



Scientific Journal Quarterly of Middle East Studies

Vol 32. No 3. Autumn 2025

Received date: 2025.07.23

Acceptance date: 2026.01.24



مرکز پژوهش‌های علمی و
مطالعات استراتژیک خاورمیانه

Home page: www.cmess.sinaweb.net

Establishing Regional Methane Emission Monitoring Centers: A Key Strategy for Energy Security and Climate Diplomacy

Hossein Maazallahