۲

۱- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲- استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: farajzam@modares.ac.ir

چکیده

در میان گازهای گلخانه‌ای موجود در جو زمین، متان پس از دی‌اکسید کربن، دومین عامل مهم در تشدید گرمایش جهانی ناشی از فعالیت‌های انسانی به‌شمار می‌رود. تقریباً سه چهارم انتشار گاز گلخانه‌ای متان منشأ انسانی دارد و به همین دلیل، پایش انتشار آن با دو رویکرد پایش پایین به بالا و بالا به پایین ضروری است. در پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه پایش گاز گلخانه‌ای متان، رویکرد پایین به بالا به‌عنوان ابزاری حیاتی جهت پایش دقیق میزان انتشار این گاز از اهمیت بالایی برخوردار است. در مواردی که محققان به داده‌های دقیق و محلی نیاز دارند، رویکرد پایین به بالا، امکان ارائه راهکارهای هدفمند و محلی را فراهم می‌کند. این امر نه تنها به کاهش انتشار این گاز کمک می‌کند، بلکه بهبود مدیریت محیط‌زیست را نیز تسهیل می‌سازد. هدف از این تحقیق بررسی و تحلیل رویکردهای مختلف پایش پایین به بالا گاز گلخانه‌ای متان، به‌منظور شناسایی منابع انتشار و کمک به کاهش انتشار این گاز در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای است. رویکرد پایش پایین به بالا، بر اساس روش‌هایی همچون اندازه‌گیری‌های مستقیم یا غیرمستقیم در محل منبع انتشار، انواع حسگرهای تشخیص، مطالعات آزمایشگاهی و شیوه نمونه‌برداری دسته‌بندی می‌شوند. هرکدام از این روش‌ها نقاط قوت و ضعف خود را دارند و معمولاً جهت انتخاب یک یا چند روش، لازم است شرایطی همچون محیط جغرافیایی، هدف پژوهش و درجه دقت مورد نیاز مورد توجه قرار گیرد. ترکیب این روش با پایش بالا به پایین می‌تواند دقت ارزیابی انتشار متان را افزایش داده و تصویری جامع‌تر از توزیع و میزان انتشار این گاز ارائه دهد.

واژگان کلیدی: گرمایش جهانی، مدیریت محیط‌زیست، اندازه‌گیری انتشار، حسگرهای گازی.

۱- مقدمه

متان (CH_4) یکی از گازهای گلخانه‌ای اصلی است که به دلیل تأثیر شدید آن بر گرمایش جهانی، به‌ویژه در بازه‌های زمانی کوتاه مدت، مورد توجه محققان و سیاست‌گذاران قرار گرفته است (Akpasi et al., 2024). اگرچه متان به‌طور طبیعی در محیط‌های مختلفی مانند تالابها تولید می‌شود، ولی فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی، دفن زباله، استخراج سوخت‌های فسیلی و تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، نیز سهم عمده‌ای در افزایش سطح آن در اتمسفر دارند؛ به‌طوری که در سطح جهانی ۶۰ درصد از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای مربوط به منابع با منشأ فعالیت‌های انسانی است (Lorente et al., 2021). متان بعد از دی‌اکسید کربن (CO_2)، دومین گاز گلخانه‌ای مهم با منشأ انسانی است و در حالی که فراوانی کمتری دارد، پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) بالاتری نسبت به دی‌اکسید کربن دارد (Hu et al., 2013). پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) گاز گلخانه‌ای متان در یک دوره ۱۰۰ ساله حدود ۲۸ تا ۳۶ برابر دی‌اکسید کربن برآورد شده است (Balcombe et al., 2013). این بدان معنی است که متان در طی یک دوره ۱۰۰ ساله، ۲۸ تا ۳۶ برابر گرمای بیشتری در واحد جرم، نسبت به دی‌اکسید کربن را به دام می‌اندازد و این قدرت گرمایش بالای آن، متان را به یکی از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای مبدل کرده است. عمر اتمسفری متان تقریباً 9.1 ± 0.9 سال است (Prather et al., 2012). در طول این مدت، متان در جو باقی مانده و تأثیرات قابل توجهی بر افزایش دمای جو دارد.

گازهای گلخانه‌ای با جذب و نگهداری بخشی از پرتوهای فروسرخ بازتاب‌شده از سطح زمین، موجب افزایش دمای میانگین کره زمین شده و از عوامل اصلی تغییرات اقلیمی به‌شمار می‌روند (Fakhri., 2024). تحلیل‌های مبتنی بر داده‌های علمی و گزارش‌های نهادهای بین‌المللی حاکی از آن است که افزایش بی‌سابقه‌ی غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو زمین، که عمدتاً پیامد فعالیت‌های انسان‌ساخت است، نقش تعیین‌کننده‌ای در تشدید گرمایش جهانی و اختلال در تعادل سامانه‌های اقلیمی ایفا می‌نماید (Delqandi et al., 2023). گسترش بی‌رویه شهرها و شهرنشینی و نیز رشد بخش صنعت به خصوص در مجاورت شهرهای بزرگ و پرجمعیت و ترکیب آن‌ها با مجموعه عوامل طبیعی و اقلیمی نه‌تنها باعث افزایش آلودگی هوای شهرها شده، بلکه تغییراتی را در اقلیم جهانی به وجود آورده است (Rahimi et al., 2013). تغییر اقلیم در آغاز قرن بیستم‌ویکم به یکی از چالش‌های اساسی و پیچیده جهانی تبدیل شده است که عمدتاً ناشی از مداخلات انسانی در سیستم‌های طبیعی کره زمین است. این پدیده با برهم زدن تعادل‌های اقلیمی، اثرات عمیق و پایدار بر ابعاد اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی جوامع انسانی در سطح جهانی خواهد داشت (Farzaneh et al., 2023). با شروع انقلاب صنعتی، غلظت متان در اتمسفر به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. میانگین غلظت جهانی متان اتمسفر در سال ۲۰۲۱ به ۱۸۹۶ قسمت در میلیارد (ppb) رسید که این مقدار ۲/۵ برابر بیشتر از سال ۱۷۵۰ بود (Meyer et al., 2022). در سال‌های اخیر، غلظت متان در جو به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و در آوریل ۲۰۲۴ به بیش از ۱۹۳۱ قسمت در میلیارد (ppb) رسیده است که یکی از بالاترین سطوح در تاریخ ثبت شده است (NOAA, 2024).

در شرایط کنونی، با توجه به روند روبه‌رشد گازهای گلخانه‌ای در جو زمین و تأثیرات مستقیم و غیرقابل‌انکار آن بر تغییرات اقلیم جهانی، مطالعات دقیق‌تری در زمینه پایش گاز متان ضروری است. این تحقیق با هدف ارزیابی و تحلیل روش‌های مختلف پایش گاز متان، به‌ویژه در رویکرد پایین به بالا، طراحی شده است. درک دقیق‌تر از منابع انتشار و مکانیزم‌های انتشار گاز متان در مقیاس‌های محلی می‌تواند به‌طور چشمگیری به بهبود مدل‌های اقلیمی و کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی کمک کند.

یکی از اولویت‌های اصلی کمک به پیشبرد کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهبود پیش‌بینی‌های اقلیمی آینده، شناخت منشأ انتشار آنهاست. در حال حاضر دو رویکرد اصلی بالا به پایین و پایین به بالا برای پایش انتشار گازهای گلخانه‌ای متان وجود دارد. رویکرد پایش از بالا به پایین معمولاً شامل فناوری رصد ماهواره‌ای است، در حالی که در رویکرد پایش از پایین به بالا معمولاً مبتنی بر کسب اندازه‌گیری داده‌های آماری می‌باشد (Du et al., 2024). این دو رویکرد از نظر داده‌ها و روش‌های تحلیلی با یکدیگر تفاوت دارند و هر کدام مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند.

نحوه نگارش تمامی مراجع درون‌متنی: [SZ1] Commented
اصلاح گردد:
پرانتر. با فونت فارسی
متن درون پرانتز با فونت انگلیسی
نقطه بعد پرانتز، با فونت فارسی

در رویکرد پایش پایین به بالا، اندازه‌گیری‌ها و برآوردها از سطح زمین و منابع محلی انتشار متان آغاز می‌شود و در نهایت به سطوح بالاتر تعمیم داده می‌شوند. در این رویکرد، تمرکز اصلی بر مطالعه و اندازه‌گیری دقیق انتشار متان از منابع مشخص مانند صنعت نفت و گاز، کشاورزی، جنگل‌ها و محل‌های دفن زباله است. این رویکرد به دلیل دقت و تفکیک‌پذیری بالاتر، در مطالعات مقیاس‌های محلی و انجام اندازه‌گیری‌های دقیق‌تر، بسیار مؤثرتر است. استفاده از داده‌های مستقیم، اطلاعات دقیقی از منابع انتشار خاص فراهم می‌کند و به پژوهشگران اجازه می‌دهد که ضرایب انتشار و مدل‌ها را با داده‌های واقعی بهبود بخشد. مشکل رویکردهای پایین به بالا به دست آوردن نمونه از جمعیت‌های بزرگ و متنوع است؛ زیرا تعمیم داده‌های محلی به سطوح بزرگ‌تر ممکن است باعث خطاهای زیادی شود، چرا که منابع انتشار مختلف ممکن است رفتارهای متفاوتی داشته باشند (Allen., 2012).

پیشرفت‌های اخیر در حوزه پایش گاز گلخانه‌ای متان از طریق رویکرد پایین به بالا، نشان‌دهنده تلاش‌های گسترده‌ی محققان برای بهبود روش‌ها و تکنیک‌های اندازه‌گیری است. Erland و همکاران (۲۰۲۲) در مقاله‌ی خود بر پیشرفت‌های اخیر در پایش گاز متان، با تأکید بر روش‌های پایین به بالا تمرکز کرده‌اند. همچنین، آن‌ها ترکیب این روش‌ها با پایش ماهواره‌ای را به منظور افزایش دقت در ارزیابی انتشار گاز متان پیشنهاد داده‌اند. در مطالعه‌ای دیگر، Li و همکاران (۲۰۲۴) با بهره‌گیری از رویکرد پایین به بالا، به ارزیابی دقیق انتشار گاز متان در صنعت گاز طبیعی چین پرداخته‌اند. این مطالعه نشان می‌دهد که برآوردهای دقیق‌تر از طریق این رویکرد می‌تواند به شناسایی منابع اصلی انتشار متان کمک کند. در پژوهشی که توسط Ito و همکاران (۲۰۲۳) انجام شده است، با استفاده از رویکرد پایین به بالا، میزان انتشار گاز متان در آسیای شرقی سال‌های ۱۹۷۰ تا ۲۰۲۱ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان داد که منابع انسانی مسئول بخش عمده‌ای از افزایش انتشار متان بوده‌اند و ارزیابی‌های پایین به بالا می‌توانند به شفافیت بیشتر در پیش‌بینی‌ها و اقدامات کاهش انتشار کمک کنند. این مطالعات بر اهمیت بهره‌گیری از روش‌های دقیق و کارآمد در پایش پایین به بالای گاز متان تأکید داشته و ضرورت ادامه و توسعه‌ی این پژوهش‌ها را برای کاهش انتشار این گاز و بهبود پیش‌بینی‌های اقلیمی آشکار می‌سازند.

۲- مواد و روش‌ها

این مطالعه یک مقاله مروری است که با هدف ارزیابی و تحلیل روش‌های مختلف پایش گاز گلخانه‌ای متان، به‌ویژه با تمرکز بر رویکرد پایین به بالا، طراحی شده است. برای دستیابی به این هدف، مقالات و منابع علمی منتشرشده در پایگاه‌های داده معتبر بین‌المللی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. منابع انتخابی عمدتاً شامل مقالات منتشرشده در دهه اخیر بوده‌اند تا از جدیدترین روش‌ها و دستاوردها در زمینه پایش گاز متان بهره‌برداری شود. همچنین انواع مختلف منابع، از جمله مقالات پژوهشی، مروری، کنفرانسی و گزارش‌های معتبر بین‌المللی، به‌ویژه آن‌هایی که بر رویکرد پایین به بالا تمرکز دارند، در این مطالعه لحاظ شده‌اند. فرآیند جستجوی منابع از طریق پایگاه‌های علمی معتبر Google Scholar، Scopus و ScienceDirect انجام شد. این پایگاه‌ها به عنوان منابع اصلی برای گردآوری مقالات و منابع علمی مرتبط با پایش گاز متان و رویکردهای پایین به بالا انتخاب شدند، چرا که دسترسی به مقالات معتبر، به‌روز و داوری‌شده را فراهم می‌کنند. در این مطالعه، به‌منظور جستجوی مؤثرتر منابع علمی، از مجموعه‌ای از کلیدواژه‌های تخصصی در پایگاه‌های داده مختلف استفاده شد. این کلیدواژه‌ها نقش مهمی در یافتن منابع مرتبط با روش‌های مختلف پایش گاز متان، به‌ویژه در حوزه رویکرد پایین به بالا ایفا کردند.

پس از گردآوری منابع منتخب، مقالات به‌صورت سیستماتیک و کیفی مورد تحلیل قرار گرفتند. در این تحلیل‌ها، روش‌های گوناگون پایش گاز متان بررسی و مقایسه شده و مزایا و معایب هر یک از تکنیک‌ها در زمینه‌های زیست‌محیطی و صنعتی ارزیابی شدند. همچنین، نتایج مطالعات مختلف با یکدیگر مقایسه گردید تا نمایی کلی از وضعیت موجود در زمینه روش‌های پایش پایین به بالای گاز متان حاصل شود. جستجوی منابع در این مطالعه عمدتاً محدود به مقالات منتشرشده به زبان انگلیسی بود. همچنین، تنها مقالاتی که به‌طور خاص به روش‌های پایش گاز متان در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای پرداخته بودند، انتخاب شده و سایر منابع فاقد اطلاعات دقیق در این زمینه از فرآیند تحلیل حذف شدند.

۳- نتایج و بحث

با بررسی پژوهش‌هایی که با استفاده از رویکرد پایش پایین به بالا به پایش گاز گلخانه‌ای متان پرداختند، این رویکرد به پنج شاخه عمده شامل اندازه‌گیری مستقیم در منبع انتشار، اندازه‌گیری غیرمستقیم و برآوردهای تجربی، استفاده از حسگرها و شبکه‌های سنجش محلی، مطالعات آزمایشگاهی و روش‌های مبتنی بر نمونه‌برداری و تحلیل شیمیایی دسته‌بندی می‌شود.

۱-۳- اندازه‌گیری مستقیم در منبع انتشار

این روش‌ها بر اساس اندازه‌گیری مستقیم انتشار متان از یک منبع خاص می‌باشند و خود به سه بخش ماشین آلات و تحلیل گره ای قابل حمل، فلکس چمبرها و جریان‌سنج‌ها تقسیم می‌شود.

۱-۱-۳- ماشین‌آلات و تحلیل گره‌ای قابل حمل

استفاده از تحلیل‌گرهای قابل حمل از جمله تجهیزات پرکاربرد سنجش و اندازه‌گیری پایین به بالا انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند متان است. جهت دستیابی به منابع انتشار و درک صحیح از تغییرات و پراکندگی زمانی و مکانی گاز گلخانه‌ای متان، اتکا به ابزارهای قابل حمل در سنجش این گاز بسیار مهم است. زیرا با اندازه‌گیری‌های سریع و متحرک همچون نصب پایشگر گاز متان بر روی یک سکوی متحرک مانند خودرو، قایق و یا هواپیما می‌توان به ارزیابی و برآورد دقیقی از وضعیت انتشار در شرایط محلی دست یافت (Lelfer et al., 2014). این ابزارها به‌طور خاص برای اندازه‌گیری سریع، دقیق و در محل طراحی شده‌اند و در صنایع مختلفی مانند نفت و گاز، دامداری‌ها، محل‌های دفن زباله و منابع دیگر گاز متان استفاده می‌شوند.

آشکارسازهای گاز قابل حمل جهت پایش نشت گاز متان لازم است از ویژگی طراحی کم هزینه برای استفاده گسترده و در دسترس بودن برخوردار باشند. روش تثبیت شده برای تشخیص گاز متان، استفاده از یک حسگر کاتالیزوری است که البته مختص گاز متان نیست و هر گازی که احتراق آن توسط یک کاتالیزور انجام می‌شود را شناسایی می‌کند. اما استفاده از حسگرهای کاتالیزوری در ابزارهای قابل حمل، به دلیل آنکه در محیط‌های کم اکسیژن به درستی عمل نمی‌کنند ممکن است مناسب نباشد. زیرا چنین سیستم‌های آشکارساز ممکن است به بررسی‌های عملکردی مکرر نیاز داشته باشند. بنابراین، مناسب‌ترین نوع آشکارساز گاز در ابزارهای قابل حمل، آشکارسازهای است که بر اساس تکنیک‌های نوری همچون حسگر مادون قرمز پیرو الکتریک گازی توسعه یافتند (Jun et al., 2011).

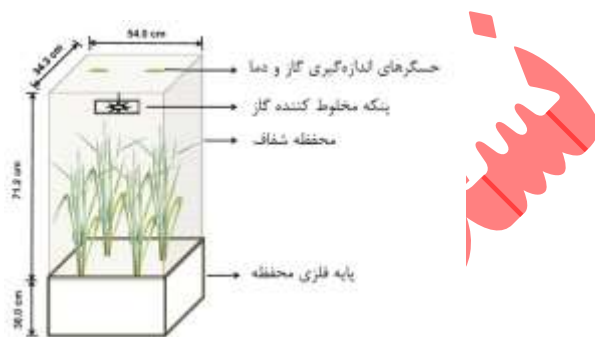
ماشین‌آلات و تحلیل‌گرهای قابل حمل به دلیل قابلیت جابه‌جایی، اندازه‌گیری بلادرنگ و دقت بالا در منابع نقطه‌ای بسیار کاربرد دارند. علاوه بر این با استفاده از این ابزارها می‌توان به ارزیابی سیستماتیک از عدم قطعیت‌ها دست یافت و با دستیابی به مقادیر سنجش قابل اعتماد و قابل تکرار، اقدام به انطباق، تعیین محدوده اندازه‌گیری و کالیبراسیون کرد (Wilkinson et al., 2018). با این حال، این ابزارها دارای چالش‌هایی مانند محدودیت در دسترسی به برخی مناطق، نیاز به نیروی انسانی و تأثیرپذیری از شرایط محیطی نیز هستند.

۲-۱-۳- فلکس چمبرها

محفظه‌های اندازه‌گیری‌های پایش گازهای بین سطح زمین و جو دارای سابقه قریب به یک قرن می‌باشد. در طول این سال‌ها تکنیک‌های محفظه‌ای مختلف، از جمله استاتیک و دینامیک با درجات کارایی مختلف در تخمین گازهای گلخانه‌ای مانند دی اکسید کربن، متان، دی‌نیتروژن مونوکسید مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Pavelka et al., 2018).

فلکس چمبرها معمولاً از پلاستیک شفاف، فلز یا مواد مقاوم در برابر گاز ساخته می‌شود. این دستگاه‌ها شامل یک محفظه هستند که روی سطح منبع انتشار قرار می‌گیرد تا گازهای خارج‌شده از منبع به‌طور موقت در یک فضای محدود جمع شوند. سپس به

اندازه‌گیری و تحلیل تغییرات غلظت گاز در طول زمان می‌پردازند. طراحی چمبر به وضعیت محیط و منشأ انتشار بستگی دارد. اشکال محفظه معمولاً به صورت استوانه‌ای یا مستطیلی هستند. شکل ۱ نمونه‌ای شماتیک از یک چمبر مستطیلی شکل جهت جمع‌آوری انتشار متان در مزرعه برنج را نمایش می‌دهد. یک چمبر استوانه‌ای شکل امکان اختلاط یکنواخت‌تر هوای محصور را فراهم می‌کند، درحالی‌که در چمبرهای مستطیل شکل، به‌ویژه در گوشه‌های بالایی محفظه، نواحی راکدی ایجاد می‌شود که می‌تواند مانع از جریان مؤثر هوا و ترکیب کامل آن شود (Livingston et al., 1995).



شکل ۱. یک نمونه شماتیک از چمبر مورد استفاده برای جمع‌آوری انتشار متان در مزرعه برنج (Parthasarathi et al., 2019).

Figure 1. A schematic example of a chamber used to collect methane emissions in a rice field (Parthasarathi et al., 2019).

در محفظه چمبرها حسگرهایی برای اندازه‌گیری غلظت گازهای مختلف از جمله متان قرار دارند. این حسگرها می‌توانند شامل فناوری‌های اسپکتروسکوپی مادون قرمز، الکتروشیمیایی یا لیزری باشند. با ظهور تکنیک‌های تحلیل جریان پیوسته و افزایش دقت ابزارهای سنجش همچون طیف‌سنجی حلقه‌ای حفرة، حسگرهای گاز مادون قرمز و فوتو آکوستیک، نیاز به دوره‌های تجمع طولانی تر برای تشخیص تغییرات غلظت منسوخ شده است و دوره انباشت گاز در محفظه تا حد امکان کاهش یافته است (Siegenthaler et al., 2016).

از مزایای استفاده از فلکس چمبرها می‌توان به امکان اندازه‌گیری دقیق و محلی انتشار گاز متان برای انواع مختلفی از منابع طبیعی و انسانی انتشار گاز اشاره کرد. علاوه بر این روش‌های محفظه‌ای دارای هزینه نسبتاً کم و عملکرد ساده هستند و به دلیل ویژگی‌های ساختاری ساده و قابل حمل بودن، به راحتی در محل‌های مختلف قابل استفاده‌اند و نیازی به تجهیزات پیچیده و بزرگ ندارند (Siegenthaler et al., 2016). طراحی استاندارد و ایزوله کردن منبع انتشار در فلکس چمبرها، تأثیرات متغیرهای محیطی مانند تابش، بارش، دما، سرعت باد را کاهش داده و شرایط را برای اندازه‌گیری‌های دقیق‌تر فراهم می‌کند (Pavelka et al., 2018).

فلکس چمبرها نیز همچون دیگر ابزارهای سنجش گازهای گلخانه‌ای محدودیت‌هایی در استفاده دارند. برای به دست آوردن داده‌های دقیق و معتبر، اندازه‌گیری‌ها باید در مدت زمان مشخصی انجام شوند. این دستگاه‌ها تنها بر روی یک منطقه کوچک کار می‌کنند؛ بنابراین برای محاسبه انتشار گاز در مقیاس بزرگ، مانند یک مزرعه یا تالاب وسیع، نیاز به نمونه‌برداری‌های متعدد و پراکنده است که ممکن است نتواند به‌طور دقیق کل منطقه را پوشش دهد. این موضوع ممکن است فرآیند جمع‌آوری داده‌ها را طولانی کند. این امر می‌تواند به هزینه‌های اضافی تعمیر و نگهداری ابزار سنجش گاز منجر شود. علاوه بر این، نیاز به نگهداری منظم و کالیبراسیون مداوم از دیگر محدودیت‌های فلکس چمبرهاست تا دقت و صحت نتایج حفظ شود. تمامی این محدودیت‌ها باعث می‌شوند که فلکس چمبرها نتوانند تخمین مناسبی از تبادل گازهای گلخانه‌ای ارائه دهند و یا استفاده از آن‌ها را با محدودیت‌هایی مواجه می‌کند (Pavelka et al., 2018).

۳-۱-۳- جریان‌سنج‌ها

این ابزارهای دقیق به‌طور عمده برای اندازه‌گیری جریان گازها در سیستم‌های بسته مانند خطوط لوله، دودکش‌های صنعتی و سیستم‌های استخراج گاز کاربرد دارند. از آنجایی که متان یک گاز گلخانه‌ای بسیار قدرتمند است، استفاده از دستگاه‌های دقیق مانند جریان‌سنج‌ها به محققان و صاحبان صنایع کمک می‌کند تا میزان دقیق انتشار آن را ارزیابی و کنترل کنند. جریان‌سنج‌ها با استفاده از تکنیک‌های مختلف جریان گاز را درون یک مجرا یا لوله اندازه‌گیری می‌کنند. نوع جریان‌سنج مورد استفاده بستگی به ویژگی‌های گاز و شرایط محیطی دارد. انواع رایج جریان‌سنج‌ها بر اساس عملکرد دستگاه شامل حرارتی، جرمی، مافوق صوت و اختلاف فشار می‌باشد. جریان‌سنج‌های حرارتی با استفاده از تغییرات دما در جریان گاز به اندازه‌گیری می‌پردازند. این دستگاه‌ها گرما را به سیال تحمیل کرده و میزان انتقال حرارت را اندازه‌گیری می‌کنند. سپس بر اساس میزان انتقال حرارت به گاز، سرعت جریان محاسبه می‌شود (Farzaneh-Gord et al., 2015). این روش برای جریان‌های کم گاز متان مناسب است.

جریان‌سنج‌های جرمی، جرم واقعی گاز عبوری از یک مقطع مشخص را به‌طور مستقیم محاسبه می‌کنند، که برای اندازه‌گیری دقیق انتشار گاز متان بسیار کارآمد است. برخلاف سیستم‌های اندازه‌گیری گاز سنتی مبتنی بر جریان‌سنج‌های حجمی کلاسیک، جریان‌سنج‌های جرمی، سیگنال خروجی تولید می‌کنند که می‌تواند در برنامه‌های کاربردی کنترل گاز و اندازه‌گیری خودکار مورد استفاده قرار گیرند (de Matos et al., 2010).

جریان‌سنج‌های مافوق صوت از امواج صوتی برای اندازه‌گیری سرعت و جریان گاز استفاده می‌کنند. در این جریان‌سنج، دو مبدل در مسیر جریان نصب شده‌اند، به‌گونه‌ای که پالس‌های فرا صوتی منتشر شده از یک مبدل توسط مبدل دیگر دریافت می‌شوند و در نتیجه، یک مسیر صوتی شکل می‌گیرد. امواج صوتی با عبور از گاز، سرعت جریان آن را اندازه‌گیری کرده و از این داده برای تعیین جریان حجمی استفاده می‌کنند. این نوع از جریان‌سنج‌ها در برابر عوامل محیطی مانند خوردگی و فشارهای شدید مقاوم هستند و نیازی به تماس مستقیم با گاز ندارند (Drenthen et al., 2010).

اساس عملکرد جریان‌سنج‌های اختلاف فشاری، بر مبنای سنجش و اندازه‌گیری فشار بین دو نقطه در طول یک مجراست. اختلاف فشار به‌سرعت جریان و در نتیجه به میزان گاز عبوری مرتبط است. جریان‌سنج اختلاف فشاری دارای مزایای ساختار ساده، عدم تأثیرپذیری از دما، نصب و نگهداری آسان است (Lei Li et al., 2024). این روش به‌طور گسترده‌ای در صنایع برای اندازه‌گیری جریان گازها از جمله متان استفاده می‌شود.

تمامی انواع جریان‌سنج‌ها با دقت بالا و ارائه داده‌های بلادرنگ از طیف‌های انتشار بسیار کم تا زیاد، به بهبود مدیریت و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کنند؛ با این حال، نگهداری، کالیبراسیون و نیاز به نصب و نگهداری تخصصی، از جمله معایب استفاده از این ابزارها محسوب می‌شود.

۳-۲- اندازه‌گیری غیرمستقیم و برآوردهای تجربی

این روش‌ها معمولاً بر اساس روابط تجربی، داده‌های میدانی یا اطلاعات ثانویه‌ای که با استفاده از مدل‌های ریاضی پردازش شده‌اند، انجام می‌شود. در این رویکرد که شامل مدل‌های انتشار بر اساس داده‌های فعالیت و فاکتورهای انتشار می‌باشد، از داده‌های به‌دست آمده از فعالیت‌های انسانی یا طبیعی استفاده می‌شود تا میزان انتشار گاز متان به‌صورت تخمینی محاسبه گردد.

۳-۲-۱- مدل‌های انتشار بر اساس داده‌های فعالیت

امروزه، اندازه‌گیری مستقیم انتشار متان به‌طور معمول با استفاده از تحلیل‌گرهای گاز میدانی با دقت بالا انجام می‌شود. با این حال، در شرایطی که انتشار متان توجه بسیاری را به خود جلب کرده است، جمع‌آوری داده‌ها در مورد انتشار متان به‌ویژه در مکان‌های دور با چالش‌هایی همچون محدودیت اندازه‌گیری رو به روست. لذا در مکان‌هایی که برداشت مستقیم داده‌ها دارای محدودیت است، مدل‌های ریاضی یک رویکرد قابل اعتماد برای برآورد و سنجش داده‌ها در مقیاس‌های منطقه‌ای یا جهانی ارائه می‌دهند.

(Glagolev et al., 2023). مدل‌های انتشار بر اساس داده‌های فعالیت شامل استفاده از مدل‌هایی می‌شود که میزان انتشار را بر اساس میزان فعالیت منبع مانند تعداد دام یا حجم تولید نفت و گاز برآورد می‌کنند. این مدل‌ها از جمله ابزارهای مهمی هستند که برای تخمین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه متان، استفاده می‌شوند. مدل‌های انتشار بر اساس داده‌های مرتبط به فعالیت‌های انسانی و طبیعی، تخمین می‌زنند که چه مقدار گاز به اتمسفر منتشر می‌شود و با رویکردهای گوناگون در مطالعات زیست محیطی، مدیریت منابع و تدوین سیاست‌های کاهش انتشار دارای نقش بسیار کاربردی هستند. عدم دقت در تعیین میزان دقیق فعالیت‌های انسانی، مانند تعداد دام یا حجم تولید نفت و گاز، می‌تواند منجر به پیش‌بینی‌های نادرست و غیرواقعی در مدل‌های انتشار شده و در نتیجه نتایج غلط در ارزیابی میزان انتشار گازها و تدوین سیاست‌های کاهش انتشار گردد (Jonas et al., 2019). مدل‌های انتشار بر اساس داده‌های فعالیت به دو دسته اصلی مدل‌های تجربی و مدل‌های مبتنی بر فیزیک تقسیم می‌شوند (Glagolev et al., 2023). با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه مدل‌سازی انتشار گاز گلخانه‌ای متان، این مدل‌ها در چهار گروه شامل تجربی، دینامیکی، تعادلی و تحلیلی طبقه‌بندی می‌شوند (جدول ۱) که انتخاب بین این مدل‌ها اغلب به اهداف تحقیق بستگی دارد.

۳-۱-۲-۱-۱ مدل‌های تجربی

مدل‌های تجربی ابزارهایی هستند که برای برآورد و تحلیل میزان انتشار گاز گلخانه‌ای متان بر اساس داده‌های واقعی و اندازه‌گیری‌های میدانی توسعه یافته‌اند. این مدل‌ها به‌ویژه در مواقعی که داده‌های علمی و نظری کافی وجود ندارد یا دسترسی به داده‌های دقیق دشوار است، کاربرد دارند. مدل‌های تجربی به شناسایی الگوها و روابط در داده‌های جمع‌آوری شده می‌پردازند و نتایج قابل اعتمادی ارائه می‌دهند. یک مدل تجربی با در نظر گرفتن ماهیت احتمالی متغیرها، به دنبال ایجاد پیوند ریاضی بین انتشار گازهای گلخانه‌ای و متغیرهای کنترل کننده است (Yan et al., 2005). آنها معمولاً با استفاده از مقادیر زیادی از داده‌های مشاهده شده یکپارچه، از روش‌های تحلیل رگرسیون برای ایجاد رابطه ریاضی بین متغیرهای محیطی و انتشار گاز متان استفاده می‌کنند (Sun et al., 2020).

مدل‌های تجربی به دلیل سادگی، کاربردی بودن، استفاده از داده‌های میدانی و همچنین دقت بالای آن در شرایط واقعی، معمولاً نتایج نزدیک به واقعیت ارائه می‌دهند. این مدل‌ها می‌توانند از داده‌های تاریخی موجود برای تخمین‌های جدید استفاده کنند. از سویی دیگر، نتایج این مدل‌ها به دلیل حساسیت به کیفیت داده‌ها، عدم توانایی در شبیه‌سازی شرایط جدید دارای محدودیت در تعمیم‌پذیری می‌باشند که ممکن است فقط برای شرایط خاصی معتبر باشند و نتوانند سناریوهای جدید یا تغییرات غیرمنتظره را به خوبی شبیه‌سازی کنند. مدل EMEP نمونه‌ای از مدل‌های تجربی شبیه‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای است. این مدل تجربی به وسیله اندازه‌گیری‌های مستقیم در سطح زمین، اطلاعات دقیقی از میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای از منابع مختلف مانند کشاورزی، دفن زباله‌ها، و سیستم‌های صنعتی ارائه می‌دهد (Van Caspel et al., 2024).

جدول ۱- انواع مدل‌های انتشار گازهای گلخانه‌ای

Table 1. Types of Greenhouse Gas Emission Models

ویژگی‌ها Features	شیوه عمل Method of operation	نام مدل Model name
توسعه بر اساس داده‌های واقعی و اندازه‌گیری‌های میدانی؛ کاربرد اساسی در مواقعی که داده‌های علمی و نظری کافی وجود ندارد یا دسترسی به داده‌های دقیق دشوار است؛ ارائه نتایج نزدیک به واقعیت به دلیل سادگی، کاربردی بودن؛ دقت بالا در شرایط واقعی؛ استفاده از داده‌های تاریخی موجود برای تخمین‌های جدید.	با در نظر گرفتن ماهیت احتمالی متغیرها، به دنبال ایجاد پیوند ریاضی بین انتشار گازهای گلخانه‌ای و متغیرهای کنترل کننده در محیط انتشار هستند.	مدل‌های تجربی Experimental models

مدل‌های تعادلی Equilibrium models	تعادل بین ورودی‌ها و خروجی‌های گاز متان در یک سیستم خاص را بررسی می‌کنند.	شبیه‌سازی متغیرهای مختلف از جمله تغییرات در فعالیت‌های انسانی، سیاست‌های زیست‌محیطی و شرایط آب و هوایی.
مدل‌های دینامیکی Dynamic models	متکی بر الگوریتمی است که سری‌های زمانی مشاهده شده را در فضای حالت چند بعدی نمایش می‌دهد.	شبیه‌سازی تغییرات زمانی انتشار متان؛ کمک به پیش‌بینی سناریوهای آینده با تحلیل سری زمانی.
مدل‌های تحلیلی Analytical models	با ایجاد روابط میان متغیرهای مختلف بر اساس اصول فیزیکی و با استفاده از معادلات عددی و ریاضی به شناسایی فرآیندهای تولید متان می‌پردازد.	ارائه یک راهبرد شبیه‌سازی شده سریع برخلاف مدل‌سازی تجربی و عددی؛ وابستگی صحت نتایج به کیفیت و دقت داده‌های ورودی؛ نیاز به مقایسه با داده‌های تجربی جهت تأیید اعتبار.

۲-۱-۲-۳- مدل‌های تعادلی

مدل‌های تعادلی به بررسی تعادل بین ورودی‌ها و خروجی‌های گاز متان در یک سیستم خاص می‌پردازند. این مدل‌ها به تحلیل فرآیندهای تولید، انتقال و انتشار گاز متان کمک می‌کنند و می‌توانند تأثیرات مختلفی از جمله تغییرات در فعالیت‌های انسانی، سیاست‌های زیست‌محیطی و شرایط آب و هوایی را شبیه‌سازی کنند. مدل تعادلی فرض می‌کند که تمام واکنش‌ها در تعادل ترمودینامیکی هستند، به طوریکه تغییر در ذخایر گاز متان در یک سیستم به‌طور مستقیم به تفاوت بین ورودی‌ها و خروجی‌های گاز مربوط می‌شود (Zainal et al., 2001). مدل GEM یک مدل شبیه‌سازی شده مبتنی بر تعادل بین منابع و برداشت‌ها برای ارزیابی انتشار گازهای گلخانه‌ای است. هدف اصلی این مدل تخمین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در مقیاس‌های مختلف بر اساس داده‌های ورودی و شرایط موجود محیطی می‌باشد (Biglari et al., 2017).

۳-۱-۲-۳- مدل‌های دینامیکی

مدل‌های دینامیکی ابزارهای تحلیلی هستند که تغییرات زمانی در انتشار گاز متان را شبیه‌سازی و تحلیل می‌کنند. این مدل‌ها قادرند تأثیرات متغیرهای مختلف را بر انتشار متان بررسی کنند. فرض در این مدل بر الگوریتمی متکی است که سری‌های زمانی مشاهده شده را در فضای حالت چند بعدی نمایش می‌دهد (Hill et al., 2024). مدل‌های دینامیکی این امکان را برای محققان فراهم می‌کنند تا تغییرات سری زمانی را در انتشار متان شبیه‌سازی کرده و با درک تأثیرات مختلف بر روی این گاز گلخانه‌ای تحلیل بهتری از روندهای زمانی و پیش‌بینی سناریوهای آینده ارائه کنند. یک نمونه مدل دینامیکی برای شبیه‌سازی انتشار گاز متان، مدل FLEXPART است. این مدل دینامیکی برای شبیه‌سازی حرکت ذرات هوا و انتشار گازهای گلخانه‌ای از جمله متان در جو استفاده می‌شود و به پیش‌بینی مسیرهای آن در مناطق مختلف کمک می‌کند (Groot Zwaafink et al., 2018).

۴-۱-۲-۳- مدل‌های تحلیلی

مدل‌های تحلیلی بر اساس اصول فیزیکی و با استفاده از معادلات عددی و ریاضی برای تحلیل و تخمین میزان انتشار گاز متان طراحی شده‌اند و برای ارائه راه‌حل‌های تحلیلی پیچیده خود اغلب به روش‌های ساده سازی متکی هستند (Glagolev et al., 2023). هدف اصلی در این مدل‌ها، ایجاد روابط میان متغیرهای مختلف مانند دما، رطوبت، نوع و سرعت ماده تجزیه‌شده به‌منظور شناسایی فرآیندهای تولید متان، از جمله تجزیه بی‌هوازی مواد آلی، فعالیت‌های کشاورزی، و فرآیندهای صنعتی است. برخلاف روش‌های مدل‌سازی تجربی و عددی، مدل‌های تحلیلی یا نیمه‌تحلیلی راهکاری شبیه‌سازی شده و سریع برای دستیابی به درکی دقیق از ارزیابی هیدرات‌های گازی، از جمله متان، ارائه می‌دهند (Xiao et al., 2019). توسعه و اجرای مدل‌های تحلیلی نیاز به دانش تخصصی داشته و صحت نتایج به کیفیت و دقت داده‌های ورودی بستگی دارد. این مدل‌ها معمولاً نیاز به مقایسه با داده‌های تجربی دارند تا اعتبار آن‌ها تأیید شود (Xu et al., 2013). مدل SAB مدلی تحلیلی برای شبیه‌سازی انتشار گاز متان است. این مدل به‌طور ساده‌شده به تحلیل فرآیندهای تولید و انتشار گاز متان در اکوسیستم‌ها و محیط‌های مختلف می‌پردازد. مدل SAB با

استفاده از اصول فیزیکی و ریاضی، به تحلیل جریان‌های متان و تعادل آن در سیستم‌های طبیعی یا انسانی می‌پردازد. این مدل معمولاً برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای به کار می‌رود و می‌تواند به تحلیل سریع و مؤثر در شرایط خاص کمک کند (Heimann et al., 2020).

۳-۲-۲- فاکتورهای انتشار

فاکتورهای انتشار نمایانگر ضرایب ثابتی هستند که نشان‌دهنده میزان گاز متانی است که به‌ازای هر واحد فعالیت خاصی مانند منابع تولید انرژی، مصرف سوخت، دامداری، یا دفن زباله منتشر می‌شود. برای محاسبه کل انتشار متان از یک منبع خاص، فاکتور انتشار در داده میزان فعالیت آن منبع ضرب می‌شود (Zhao et al., 2011). داده‌های فعالیت بیانگر حجم فعالیت مرتبط با انتشار متان مانند تعداد دام، حجم سوخت مصرفی و یا میزان زباله است و فاکتور انتشار نشان می‌دهد که چه میزان متان به‌ازای هر واحد فعالیت منتشر می‌شود.

علی‌رغم استفاده گسترده از فاکتورهای انتشار گازهای گلخانه‌ای، عدم قطعیت‌های زیادی در این تخمین‌ها وجود دارد. این امر ممکن است ناشی از تعمیم نتایج میدانی محدود به سطح کل کشور توسط دانشمندان تجربی، نادیده گرفتن تفاوت‌های منطقه‌ای، به‌کارگیری عامل انتشار یکنواخت برای تمامی کشورها و تعمیم بیش از حد نتایج برخی پروژه‌های بین‌المللی باشد (Yan et al., 2023). مطالعات اخیر نشان می‌دهد که استفاده از فاکتورهای انتشار واحد ممکن است برای توصیف انتشار فرآیندهای پیچیده گاز متان ناکافی باشد، زیرا بسیاری از آنها در سطح جهانی یکنواخت هستند و تنوع منطقه‌ای در شیوه‌های صنعتی، کشاورزی و یا دیگر متغیرها را در نظر نمی‌گیرند. یک راه حل برای فاکتورهای انتشار منحصربه‌فرد، استفاده از فاکتورهای انتشار منطقه‌ای است که با اندازه‌گیری‌های از بالا به پایین گازهای گلخانه‌ای و یا به صورت تجربی تولید می‌شوند که تفاوت‌های محیطی و نظارتی را منعکس می‌کنند (Riddick et al., 2022).

۳-۳- حسگرهای زمینی

یک راه حل کاربردی برای کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای متان، تشخیص سریع و جلوگیری یا کاهش نشت آن در منابع انتشار طبیعی و انسانی است. از همین روی استفاده از حسگرهای زمینی تشخیص گاز متان که قابل اعتماد و مقرون به صرفه هستند، نیاز به توسعه دارند. حسگرهای زمینی به‌طور ثابت در نقاط مختلف نصب می‌شوند تا تغییرات غلظت گاز متان را در نزدیکی منابع بررسی کرده و به کارشناسان اجازه می‌دهند تا نشت‌ها را به‌موقع شناسایی و برطرف کنند. این حسگرها کاربرد وسیعی در محیط‌های شهری، طبیعی و صنعتی دارند که سبب کمک به بهبود وضعیت نظارتی محیط‌زیست می‌گردند. از مهم‌ترین اهداف استفاده از این حسگرها اندازه‌گیری گازهای گلخانه‌ای انسانی در جو و نشت گاز متان است (Kwaśny et al., 2023).

امروزه انواع حسگرهای متان، که هر کدام فناوری متفاوتی را پیاده‌سازی می‌کنند، توسعه یافته‌اند. حسگرها بسته به نوع ماده و فناوری ساخته شده به انواع مختلفی طبقه بندی می‌شوند که حسگرهای نوری، حسگرهای کالریمتری، حسگرهای پیرو الکتریک، حسگرهای اکسید فلزی نیمه هادی و حسگرهای الکتروشیمیایی، از بقیه رایج‌تر هستند (Aldhafeeri et al., 2020). علاوه بر این، حسگرهای دیگری همچون حسگرهای طیف‌سنجی جرمی و حسگرهای صوتی نیز وجود دارند که به سنجش گاز متان در محیط انتشار می‌پردازند. انتخاب صحیح نوع حسگر بستگی به شرایط محیطی، نیازهای دقیق پروژه و تحلیل مزایا و معایب هر نوع حسگر دارد. برای استفاده مؤثر از این حسگرها، باید تمامی این عوامل مورد توجه قرار گیرند.

۳-۳-۱- حسگرهای نوری

حسگرهای گاز نوری تغییرات در نور مرئی یا امواج الکترومغناطیسی را طی مکانیسم‌های انتشار، پراکندگی یا جذب تشخیص می‌دهند (Jaanis et al., 2013). تکنیک‌های نوری مختلفی برای تشخیص متان ارائه شده که از جمله آنها می‌توان به فناوری مادون

قرمز غیر پراکنده، طیف‌سنجی دیود قابل تنظیم مستقیم، طیف‌سنجی حلقه به پایین حفره، طیف‌سنجی جذبی افزایش یافته حفره، تکنیک‌های لیدار و طیف‌سنجی فوتوآکوستیک لیزری اشاره کرد (Kwaśny et al., 2023).
بالتای، طیف‌سنجی جذبی مادون قرمز رایج‌ترین تکنیک مورد استفاده برای حسگرهای نوری گاز متان به‌شمار می‌آیند (Aldhafeeri et al., 2020). زیرا پیوندهای شیمیایی متان دارای باند جذب در طول موج خاصی هستند که امکان شناسایی گاز توسط حسگرهای مادون قرمز را فراهم می‌کند. گاز گلخانه‌ای متان دارای دو باند جذب گسترده و قوی در محدوده طیفی مادون قرمز میانی با مرکزیت $2/3$ میکرومتر و $7/7$ میکرومتر و همچنین یک باند جذب ضعیف در محدوده $1/65$ میکرومتر می‌باشد که در آن شدت جذب حدود 100 برابر کمتر از باند جذب اصلی است (Sherstov et al., 2020). علاوه بر حسگرهای مادون قرمز، بسیاری از محققان که با استفاده از تکنیک لیدار به سنجش گاز متان در محیط‌های صنعتی و طبیعی پرداختند به نتایج ارزنده‌ای دست یافتند.

۳-۱-۳-۱- حسگرهای مادون قرمز غیر پراکنده

حسگرهای مادون قرمز غیرپراکنده بر اساس اصل جذب نوری کار می‌کنند. این حسگرها از یک منبع نور مادون قرمز و یک آشکارساز استفاده می‌کنند. نور مادون قرمز از گاز نمونه عبور می‌کند و مولکول‌های متان نور را در طول موج خاصی جذب می‌کنند. میزان جذب نور با غلظت متان متناسب است و توسط آشکارساز اندازه‌گیری می‌شود. عملکرد این حسگر به حجم، طول نوری و گذردهی محفظه گاز بستگی دارد (Jing et al., 2021).
نیاز کمتر به کالیبراسیون مداوم به سبب پایداری طولانی‌مدت از مزایای کلیدی حسگرهای زمینی مادون قرمز غیر پراکنده به‌شمار می‌آیند. اما مهم‌ترین محدودیت حسگرهای گاز مادون قرمز غیر پراکنده تداخل طیفی بالای آن و کاهش دقت این حسگرها در حضور گازهای دیگر است. تلاش‌هایی برای بهبود این محدودیت‌ها انجام شده است. تداخل گازی تا حدی با استفاده از فیلترهای نوری و عوامل تصحیح تداخل حل شده است. این بهبودها محدود به چند گاز، به‌ویژه متان و دی‌اکسید کربن است. معایب مربوط به تداخل بخار آب همچنان باقی است و باید برطرف شود (Dinh et al., 2016).

۳-۱-۳-۲- حسگرهای طیف‌سنجی جذب لیزری

طیف‌سنجی جذب لیزری یک روش پیشرفته و حساس برای تشخیص و اندازه‌گیری غلظت گاز گلخانه‌ای متان است. این روش مبتنی بر اصول جذب نور توسط مولکول‌های گاز در طول موج‌های خاص است که کاربرد آن بایش دقیق و لحظه‌ای غلظت متان در محل‌های مشخص است.
طیف‌سنجی جذب لیزری از چند مرحله تشکیل می‌شود که اجزای کلیدی آن شامل منبع نور، مسیر نوری، آشکارساز و تحلیل داده می‌باشد. در عملکرد طیف‌سنجی جذب لیزری از یک منبع لیزری با طول موج تنظیم‌پذیر استفاده می‌شود که قادر است نور را در طیف باریکی از طول موج‌ها ساطع کند. هنگامی که نور لیزر از میان نمونه گازی عبور می‌کند، مولکول‌های متان بخشی از این نور را در طول موج‌های خاص جذب می‌کنند. میزان جذب نور بستگی به غلظت متان در نمونه دارد. این فرآیند بر اساس قانون بیر-لامبرت توصیف می‌شود که بیان می‌کند جذب نور توسط گاز متناسب با غلظت گاز و طول مسیر نوری است (Sang et al., 2019).

طراحی مسیر نوری می‌تواند بهینه‌سازی شود تا حساسیت تشخیص افزایش یابد. این کار با استفاده از سلول‌های چندگانه مانند سلول‌های White, Herriott و Chermine انجام می‌شود که طول مسیر نوری را افزایش می‌دهند و در نتیجه حساسیت تشخیص را بهبود می‌بخشند (Gao et al., 2013). سپس نور با از عبور از نمونه گاز به آشکارساز می‌رسد که تغییرات شدت نور را اندازه‌گیری می‌کند. در نهایت با استفاده از تحلیل تغییرات شدت نور و اعمال مدل‌های ریاضی، غلظت گاز متان در نمونه محاسبه و تحلیل داده‌ها انجام می‌شود.

طیف‌سنجی جذب لیزری قادر به تشخیص غلظت‌های بسیار کم متان با دقت بالا است. حساسیت این روش به دلیل استفاده از لیزرهای تنظیم‌پذیر با طول موج باریک است (Weng et al., 2024). اندازه‌گیری‌های سریع و آنی در زمان واقعی، همراه با عدم نیاز به تماس مستقیم با نمونه، از ویژگی‌های برجسته این روش به‌شمار می‌روند که آن را برای پایش‌های محیطی و صنعتی بسیار حائز اهمیت می‌سازد. علاوه بر این، در صنایع نفت و گاز، این تکنیک به‌منظور تشخیص و کنترل انتشار متان در مراحل مختلف فرآیندهای تولید، انتقال و توزیع گاز به کار می‌رود (Buckley et al., 2022).

روش طیف‌سنجی جذب لیزری شامل تکنیک‌های مختلفی است که از جمله آن‌ها می‌توان به طیف‌سنجی جذب لیزر دیودی قابل تنظیم و طیف‌سنجی جذب لیزر حفره‌ای اشاره کرد. در روش طیف‌سنجی جذب لیزر دیودی قابل تنظیم، از لیزر دیودی باریک بانندی استفاده می‌شود که طول موج آن به‌طور دقیق قابل تنظیم است. این لیزر به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که روی خطوط جذب خاص متان قرار گیرد و غلظت این گاز را با دقت بالا اندازه‌گیری کند. از مزایای این روش می‌توان به دقت بسیار بالا، حساسیت زیاد، توانایی اندازه‌گیری غلظت‌های پایین متان، هزینه کم و امکان سنجش در زمان واقعی اشاره کرد (Weng et al., 2024; Lin et al., 2022). روش طیف‌سنجی جذب لیزری به‌طور ذاتی قابلیت تفکیک طیفی متان از بخار آب را دارد، اما در برخی شرایط، هم‌پوشانی طیفی این دو گاز می‌تواند منجر به خطاهای اندازه‌گیری شود. برای افزایش دقت سنجش، از رویکردهایی همچون انتخاب بهینه طول‌موج‌های جذبی، به‌کارگیری الگوریتم‌های تصحیح طیفی پیشرفته و اندازه‌گیری هم‌زمان غلظت بخار آب جهت جبران‌سازی اثرات مزاحم استفاده می‌شود. بنابراین، در صورت تنظیم و کالیبراسیون دقیق سامانه طیف‌سنجی، می‌توان اثرات تداخلی ناشی از بخار آب را به حداقل رساند و اندازه‌گیری دقیق، تکرارپذیر و قابل اطمینانی از غلظت متان ارائه داد (Lin et al., 2022).

در روش طیف‌سنجی جذب لیزر حفره‌ای، یک پالس نوری با طول موج مشخص از یک لیزر به درون یک حفره نوری با آینه‌های بازتاب‌دهنده فرستاده می‌شود. نور درون حفره چندین بار بازتاب می‌یابد و باعث می‌شود طول مسیر نوری افزایش یابد، که این امر حساسیت اندازه‌گیری را افزایش می‌دهد. میزان جذب نور توسط گاز متان در هر بار عبور از مسیر نوری ثبت می‌شود و از طریق محاسبه کاهش شدت نور، غلظت متان اندازه‌گیری می‌شود. از مزایای این روش می‌توان به افزایش طول مسیر و در نتیجه افزایش حساسیت اندازه‌گیری اشاره کرد (Buckley et al., 2022).

۳-۳-۲- حسگرهای الکتروشیمیایی

حسگرهای الکتروشیمیایی از واکنش‌های الکتروشیمیایی برای تشخیص گاز متان استفاده می‌کنند. در این حسگرها، گاز متان به یک الکتروود واکنش‌پذیر وارد می‌شود که باعث تولید جریان الکتریکی متناسب با غلظت متان می‌شود. حسگرهای الکتروشیمیایی با تشخیص تغییرات در جریان الکتریکی که ناشی از واکنش شیمیایی بین گاز متان و الکتروودهای حسگر است، غلظت گاز را اندازه‌گیری می‌کنند. این حسگرها معمولاً دارای یک الکتروود کار، یک الکتروود مرجع و یک الکتروود کمکی هستند که در محلول الکترولیت غوطه‌ور شده‌اند (Aldhafeeri et al., 2020).

حسگرهای الکتروشیمیایی قادر به تشخیص غلظت‌های بسیار پایین و نشت‌های کوچک متان هستند. این حسگرها نسبت به سایر حسگرهای محیطی ارزان‌تر و به دلیل مصرف انرژی اندک، برای کاربردهای طولانی‌مدت و بدون نیاز به منبع انرژی بزرگ مناسب هستند (Dosi et al., 2019). اما با وجود مزایای بسیار، از چالش‌هایی نیز برخوردارند. این حسگرها نسبت به روش‌های نوری، دقت کمتری داشته و معمولاً عمر محدودی دارند. علاوه بر این به دلیل تجزیه مواد الکتروودها، این حسگرها نیاز به تعویض دوره‌ای دارند. تغییراتی همچون نشت و تبخیر مواد نیز می‌تواند بر دقت و عملکرد آنها تأثیر بگذارد و زمان پاسخ را کاهش دهد (Yang et al., 2020).

۳-۳-۳- حسگرهای نیمه‌هادی

یکی از روش‌های رایج برای پایش گاز گلخانه‌ای متان حسگرهای نیمه‌هادی هستند. عملکرد این حسگرها بر پایه تغییر مقاومت الکتریکی ماده نیمه‌هادی در حضور گاز متان است و به دلیل سادگی و هزینه پایین، کاربردهای گسترده‌ای در صنعت و محیط زیست دارند. حسگرهای نیمه‌هادی که برای پایش متان به کار می‌روند دارای انواع مختلفی می‌باشند. یک نوع از آنها حسگرهای اکسید فلزی هستند که از لایه‌های حساس به انواع مواد اکسیدی که مهم‌ترین آنها دی‌اکسید قلع و اکسید روی می‌باشند ساخته می‌شوند (Tereshkov et al., 2024). وقتی گاز متان به سطح حسگر می‌رسد، یک واکنش شیمیایی بین گاز و اکسیژن جذب شده بر روی سطح حسگر رخ می‌دهد که باعث تغییر در هدایت الکتریکی ماده نیمه‌هادی می‌شود. این تغییر در هدایت الکتریکی متناسب با غلظت گاز متان است و به این ترتیب می‌توان غلظت گاز را اندازه‌گیری کرد (Shankar et al., 2015). نوع دیگر حسگرهای نیمه‌هادی مبتنی بر نانو مواد می‌باشند. این حسگرها از نانو مواد نیمه‌هادی مانند نانوسیم‌ها و نانولوله‌های کربنی ساخته می‌شوند که دارای سطح ویژه بالا و خواص الکتریکی بهبود یافته هستند (Ahmad et al., 2024).

حسگرهای نیمه‌هادی به دلیل ساختار ساده و مواد ارزان، طول عمر بالا و قابلیت حمل آسان به‌صرفه هستند. از معایب حسگرهای نیمه‌هادی می‌توان به حساسیت آنها به شرایط محیطی و تغییرات دما و رطوبت اشاره کرد. این حسگرها نیاز به دمای بالایی برای عملکرد بهینه دارند که منجر به مصرف انرژی زیاد آنها می‌شود. به‌علاوه این حسگرها ممکن است به گازهای دیگری نیز حساسیت نشان دهند که منجر به تداخل در اندازه‌گیری می‌شود لذا به همین منظور برای حفظ دقت، نیاز به کالیبراسیون مداوم دارند (Aldhafeeri et al., 2020). استفاده از تقویت‌کننده‌ها در حسگرهای گاز نیمه‌هادی به افزایش حساسیت آنها نسبت به غلظت‌های پایین متان کمک می‌کند و شدت سیگنال را بهبود می‌بخشد. با این حال کالیبراسیون منظم برای حفظ دقت و قابلیت اعتماد سنجش‌ها ضروری است (Furst et al., 2021).

۳-۴-۳- حسگرهای کالری‌متر

حسگرهای کالری‌متر به‌عنوان یکی از روش‌های پیشرفته و مؤثر برای شناسایی گازهای قابل احتراق، از جمله متان، شناخته می‌شوند (Park et al., 2014; Sommer et al., 1993). این حسگرها برای تحلیل ترمودینامیک واکنش‌های شیمیایی یک نمونه، مقدار گرمای جذب یا تولید شده در طول واکنش را اندازه‌گیری می‌کنند (Khaw et al., 2016). حسگرهای کالری‌متر با بهره‌گیری از تغییرات حرارتی ناشی از واکنش‌های شیمیایی مرتبط با حضور گاز متان، قادر به اندازه‌گیری دقیق غلظت آن در محیط‌های مختلف می‌باشند.

مهم‌ترین بخش در حسگرهای کالری‌متر، ماده‌ای است که با گاز در تعامل است. این عنصر حساس معمولاً از مواد نیمه‌هادی یا فلزی مانند پلاتین، پالادیوم، رودیوم، ایریدیوم ساخته شده است که منجر به کاتالیز کردن اکسیداسیون گازهای قابل احتراق می‌گردد (Chen et al., 1989). وقتی گاز قابل احتراق وارد محیط حسگر می‌شود، در حضور اکسیژن بر روی سطح حسگری که توسط کاتالیزورها پوشش داده می‌شوند، گرمایی تولید می‌کنند که سبب تعیین کمیت غلظت گاز می‌گردد (Bassous et al., 2024). حساسیت بالا، دقت مطلوب، سرعت پاسخ‌دهی سریع، طراحی ساده و قابل اعتماد، و کارایی در محدوده دمایی وسیع، نقش مهمی در استفاده از حسگرهای کالری‌متری ایفا می‌کنند. با وجود مزایای قابل توجه این حسگرها، محدودیت‌هایی همچون مصرف انرژی بالا، نیاز به کالیبراسیون منظم و حساسیت به حضور سایر گازها وجود دارد که باید در انتخاب و پیاده‌سازی آنها مدنظر قرار گیرند (Park et al., 2014; Bassous et al., 2024; Aldhafeeri et al., 2020). با ادامه پیشرفت‌های تکنولوژیکی، انتظار می‌رود که این محدودیت‌ها کاهش یافته و کارایی حسگرهای کالری‌متری در آینده افزایش یابد، که این امر موجب ارتقا کیفیت پایش و بهبود مدیریت محیط زیست و ایمنی صنعتی خواهد شد.

۳-۴-۵- حسگرهای پیرو الکتریک

حسگرهای پیرو الکتریک نوعی حسگر هستند که به تغییرات دما در محیط پاسخ می‌دهند. این حسگرها از مواد پیرو الکتریک تشکیل شده‌اند، که به دلیل خاصیت طبیعی خود، در واکنش به تغییرات دما بار الکتریکی تولید می‌کنند (Gopinathan et al., 2003). این ویژگی به آن‌ها امکان می‌دهد تا به عنوان حسگرهای دما و همچنین برای تشخیص برخی گازها، مانند متان، مورد استفاده قرار گیرند (Dong et al., 2024).

مواد پیرو الکتریک که معمولاً از کریستال‌هایی مانند تیتانات باریوم یا تیتانات سرب استفاده می‌کنند، دارای قطبش داخلی هستند و وقتی دما تغییر می‌کند، این قطبش تغییر کرده و منجر به تولید بار الکتریکی می‌شود (Alawode et al., 2017). بار تولید شده به یک سیگنال الکتریکی تبدیل می‌شود که می‌تواند توسط مدارهای الکتریکی خوانده شود. این سیگنال می‌تواند به عنوان نشانه‌ای از وجود گاز یا تغییرات دما در محیط استفاده شود (Wu et al., 2023).

حسگرهای پیرو الکتریک، علی‌رغم محدودیت‌هایی همچون قیمت بالا و نیاز به کالیبراسیون، دارای مزایایی نظیر حساسیت بالا، عملکرد مناسب در محیط‌های بدون اکسیژن و قابلیت نصب آسان هستند. این ویژگی‌ها موجب می‌شود که این حسگرها به عنوان بخشی از سیستم‌های نظارتی برای کاهش اثرات منفی گازهای گلخانه‌ای و حفظ محیط زیست مورد استفاده قرار گیرند (Fu et al., 2023; Aldhafeeri et al., 2020).

۳-۶- حسگرهای طیف‌سنجی جرمی

طیف‌سنجی جرمی به عنوان یک روش قدرتمند و دقیق برای پایش زمینه‌ی گاز گلخانه‌ای متان، نقش مهمی در تحقیقات محیط زیستی و مدیریت گازهای گلخانه‌ای ایفا می‌کند. این روش یک تکنیک تحلیلی برای شناسایی و تعیین غلظت ترکیبات مختلف بر اساس نسبت جرم به بار یون‌های آنهاست و برای پایش گاز متان در محیط‌های مختلف مانند مناطق صنعتی، کشاورزی، و مناطق شهری به کار می‌رود (March et al., 1997).

در این روش، مولکول‌های متان ابتدا به وسیله منبع یونیزاسیون، یونیزه می‌شوند تا به یون‌های باردار تبدیل شوند (De Hoffmann et al., 2007). منابع یونیزاسیون مختلفی مانند ضربه الکتریکی یا یونیزاسیون شیمیایی برای این منظور به کار می‌روند (March et al., 1997). یون‌های تولید شده بر اساس نسبت جرم به بار در طیف‌سنج جرمی جدا می‌شوند. این جداسازی می‌تواند با استفاده از انواع مختلف طیف‌سنج‌های جرمی مانند چهار قطبی یا زمان پرواز انجام شود (Gross et al., 2006). در نهایت یون‌های جدا شده توسط یک آشکارساز شناسایی و اندازه‌گیری می‌شوند.

روش طیف‌سنجی جرمی، علی‌رغم پیچیدگی در تفسیر داده‌ها، نیاز به تخصص فنی بالا، هزینه‌های بالا در تهیه و بهره‌برداری، و نیاز به فضای قابل توجه به دلیل ابعاد دستگاه، همچنان به عنوان یکی از بهترین گزینه‌ها برای پایش دقیق گاز متان شناخته می‌شود (Thomas, 2019). زیرا این روش به دلیل توانایی تشخیص مقادیر بسیار کم گاز و دقت بالای آن در تعیین غلظت متان می‌تواند به کاهش خطاهای اندازه‌گیری کمک کند. اما مزیت اصلی این حسگرها این است که تعدادی از گازهای مختلف را می‌توانند به طور همزمان، پیوسته و مستقیم تحت نظارت قرار دهند (Lloyd et al., 1983).

مزایا Advantages	معایب Disadvantages	شیوه کارایی Efficiency method	نوع حسگر پایش گاز متان Methane gas monitoring sensor type
نیاز کمتر به کالیبراسیون مداوم به سبب پایداری طولانی مدت؛ سنجش در زمان واقعی.	تداخل طیفی بالای آن و کاهش دقت این حسگرها در حضور گازهای دیگر.	پایش مبتنی بر اصول جذب نور توسط مولکول‌های گاز در طول موج‌های خاص گاز	حسگرهای نوری Optical sensors

متان بر اساس قانون بیر-لامبرت.			
دقت کمتر نسبت به روش‌های نوری؛ عمر محدود به دلیل تجزیه مواد الکترودها؛ نیاز به تعویض دوره‌ای؛ کاهش زمان پاسخ، کاهش دقت و عملکرد به دلیل نشت و تبخیر احتمالی مواد.	واکنش‌های الکتروشیمیایی و تولید جریان الکتریکی متناسب با غلظت متان.	حسگرهای الکتروشیمیایی Electrochemical sensors	نسبت به سایر حسگرهای محیطی ارزان‌ترند؛ مصرف انرژی اندک؛ مناسب برای کاربردهای طولانی‌مدت و بدون نیاز به منبع انرژی بزرگ.
حساسیت آنها به شرایط محیطی، تغییرات دما و رطوبت؛ نیاز به دمای بالا برای عملکرد بهینه؛ مصرف انرژی زیاد؛ تداخل در اندازه‌گیری به دلیل حساسیت به گازهای دیگر؛ نیاز به کالیبراسیون مداوم برای حفظ دقت.	تغییر مقاومت الکتریکی ماده نیمه‌هادی در حضور گاز متان.	حسگرهای نیمه‌هادی Semiconductor sensors	طول عمر بالا؛ قابلیت حمل آسان؛ ساختار ساده و مواد ارزان؛ سبک و قوی.
دقت تشخیص پایین؛ مستعد به ترک خوردگی، خرابی کاتالیست و اشیاء بیش از حد؛ مصرف برق بالا؛ طول عمر کوتاه.	بهره‌گیری از تغییرات حرارتی ناشی از واکنش‌های شیمیایی با حضور گاز متان.	سنسورهای کالریمتری Calorimetric sensors	سرعت پاسخ‌دهی سریع؛ طراحی ساده و قابل اعتماد؛ کارایی در محدوده دمایی وسیع؛ قابل حمل؛ ساخت آسان؛ کارایی در شرایط سخت محیطی.
هزینه بالا؛ مصرف برق بالا؛ نیاز به کالیبراسیون مداوم.	واکنش به تغییرات دما و تولید بار الکتریکی در حضور گاز متان.	حسگرهای پیروالکتریک Pyroelectric sensors	عملکرد مناسب در محیط بدون آکسیژن؛ حساسیت خوب و پاسخ‌گویی مناسب؛ قابلیت نصب آسان.
پیچیدگی تفسیر داده‌ها؛ نیاز به تخصص فنی بالا؛ هزینه بالای تهیه و بهره‌برداری؛ نیاز به فضای قابل توجه به دلیل اندازه ابعاد.	شناسایی و تعیین غلظت ترکیبات گاز متان بر اساس نسبت جرم به بار یون‌های آن.	حسگرهای طیف‌سنجی جرمی Mass spectrometry sensors	توانایی تشخیص مقادیر بسیار کم گاز؛ دقت بالا در تعیین غلظت گاز؛ نظارت همزمان، پیوسته و مستقیم تعدادی از گازهای مختلف.

۲-۴- شبکه‌های نظارت هوشمند سنجش محلی

با افزایش نگرانی‌ها درباره تغییرات اقلیمی و تأثیرات مخرب گازهای گلخانه‌ای بر محیط زیست، نیاز به سیستم‌های پیشرفته برای پایش و مدیریت انتشار این گازها احساس می‌شود. این راهکارهای نوین و کارآمد از واحدهای محاسباتی قدرتمند، حسگرهای کوچک و ارزان قیمت و روش‌های اینترنت اشیا که طیف وسیعی از پیشرفت‌ها را نسبت به حسگر سیمی سنتی ارائه می‌کنند، متغیر هستند (Khan et al., 2019). اینترنت اشیا به سیستمی از دستگاه‌های مرتبط با هم اشاره دارد که جریان‌های داده‌های مختلف ثبت‌شده از محیط را جمع‌آوری، انتقال، ذخیره، پردازش یا تجزیه و تحلیل می‌کنند (Popa et al., 2023). شبکه‌های پایش و نظارت هوشمند شامل مجموعه‌ای از ایستگاه‌های هواشناسی، جمع‌آوری ذرات و حسگرهای جمع‌آوری اطلاعات بلادرنگ می‌باشند (Hinkka et al., 2021). این شبکه‌ها با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته ارتباطی، امکان مدیریت بهتر و تصمیم‌گیری هوشمندانه‌تر را فراهم می‌آورند.

حسگرهای مختلف در نقاط حساس نصب می‌شوند و اطلاعات مربوط به غلظت متان، دما، رطوبت و سایر پارامترهای محیطی را جمع‌آوری می‌کنند. این حسگرها می‌توانند از تکنولوژی‌های مختلفی مانند حسگرهای نوری، الکتروشیمیایی، ترموگرافی و مادون قرمز استفاده کنند. داده‌های جمع‌آوری‌شده توسط حسگرها از طریق شبکه‌های بی‌سیم به گیت‌وی‌ها منتقل می‌شوند. پس از آن،

با ارسال داده‌ها به سرورهای ابری و ذخیره‌سازی آن‌ها در پایگاه‌های داده، اطلاعات با استفاده از الگوریتم‌های تحلیل داده در زمان واقعی پردازش می‌شوند تا الگوها، روندها و ناهنجاری‌ها شناسایی گردند. در نهایت، نتایج تحلیل‌ها از طریق سیستم‌های پشتیبانی تصمیم به کاربران ارائه می‌شوند. این نتایج شامل داده‌های کمی جمع‌آوری شده، نمرات نشان‌دهنده سطح عملکرد شاخص‌های پایداری و نمایش نتایج در داشبوردهای گرافیکی هستند (Popa et al., 2023).

با وجود مزایای فراوان سیستم‌ها و شبکه‌های هوشمند، از جمله جمع‌آوری دقیق و زمان‌بندی شده داده‌ها و پردازش آن‌ها در فضای ابری، چالش‌هایی نظیر امنیت، حریم خصوصی، کیفیت خدمات و مدیریت حجم عظیم داده‌ها همچنان باید مورد توجه قرار گیرند. این مسائل نیازمند راهکارهای مؤثر برای حفظ یکپارچگی و کارایی سیستم‌ها هستند (Khan et al., 2019). با پیشرفت‌های مداوم در فناوری‌های اینترنت اشیا، هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، انتظار می‌رود که کارایی و قابلیت‌های این شبکه‌ها به‌طور قابل توجهی افزایش یابد و نقش آن‌ها در مقابله با تغییرات اقلیمی و بهبود فرآیندهای تصمیم‌گیری تقویت شود. این پیشرفت‌ها می‌توانند به بهینه‌سازی فرایندهای نظارتی و مدیریتی کمک کرده و اثربخشی آن‌ها را در زمینه‌های مختلف زیست‌محیطی و اجتماعی افزایش دهند.

۳-۵- مطالعات آزمایشگاهی و میدانی

۳-۵-۱- آزمایش‌های میدانی کنترل شده

یکی از روش‌های مهم و معتبر برای پایش و مطالعه انتشار گاز گلخانه‌ای متان انجام آزمایش‌های کنترل شده است. این آزمایش‌ها در محیط‌های واقعی انجام می‌شوند و امکان ارزیابی سیستماتیک پاسخ‌های اکوسیستم را فراهم می‌کنند (Doshi et al., 2025).

آزمایش‌های میدانی کنترل شده به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که شرایط محیطی به‌طور سیستماتیک دست‌کاری شده و متغیرهای مورد نظر کنترل شوند. هدف اصلی از انجام این آزمایش‌ها، بررسی اثرات عوامل مختلف بر انتشار گازهای گلخانه‌ای است. این آزمایش‌ها در محیط‌های طبیعی مانند مزارع، سایت‌های دفن زباله، تالاب‌ها و یا تأسیسات نفت و گاز انجام می‌شوند و به پژوهشگران این امکان را می‌دهند تا انتشار متان را در شرایط واقعی مطالعه و بهینه‌سازی کنند (Van der Gon et al., 1992; Reddy et al., 2021; Bhullar et al., 2014; Cahill et al., 2017).

در طراحی آزمایش‌های میدانی کنترل شده به‌طور همزمان تأثیر یک یا چند متغیر ورودی بر روی یک یا چند متغیر خروجی بررسی می‌شود (Heil et al., 2017). متغیرهای ورودی معمول شامل دما، رطوبت، شرایط خاک، میزان نور و شرایط سطح زمین هستند که تأثیر آن‌ها بر متغیر خروجی یعنی انتشار متان ارزیابی می‌گردد. برای هر آزمایش، نمونه‌های کنترل شده و نمونه‌های مقایسه‌ای در نظر گرفته می‌شوند. در آزمایش‌های میدانی، ابزارهای اندازه‌گیری انتشار متان شامل دستگاه‌های کروماتوگرافی گازی، طیف‌سنج‌های مادون قرمز و انواع حسگرهای گازی می‌باشند. این تجهیزات می‌توانند تغییرات در غلظت متان را به‌دقت ثبت کرده و داده‌های مرتبط با شرایط محیطی را ذخیره کنند.

داده‌های جمع‌آوری شده با استفاده از روش‌های آماری و مدل‌سازی تجزیه و تحلیل می‌شوند تا رابطه بین متغیرهای کنترل شده و انتشار متان مشخص شود. این تحلیل‌ها می‌توانند به تعیین منبع و میزان دقیق انتشار و همچنین شناسایی الگوهای زمانی و مکانی متان کمک کنند و نتایج را برای بهبود سیاست‌ها و مدیریت منابع ارائه دهند.

از مزایای آزمایش‌های میدانی کنترل شده می‌توان به‌دقت بالا، ارزیابی شرایط واقعی، امکان آزمایش چندین متغیر و کمک به بهبود پیش‌بینی‌های بلندمدت با مدل‌های مبتنی بر فرآیند انتشار اشاره کرد. با این وجود پیچیدگی تحلیل داده‌ها، هزینه بالا، محدودیت‌ها و تغییرات ناخواسته محیطی این آزمایش‌ها را با چالش‌هایی روبه‌رو کرده است (Dijkstra et al., 2012). پیشرفت‌های تکنولوژیکی و استفاده از فناوری‌های نوین، آینده روشن‌تری را برای کاربردهای گسترده‌تر این روش فراهم خواهد کرد.

۳-۵-۲- مدل‌های فرایندی

مدل، سیستمی است که ویژگی‌های اصلی و اساسی یک سیستم دیگر را بازتولید کرده و به صورت ساده شده یا شبیه‌سازی شده نمایان می‌کند (Warfvinge., 1995). مدل‌های فرایندی، مدل‌های ریاضی هستند که از روش‌های ریاضی برای ساخت مدل‌های مناسب به منظور شبیه‌سازی و تحلیل سیستم‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی استفاده می‌کنند (Yang., 2016). این مدل‌ها می‌توانند به شبیه‌سازی شرایط مختلف اکوسیستم‌ها، مانند تالاب‌ها، مزارع و مکان‌های صنعتی بپردازند و اثرات تغییرات محیطی، مدیریتی و اقلیمی را بر انتشار متان ارزیابی کنند.

مدل‌های فرایندی برای شبیه‌سازی دقیق انتشار متان نیاز به داده‌های ورودی مختلفی دارند. این ورودی‌ها شامل پارامترهای محیطی (مانند دما، رطوبت، نوع خاک، پوشش گیاهی)، داده‌های زیستی (مانند فعالیت میکروارگانیسم‌ها)، و شرایط اولیه (مانند غلظت متان در خاک یا هوا) هستند. خروجی‌های مدل‌های فرایندی نتایج شبیه‌سازی شده به شمار می‌آید که شامل مقادیر پیش بینی شده انتشار متان در زمان‌ها و مکان‌های مختلف است. این خروجی‌ها می‌توانند به صورت مقادیر تجمعی انتشار متان یا توزیع زمانی و مکانی آن ارائه شوند. کارایی و ظرفیت پیش‌بینی بالای مدل به کیفیت داده‌های ورودی وابسته است (Fumoto., 2017).

در صورتی که داده‌های ورودی کافی یا دقیق نباشند، مدل‌ها ممکن است نتایج قابل اعتمادی ارائه ندهند. مدل‌های مبتنی بر فرآیند معمولاً با نتایج آزمایش‌های مدل‌های آماری یا تجربی در مقیاس کوچک ارزیابی می‌شوند (Veltman et al., 2017).

مدل DNDC یک مدل شبیه‌سازی چرخه‌های کربن و نیتروژن در خاک و مبتنی بر فرآیند می‌باشد که در جهت ردیابی انتشار گازهای گلخانه‌ای (مانند متان، کربن‌دی‌اکسید و اکسید نیتروژن) برای طیف گسترده‌ای از شیوه‌های مدیریت توسعه یافته است (Uzoma et al., 2015). این مدل اولین بار در دهه ۱۹۹۰ میلادی برای شبیه‌سازی اثرات تغییرات مدیریتی و محیطی بر چرخه های بیو ژئوشیمیایی و انتشار گازهای گلخانه‌ای از خاک‌های کشاورزی طراحی شد و اکنون به طور گسترده در مطالعات زیست محیطی، تغییرات اقلیمی و مدیریت منابع طبیعی مورد استفاده قرار گرفته است (Li et al., 1992).

مدل‌های فرایندی ابزاری مؤثر برای شبیه‌سازی و پایش انتشار متان در اکوسیستم‌های مختلف هستند. این مدل‌ها با استفاده از اصول علمی و معادلات ریاضی، می‌توانند با ارائه خروجی‌های زمانی و مکانی، پیش‌بینی‌ها دقیق و تحلیل سناریوها، فرآیندهای پیچیده‌ی اثرگذار بر چرخه متان را شبیه‌سازی کنند و به بهبود درک ما از این فرآیندها کمک کنند. با این حال، نیاز به داده‌های دقیق، کالیبراسیون مداوم، تجهیزات سخت افزاری پیشرفته، باعث ایجاد مشکل در عدم قطعیت پیش‌بینی‌های این مدل‌ها می‌شود (Wang., 2010).

۳-۶- روش‌های مبتنی بر نمونه‌برداری و تحلیل شیمیایی

روش‌های مبتنی بر نمونه‌برداری و تحلیل شیمیایی برای سنجش گاز گلخانه‌ای متان به چندین دسته تقسیم می‌شوند که هر یک از آنها، از تکنیک‌های مختلف برای جمع‌آوری نمونه گاز و تحلیل غلظت آن استفاده می‌کنند.

۳-۶-۱- روش‌های انبوه‌گیری

در این روش‌ها، گاز موجود در محیط توسط ابزارهای خاصی جمع‌آوری می‌شود. این ابزارها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که بتوانند بدون تغییر ترکیب، گاز را در حجم‌های بزرگ و برای مدت طولانی ذخیره کنند. پس از جمع‌آوری، نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شده و با استفاده از تکنیک‌های تحلیلی مانند کروماتوگرافی گازی یا اسپکتروسکوپی جرمی، مورد بررسی قرار می‌گیرند تا غلظت متان و سایر گازها اندازه‌گیری شود. هدف این روش‌ها، بررسی دقیق غلظت متان و سایر ترکیبات گازی موجود در نمونه است. روش‌های انبوه‌گیری معمولاً در پایش‌های محیطی، صنعتی و تحقیقاتی استفاده می‌شوند.

مهم‌ترین ابزارها و تجهیزات مورد استفاده در روش‌های انبوه‌گیری شامل کیسه‌های نمونه‌برداری، سیلندره‌ای نمونه‌برداری و پمپ‌های نمونه‌برداری می‌باشد (Phillips et al., 2013; Hartz et al., 1982; Johnson et al., 2016). روش‌های انبوه‌گیری یکی از روش‌های دقیق و جامع برای پایش گاز متان هستند که برای تحلیل‌های پیشرفته و بلند مدت مناسب‌اند. با این حال، نیاز به تجهیزات

تخصصی و فرآیند تحلیل طولانی‌تر، از محدودیت‌های این روش به‌شمار می‌روند. این روش به‌طور گسترده در پایش‌های زیست محیطی، صنعتی و تحقیقاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد و می‌تواند به درک بهتر از میزان و منابع انتشار متان کمک کند.

۳-۶-۲- کروماتوگرافی گازی

نمونه‌های گازی ای که مستقیماً از منبع یا محیط برداشت شده و به آزمایشگاه منتقل می‌شوند با کمک دستگاه‌هایی نظیر کروماتوگرافی گازی، تحت تحلیل‌های شیمیایی دقیق قرار می‌گیرند. کروماتوگرافی گازی، یک تکنیک تحلیلی قدرتمند است که برای جداسازی و شناسایی ترکیبات مختلف در مخلوط‌های گازی به کار می‌رود. از این روش به عنوان یک دستگاه تحلیلی، برای تجزیه و تحلیل و اندازه‌گیری گازهایی مانند متان، دی‌اکسید کربن و هیدروژن استفاده می‌شود (Boshagh et al., 2020).

کروماتوگرافی گازی به دلیل سادگی، حساسیت و کارایی بالای آن در جداسازی و تحلیل سریع اجزای مخلوط، به یکی از ابزارهای اصلی در تحلیل‌های شیمیایی تبدیل شده است (Al-Rubaye et al., 2017). این دستگاه به عنوان یک ابزار قدرتمند و دقیق برای پایش و تجزیه و تحلیل گاز گلخانه‌ای متان نقش به سزایی در مطالعات زیست‌محیطی و تلاش‌های جهانی در راستای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا می‌کند. استفاده از تکنیک‌های مختلف کروماتوگرافی گازی، بسته به نیاز و شرایط نمونه، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را درباره غلظت و رفتار گاز متان در محیط‌های مختلف فراهم کند.

اجزای اصلی کروماتوگرافی گازی شامل؛ تزریق‌کننده گاز نمونه، ستون کروماتوگرافی، گاز حامل تزریق شده با سرعت جریان ثابت، آشکارسازها و کلیه ابزارآلات الکترونیکی مرتبط با سیستم می‌باشد (Rengel., 2007). در این تکنیک پس از گردآوری گاز مورد نظر در شرایط محیطی، یک نمونه گاز حامل به داخل یک ستون کروماتوگرافی تزریق می‌شود. معمولاً تنها از سه گاز هیدروژن، نیتروژن و هلیوم به عنوان گاز حامل در این دستگاه‌ها استفاده می‌شود. به دلیل قیمت بالای هلیوم و خطر بالقوه هیدروژن، نیتروژن گاز حامل مناسب‌تری به‌شمار می‌آید (Zuo et al., 2013). ستون کروماتوگرافی حاوی یک فاز ساکن است که ترکیبات مختلف موجود در نمونه را بر اساس تفاوت‌های آن‌ها در برهم‌کنش با این فاز ساکن جدا می‌کند. زمانی که فاز متحرک ترکیبات موجود در مخلوط وارد ستون می‌شود، هر ترکیب بر اساس تعامل آن‌ها به فاز ثابت یا سرعت متفاوتی از ستون عبور می‌کند (Singh et al., 2021).

در کروماتوگرافی گازی انواع روش‌ها و تکنیک‌ها بر اساس نوع و شیوه آشکارسازی وجود دارد که برخی از آنها نظیر آشکارسازهای یونیزاسیون شعله، هدایت حرارتی، جذب الکترون، انتشار اتمی، طیف‌سنجی جرمی می‌باشند (Lecina., 2020). هر یک از این آشکارسازها ابزار قدرتمندی برای شناسایی و تحلیل ترکیبات شیمیایی هستند. انتخاب بین این تکنیک‌ها بستگی به نیازمندی‌های خاص تحلیل، دقت مورد نیاز و نوع اطلاعات ساختاری که باید به‌دست آید، دارد.

یکی از رایج‌ترین آشکارسازها در کروماتوگرافی گازی، آشکارساز یونیزاسیون شعله است. زیرا با دامنه دینامیکی زیادی که دارند به مجموعه وسیعی از هیدروکربن‌ها پاسخ می‌دهند و دارای عملکرد نسبتاً ساده و بسیار قابل اعتماد هستند (Hinshaw., 2006). این آشکارساز به‌ویژه برای هیدروکربن‌هایی مانند متان حساسیت بالایی دارد (Martyr et al., 2012). در آشکارساز یونیزاسیون شعله، ترکیبات جدا شده به یون‌های مثبت و منفی تبدیل می‌شوند. تحت تأثیر اختلاف پتانسیل‌های الکتریکی، حرکت این ذرات آغاز می‌شود که این به معنی ایجاد جریان الکتریکی است (Nefedev et al., 2020). جریان الکتریکی تولید شده توسط یک الکترومتر تقویت شده و سپس اندازه‌گیری می‌شود (Feng et al., 2020). این جریان الکتریکی به شناسایی و کمی‌سازی ترکیبات کمک می‌کند.

استفاده از روش کروماتوگرافی گازی به دلیل حساسیت بالا و توانایی جداسازی دقیق غلظت‌های کم متان در نمونه‌های هوا، مورد توجه پژوهشگران علوم محیطی قرار گرفته است (Morais et al., 2024; Al-Shalan et al., 2022). از مزایای استفاده از روش کروماتوگرافی گازی برای پایش زمینی گاز متان می‌توان به زمان نسبتاً کوتاه آنالیز، عملکرد جداسازی عالی برای اکثر ترکیبات، امکان انجام اندازه‌گیری‌های مکرر در فواصل زمانی منظم، توانایی تعیین دقیق غلظت‌های پایین گازهای هیدروکربنی و تنوع فراوان

در تنظیم شرایط جداسازی اشاره کرد (Vaskovskii et al., 2023; Thompson et al., 1985; Etre et al., 1961). از سویی دیگر استفاده از تکنیک‌های مختلف کروماتوگرافی گازی نیز دارای محدودیت‌هایی نظیر نیاز به گازهای کالیبراسیون برای آنالیز، هزینه بالای تجهیزات، دور بودن محل نمونه برداری از محل آنالیز به‌خصوص در مورد مطالعات آزمایشگاهی اشاره کرد که این روش را بیش از حد وقت‌گیر و پرهزینه می‌کند (Vaskovskii et al., 2023).

۴- نتیجه‌گیری

رویکرد پایین به بالا پایش گاز گلخانه‌ای متان، به اندازه‌گیری انتشار و غلظت متان در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای از منابع مشخصی مانند سایت‌های دفن زباله، دامداری‌ها، تالاب‌ها، معادن زغال‌سنگ یا تأسیسات نفت و گاز می‌پردازد. روش‌های مختلف این رویکرد، معمولاً عملیات پایش گاز متان را در سطح زمین یا نزدیک به منابع انتشار انجام می‌دهند. این رویکرد به‌عنوان مکملی برای رویکرد پایش بالا به پایین که انتشار گاز را در مقیاس‌های بزرگ‌تر و از ارتفاعات بالاتر بررسی می‌کنند، به کار می‌رود. با وجود مزایای فراوان این روش‌ها، چالش‌ها و محدودیت‌هایی نیز وجود دارد که باید به‌دقت مدنظر قرار گیرند. از مهم‌ترین این چالش‌ها می‌توان به محدودیت در پوشش مکانی، هزینه‌های بالای تجهیزات و نیاز به تخصص فنی برای اجرای دقیق این روش‌ها اشاره کرد. علاوه بر این، این روش‌ها معمولاً در مقیاس‌های محلی و محدود پیاده‌سازی می‌شوند، که ممکن است منجر به نادیده گرفتن منابع انتشار دورافتاده یا دشوار برای دسترسی شود. همچنین نیاز به کالیبراسیون مداوم در شرایط خاص، از دیگر مشکلات رایج این رویکردها به‌شمار می‌آید. بنابراین، هیچ‌کدام از این روش‌ها به‌تنهایی نمی‌توانند بهترین راه‌حل برای تمامی شرایط باشند و انتخاب روش مناسب باید بر اساس ویژگی‌ها و نیازهای خاص هر پروژه، اهداف تحقیقاتی و محدودیت‌های موجود انجام گیرد. برای بهبود دقت پایش پایین به بالای گاز متان، پیشنهاد می‌شود از حسگرهای پیشرفته‌تر و دقیق‌تر استفاده شود که قادر به ارائه داده‌های با کیفیت بالاتر بوده و نیاز به کالیبراسیون مداوم را به حداقل برسانند. همچنین، انجام تحقیقات بیشتر برای توسعه روش‌هایی که پوشش مکانی پایش را گسترش دهند و امکان دسترسی به مناطق دورافتاده و دشوار را فراهم کنند، اهمیت زیادی دارد. در این زمینه، ترکیب رویکردهای پایین به بالا و بالا به پایین می‌تواند به‌طور مؤثری کیفیت داده‌ها را ارتقا داده و هزینه‌ها را کاهش دهد. به‌طور کلی، بهره‌گیری از این استراتژی‌های ترکیبی می‌تواند به بهبود پایش گازهای گلخانه‌ای، کاهش انتشار آن‌ها، بهینه‌سازی مدیریت منابع طبیعی و تقویت سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی کمک کند.

منابع

- Ahmad, G., Nawaz, A., Nawaz, S., Shad, N. A., Sajid, M. M., & Javed, Y. (2020). Nanomaterial-based gas sensor for environmental science and technology. In S. S. Salih (Ed.), *Nanofabrication for smart nanosensor applications* (pp. 229–252). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820702-4.00010-6>
- Akpasi, S. O., Akpan, J. S., Amune, U. O., Olaseinde, A. A., & Kiambi, S. L. (2024). Methane advances: Trends and summary from selected studies. *Methane*, 3(2), 276–313. <https://doi.org/10.3390/methane3020016>
- Alawode, B. (2017). *Ab initio study of dynamically tunable catalysis for carbon dioxide reduction* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology). <https://hdl.handle.net/1721.1/113763>
- Aldhafeeri, T., Tran, M. K., Vrolyk, R., Pope, M., & Fowler, M. (2020). A review of methane gas detection sensors: Recent developments and future perspectives. *Inventions*, 5(3), 28. <https://doi.org/10.3390/inventions5030028>
- Allen, D. T. (2014). Methane emissions from natural gas production and use: Reconciling bottom-up and top-down measurements. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 5, 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2014.05.004>
- Al-Rubaye, A. F., Hameed, I. H., & Kadhim, M. J. (2017). A review: Uses of gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) technique for analysis of bioactive natural compounds of some plants. *International Journal of Toxicological and Pharmacological Research*, 9(1), 81–85. <https://doi.org/10.5958/0974-360X.2017.00732.6>

- Al-Shalan, A., Lowry, D., Fisher, R. E., Nisbet, E. G., Zazzeri, G., Al-Sarawi, M., & France, J. L. (2022). Methane emissions in Kuwait: Plume identification, isotopic characterisation and inventory verification. *Atmospheric Environment*, 268, 118763. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118763>
- Balcombe, P., Speirs, J. F., Brandon, N. P., & Hawkes, A. D. (2018). Methane emissions: Choosing the right climate metric and time horizon. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 20(10), 1323–1339. <https://doi.org/10.1039/C8EM00414F>
- Bassous, N. J., Rodriguez, A. C., Leal, C. I. L., Jung, H. Y., Lee, C. K., Joo, S.,... & Shin, S. R. (2024). Significance of various sensing mechanisms for detecting local and atmospheric greenhouse gases: A review. *Advanced Sensor Research*, 3(2), 2300094. <https://doi.org/10.1002/adrs.202300094>
- Bhullar, G. S., Edwards, P. J., & Olde Venterink, H. (2014). Influence of different plant species on methane emissions from soil in a restored Swiss wetland. *PLoS ONE*, 9(2), e89588. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089588>
- Biglari, H., Rahdar, S., Baneshi, M. M., Ahamadabadi, M., Saeidi, M., Narooie, M. R.,... & Khaksefidi, R. (2017). Estimating the amount of methane gas generated from the solid waste using the land GEM software, Sistan and Baluchistan. *Journal of Global Pharma Technology*, 9(3), 35–41. ISSN: 0975-8542
- Boshagh, F., & Rostami, K. (2020). A review of measurement methods of biological hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(46), 24424–24452. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.079>
- Buckley, S. (2022). Detecting methane emissions: How spectroscopy is contributing to sustainability efforts. <https://doi.org/10.56530/spectroscopy.zx3279o9>
- Cahill, A. G., Steelman, C. M., Forde, O., Kuloyo, O., Ruff, S. E., Mayer, B.,... & Parker, B. L. (2017). Mobility and persistence of methane in groundwater in a controlled-release field experiment. *Nature Geoscience*. <https://doi.org/10.1038/ngeo2919>
- Chen, A., Luo, R., Tan, T. C., & Liu, C. C. (1989). A thick-film calorimetric sensor for monitoring the concentration of combustible gases. *Sensors and Actuators*, 19(3), 237–248. [https://doi.org/10.1016/0250-6874\(89\)87076-3](https://doi.org/10.1016/0250-6874(89)87076-3)
- De Hoffmann, E., & Stroobant, V. (2007). *Mass spectrometry: Principles and applications* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Delqandi, M., Joorabloo, S., & Ganji Nowruzi, Z. (2023). Assessing the impacts of climate change on the intensity, duration, and magnitude of drought in the Semnan region using SPI and RDI indices. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 1(1), 1–18. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.5909.1004>
- de Matos, M. A. A., & da Silva Ferreira, V. (2010). Gas mass-flow meters: Principles and applications. *Flow Measurement and Instrumentation*, 21(2), 143–149. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2010.02.001>
- Dijkstra, F. A., Prior, S. A., Runion, G. B., Torbert, H. A., Tian, H., Lu, C., & Venterea, R. T. (2012). Effects of elevated carbon dioxide and increased temperature on methane and nitrous oxide fluxes: Evidence from field experiments. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10(10), 520–527. <https://doi.org/10.1890/120059>
- Dinh, T. V., Choi, I. Y., Son, Y. S., & Kim, J. C. (2016). A review on non-dispersive infrared gas sensors: Improvement of sensor detection limit and interference correction. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 231, 529–538. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.03.040>
- Dong, W., Sugai, Y., Wang, Y., Zhang, H., Zhang, X., & Sasaki, K. (2024). Experimental study on enhanced methane detection using an MEMS-pyroelectric sensor integrated with a wavelet algorithm. *ACS Omega*, 9(18), 19956–19967. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c09769>
- Doshi, M., Yamada, T., Quinn, S., Erol, G., Boucher, C., Kenison, M., & Pomerantz, A. (2025). Controlled release test results for the methane lidar camera. <https://doi.org/10.31223/X5HX58>
- Dosi, M., Lau, I., Zhuang, Y., Simakov, D. S., Fowler, M. W., & Pope, M. A. (2019). Ultrasensitive electrochemical methane sensors based on solid polymer electrolyte-infused laser-induced graphene. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(6), 6166–6173. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b22310>
- Du, M., Kang, X., Liu, Q., Du, H., Zhang, J., Yin, Y., & Cui, Z. (2024). City-level livestock methane emissions in China from 2010 to 2020. *Scientific Data*, 11(1), 251. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03072-y>
- 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. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02136>

- Ettre, L. S. (1961). Application of gas chromatographic methods for air pollution studies. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 11(1), 34–44. <https://doi.org/10.1080/00022470.1961.10467966>
- Fakhri, M. (2024). An analysis of Iran's temperature variations compared to the long-term standard climatic period. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 2(3), 17–32. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.7392.1062>
- Farzaneh, M., & Bani Mostafa Arab, F. (2023). Analysis of climate change adaptation laws in developed countries. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 1(1), 49–70. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.6024.1009>
- Farzaneh-Gord, M., Parvizi, S., Arabkooohsar, A., Machado, L., & Koury, R. N. N. (2015). Potential use of capillary tube thermal mass flow meters to measure residential natural gas consumption. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 22, 540–550. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.01.009>
- Feng, T., Sun, M., Song, S., Zhuang, H., & Yao, L. (2019). Gas chromatography for food quality evaluation. In *Evaluation technologies for food quality* (pp. 219–265). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814217-2.00012-3>
- Fu, L., You, S., Li, G., & Fan, Z. (2023). Enhancing methane sensing with NDIR technology: Current trends and prospects. *Reviews in Analytical Chemistry*, 42(1), 20230062. <https://doi.org/10.1515/revac-2023-0062>
- Fu, L., You, S., Li, G., Li, X., & Fan, Z. (2023). Application of semiconductor metal oxide in chemiresistive methane gas sensor: Recent developments and future perspectives. *Molecules*, 28(18), 6710. <https://doi.org/10.3390/molecules28186710>
- Fumoto, T. (2017). Process-based modeling of methane emissions from rice fields. *Bulletin of the NARO Agro-Environmental Sciences*, 38(38), 1. <http://www.naro.go.jp>
- Furst, L., Feliciano, M., Frare, L., & Igrejas, G. (2021). A portable device for methane measurement using a low-cost semiconductor sensor: Development, calibration, and environmental applications. *Sensors*, 21(22), 7456. <https://doi.org/10.3390/s21227456>
- Gao, Q., Zhang, Y., Yu, J., Wu, S., Zhang, Z., Zheng, F.,... & Guo, W. (2013). Tunable multi-mode diode laser absorption spectroscopy for methane detection. *Sensors and Actuators A: Physical*, 199, 106–110. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.05.012>
- Glagolev, M. V., Terentjeva, I. E., Sabrekov, A. F., & Karelina, D. V. (2023). Mathematical models of methane consumption by soils: A review. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 14(3), 145–166. <https://doi.org/10.18822/edgccc622937>
- Gopinathan, U., Brady, D. J., & Pitsianis, N. P. (2003). Coded apertures for efficient pyroelectric motion tracking. *Optics Express*, 11(18), 2142–2152. <https://doi.org/10.1364/OE.11.002142>
- Groot Zwaafink, C. D., Henne, S., Thompson, R. L., Dlugokencky, E. J., Machida, T., Paris, J. D.,... & Stohl, A. (2018). Three-dimensional methane distribution simulated with FLEXPART 8-CTM-1.1 constrained with observation data. *Geoscientific Model Development*, 11(11), 4469–4487. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-4469-2018>
- Gross, J. H. (2006). *Mass spectrometry: A textbook*. Springer Science & Business Media.
- Hartz, K. E., Klink, R. E., & Ham, R. K. (1982). Temperature effects: Methane generation from landfill samples. *Journal of the Environmental Engineering Division*, 108(4), 629–638. <https://doi.org/10.1061/JEEGAV.0001314>
- Heil, K., & Schmidhalter, U. (2017). Improved evaluation of field experiments by accounting for inherent soil variability. *European Journal of Agronomy*, 89, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.05.004>
- Heimann, I., Griffiths, P. T., Warwick, N. J., Abraham, N. L., Archibald, A. T., & Pyle, J. A. (2020). Methane emissions in a chemistry- climate model: Feedbacks and climate response. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(10), e2019MS002019. <https://doi.org/10.1029/2019MS002019>
- Hill, A. C., Schäfer, K. V., Forbrich, I., & Vargas, R. (2024). Empirical dynamic modeling reveals the complexity of methane fluxes in a temperate salt marsh. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 129(2), e2023JG007630. <https://doi.org/10.1029/2023JG007630>
- Hinkka, V., Mäkinen, R., Eckhardt, J., & Lastusilta, T. (2021). Alternative approach for improving sustainable supply chain management in the large European container ports. *HighTech and Innovation Journal*, 2(2), 131–137. <https://doi.org/10.28991/HIJ-2021-02-06>
- Hinshaw, J. V. (2006). The flame ionization detector. *LCGC Europe*, 19(4), 206–216.
- Hu, H., Landgraf, J., Detmers, R., Borsdorff, T., Aan de Brugh, J., Aben, I.,... & Hasekamp, O. (2018). Toward global methane mapping with TROPOMI: First results and intersatellite comparison to GOSAT. *Geophysical Research Letters*, 45(8), 3682–3689. <https://doi.org/10.1002/2018GL077259>

- Ito, A., Patra, P. K., & Umezawa, T. (2023). Bottom-up evaluation of the methane budget in Asia and its subregions. *Global Biogeochemical Cycles*, 37(6), e2023GB007723. <https://doi.org/10.1029/2023GB007723>
- Jing, Y., Yuhua, C., Yupeng, Y., Xiaofei, L., Zuwei, Z., Ming, X.,... & Yuzhe, Z. (2021). Design and optimization of an integrated MEMS gas chamber with high transmissivity. *Digital Communications and Networks*, 7(1), 82-91. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2020.05.006>
- Johnson, D. R., Covington, A. N., & Clark, N. N. (2016). Design and use of a full flow sampling system (FFS) for the quantification of methane emissions. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*, 112, e54179. <https://doi.org/10.3791/54179>
- Jonas, M., Bun, R., Nahorski, Z., Marland, G., Gusti, M., & Danylo, O. (2019). Quantifying greenhouse gas emissions. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24, 839-852. <https://doi.org/10.1007/s11027-019-09867-4>
- Jun, L., Qiulin, T., Wendong, Z., Chenyang, X., Tao, G., & Jijun, X. (2011). Miniature low-power IR monitor for methane detection. *Measurement*, 44(5), 823-831. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.01.021>
- Khan, N., Khattak, K. S., Ullah, S., & Khan, Z. (2019, December). A low-cost IoT-based system for environmental monitoring. In *2019 International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT)* (pp. 173-1735). IEEE. <https://doi.org/10.1109/FIT47737.2019.00041>
- Khaw, M. K., Mohd-Yasin, F., & Nguyen, N. T. (2016). Microcalorimeter: Design considerations, materials, and examples. *Microelectronic Engineering*, 158, 107-117. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2016.03.050>
- Kwaśny, M., & Bombalska, A. (2023). Optical methods of methane detection. *Sensors*, 23(5), 2834. <https://doi.org/10.3390/s23052834>
- Leifer, I., Melton, C. H. R. I. S. T. O. P. H. E. R., Manish, G., & Leen, B. (2014). Mobile monitoring of methane leakage. *Gases and Instrumentation*, 2014, 20-24.
- Li, C., Frolking, S., & Frolking, T. A. (1992). A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D9), 9759-9776. <https://doi.org/10.1029/92JD00509>
- Li, L., Wang, M., Wang, D., & Li, Y. (2024). Development of differential pressure flowmeter and its application in coalbed methane wells. *Journal of Applied Physics*, 135(22). <https://doi.org/10.1063/5.0215306>
- Li, N., Wang, J., Liu, R., Huang, H., Willerström, J., & Höök, M. (2024). Methane emissions from the natural gas industry in China—A systematic accounting based on the bottom-up approach. *Gas Science and Engineering*, 126, 205346. <https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2024.205346>
- Lin, S., Chang, J., Sun, J., & Xu, P. (2022). Improvement of the detection sensitivity for tunable diode laser absorption spectroscopy: A review. *Frontiers in Physics*, 10, 853966. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.853966>
- Livingston, G. P. (1994). Enclosure-based measurement of trace gas exchange: Applications and sources of error. *Methods in Ecology: Biogenic Trace Gas Emissions from Soil and Water*, 14-17. <https://doi.org/10.1573950399856417408>
- Lloyd, D., & Scott, R. I. (1983). Direct measurement of dissolved gases in microbiological systems using membrane inlet mass spectrometry. *Journal of Microbiological Methods*, 1(6), 313-328. [https://doi.org/10.1016/0167-7012\(83\)90008-8](https://doi.org/10.1016/0167-7012(83)90008-8)
- Lorente, A., Borsdorff, T., Butz, A., Hasekamp, O., Aan de Brugh, J., Schneider, A.,... & Landgraf, J. (2021). Methane retrieved from TROPOMI: Improvement of the data product and validation of the first 2 years of measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(1), 665-684. <https://doi.org/10.5194/amt-14-665-2021>
- March, R. E., & Todd, J. F. (2005). *Quadrupole ion trap mass spectrometry*. John Wiley & Sons.
- Martyr, A. J., & Plint, M. A. (2012). Engine testing: The design, building, modification, and use of powertrain test facilities. In *Chapter 16 - Engine Exhaust Emissions* (pp. 407-450). Elsevier.
- Meyer, A. G., Lindenmaier, R., Heerah, S., Benedict, K. B., Kort, E. A., Peischl, J., & Dubey, M. K. (2022). Using multiscale ethane/methane observations to attribute coal mine vent emissions in the San Juan Basin from 2013 to 2021. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(18), e2022JD037092. <https://doi.org/10.1029/2022JD037092>
- Morais, T. A., Fleming, N. A., Attalage, D., Mayer, B., Mayer, K. U., & Ryan, M. C. (2024). Field investigation of the transport and attenuation of fugitive methane in shallow groundwater around an oil and gas well with gas migration. *Science of the Total Environment*, 908, 168246. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168246>

Nefedev, A. I., & Konovalenko, A. A. (2020, May). Flame ionization detector for boiler control system. In *2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9112018>

Park, N. H., Akamatsu, T., Itoh, T., Izu, N., & Shin, W. (2014). Calorimetric thermoelectric gas sensor for the detection of hydrogen, methane, and mixed gases. *Sensors*, 14(5), 8350-8362. <https://doi.org/10.3390/s140508350>

Parthasarathi, T., Vanitha, K., Mohandass, S., & Vered, E. (2019). Mitigation of methane gas emission in rice by drip irrigation. *F1000Research*, 8, 2023. <https://doi.org/10.12688/f1000research.20945.1>

Pavelka, M., Acosta, M., Kiese, R., Altimir, N., Brümmer, C., Crill, P.,... & Kutsch, W. (2018). Standardisation of chamber technique for CO₂, N₂O, and CH₄ fluxes measurements from terrestrial ecosystems. *International Agrophysics*, 32(4), 569-587. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0045>

Phillips, N. G., Ackley, R., Crosson, E. R., Down, A., Hutya, L. R., Brondfield, M.,... & Jackson, R. B. (2013). Mapping urban pipeline leaks: Methane leaks across Boston. *Environmental Pollution*, 173, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.11.003>

Popa, D. C., Laurent, Y., Popa, R. A., Pasat, A., Bălănescu, M., Svertoka, E.,... & Marin, M. P. (2023). A platform for GHG emissions management in mixed farms. *Agriculture*, 14(1), 78. <https://doi.org/10.3390/agriculture14010078>

Prather, M. J., Holmes, C. D., & Hsu, J. (2012). Reactive greenhouse gas scenarios: Systematic exploration of uncertainties and the role of atmospheric chemistry. *Geophysical Research Letters*, 39(9). <https://doi.org/10.1029/2012GL051440>

Rahimi, J., Rahimi, A., & Bazrafshan, J. (2013). Study of persistence of polluted days with carbon monoxide (CO) in Tehran city using the Markov Chain model. *SID*. <https://sid.ir/paper/87572/fa>

Reddy, K. R., Yargicoglu, E. N., & Chetri, J. K. (2021). Field-scale performance of biochar-amended soil covers for landfill methane oxidation. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01487-w>

Rengel, A. (2007). Study of lignocellulosic biomass pyrolysis: State of the art and modelling. *TRITA-IM*, ISSN 1402-7615; 2007:6

Riddick, S. N., Cheptonui, F., Yuan, K., Mbua, M., Day, R., Vaughn, T. L.,... & Zimmerle, D. J. (2022). Estimating regional methane emission factors from energy and agricultural sector sources using a portable measurement system: Case study of the Denver–Julesburg Basin. *Sensors*, 22(19), 7410. <https://doi.org/10.3390/s22197410>

Sang, J., Yang, X., He, T., & Li, J. (2019, May). Highly sensitive detection of atmospheric methane using infrared laser absorption spectroscopy. In *14th National Conference on Laser Technology and Optoelectronics (LTO 2019)* (Vol. 11170, pp. 82-89). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2531687>

Shankar, P., & Rayappan, J. B. B. (2015). Gas sensing mechanism of metal oxides: The role of ambient atmosphere, type of semiconductor, and gases – A review. *Scientific Letters Journal*, 4(4), 126.

Sherstov, I. V., & Kolker, D. B. (2020). Photoacoustic methane gas analyser based on a 3.3-μm optical parametric oscillator. *Quantum Electronics*, 50(11), 1063. <https://doi.org/10.1070/QEL17316>

Siegenthaler, A., Welch, B., Pangala, S. R., Peacock, M., & Gauci, V. (2016). Technical note: Semi-rigid chambers for methane gas flux measurements on tree stems. *Biogeosciences*, 13, 1197–1207. <https://doi.org/10.5194/bg-13-1197-2016>

Singh, M., Patra, S., & Singh, R. K. (2021). Common techniques and methods for screening natural products for developing anticancer drugs. In *Evolutionary Diversity as a Source for Anticancer Molecules* (pp. 323-353). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821710-8.00015-1>

Sommer, V., Tobias, P., & Kohl, D. (1993). Methane and butane concentrations in a mixture with air were determined by microcalorimetric sensors and neural networks. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 12(2), 147-152. [https://doi.org/10.1016/0925-4005\(93\)80011-Y](https://doi.org/10.1016/0925-4005(93)80011-Y)

Sun, J., Wang, M., Xu, X., Cheng, K., Yue, Q., & Pan, G. (2020). Re-estimating methane emissions from Chinese paddy fields based on a regional empirical model and high-spatial-resolution data. *Environmental Pollution*, 265, 115017. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115017>

- Tereshkov, M., Dontsova, T., Saruhan, B., & Krüger, S. (2024). Metal oxide-based sensors for ecological monitoring: Progress and perspectives. *Chemosensors*, 12(3), 42. <https://doi.org/10.3390/chemosensors12030042>
- Thomas, S. N. (2019). Chapter 10 - Mass spectrometry. In *Contemporary Practice in Clinical Chemistry* (pp. 171-185).
- Thompson, J. M., Stephen, W. I., & Sithamparanadarajah, B. (1985). The gas chromatographic separation of anaesthetic agents and aerosol propellants in operating room air using serially packed columns. *Analytica Chimica Acta*, 178, 341-345. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)86287-X](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)86287-X)
- Uzoma, K. C., Smith, W., Grant, B., Desjardins, R. L., Gao, X., Hanis, K.,... & Li, C. (2015). Assessing the effects of agricultural management on nitrous oxide emissions using flux measurements and the DNDC model. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 206, 71-83. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.014>
- van Caspel, W. E., Klimont, Z., Heyes, C., & Fagerli, H. (2024). Impact of methane and other precursor emission reductions on surface ozone in Europe: Scenario analysis using the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) Meteorological Synthesizing Centre-West (MSC-W) model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(20), 11545-11563. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-1422>
- Van der Gon, H. A. C., Neue, H. U., Lantin, R. S., Wassmann, R., Alberto, M. C. R., Aduna, J. B., & Tan, M. J. P. (1992). Controlling factors of methane emission from rice fields. *World Inventory of Soil Emission Potentials*, 2, 81-92.
- Vaskovskii, S., & Brokarev, I. (2023, August). Analysis of methods and systems for natural gas composition and energy characteristics determination. In *2023 5th International Conference on Problems of Cybernetics and Informatics (PCI)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PCI60110.2023.10325991>
- Veltman, K., Jones, C. D., Gaillard, R., Cela, S., Chase, L., Duval, B. D.,... & Joliet, O. (2017). Comparison of process-based models to quantify nutrient flows and greenhouse gas emissions associated with milk production. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 237, 31-44. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.018>
- Wang, G. (2010). Parameterization and uncertainty analysis in modeling: An application to soil greenhouse gas emission models. Washington State University. Theses, 2010. 3445399.
- Warfvinge, P. (1995). Basic principles of frequently used models. In *Solute modelling in catchment systems* (pp. 57-72).
- Weng, B. (2024). The road to climate change mitigation via methane emissions monitoring. *Nature Reviews Electrical Engineering*, 1(2), 69-70. <https://doi.org/10.1038/s44287-023-00014-5>
- Wilkinson, J., Bors, C., Burgis, F., Lorke, A., & Bodmer, P. (2018). Measuring CO₂ and CH₄ with a portable gas analyzer: Closed-loop operation, optimization, and assessment. *PloS One*, 13(4), e0193973. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193973>
- Wu, B., Ouro-Koura, H., Lu, S. H., Li, H., Wang, X., Xiao, J., & Deng, Z. D. (2023). Functional materials for powering and implementing next-generation miniature sensors. *Materials Today*. <https://doi.org/10.1016/j.matod.2023.09.001>
- Xiao, C., Meng, Z., & Tian, L. (2019). Semi-analytical modeling of productivity analysis for the five-spot well pattern scheme in methane hydrocarbon reservoirs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(49), 26955-26969. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.170>
- Xu, B., Li, X., Haghighi, M., Du, X., Yang, X., Chen, D., & Zhai, Y. (2013). An analytical model for the desorption area in coal-bed methane production wells. *Fuel*, 106, 766-772. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.12.082>
- Yan, X., Ohara, T., & Akimoto, H. (2003). Development of region- specific emission factors and estimation of methane emission from rice fields in the East, Southeast, and South Asian countries. *Global Change Biology*, 9(2), 237-254. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00564.x>
- Yan, X., Yagi, K., Akiyama, H., & Akimoto, H. (2005). Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields. *Global Change Biology*, 11(7), 1131-1141. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00976.x>
- Yang, B., Xu, J., Wang, C., & Xiao, J. (2020). A potentiometric sensor based on SmMn₂O₅ sensing electrode for methane detection. *Materials Chemistry and Physics*, 245, 122679. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.122679>
- Yang, X. S. (2016). *Engineering mathematics with examples and applications*. Academic Press.

Zainal, Z. A., Ali, R., Lean, C. H., & Seetharamu, K. N. (2001). Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials. *Energy Conversion and Management*, 42(12), 1499-1515. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00078-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00078-9)

Zhao, R., Neighbour, G., & Deutz, P. (2011, May). Preliminary study of hazardous materials management: An optimization model in the context of green supply chain management. In *2011 5th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/icbbe.2011.5781397>

Zuo, H. L., Yang, F. Q., Huang, W. H., & Xia, Z. N. (2013). Preparative gas chromatography and its applications. *Journal of Chromatographic Science*, 51(7), 704-715. <https://doi.org/10.1093/chromsci/bmt040>

NOAA. (n.d.). *Trends in atmospheric methane*. Global Monitoring Laboratory. Retrieved from https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4

سازمان اسناد و کتابخانه ملی
جمهوری اسلامی ایران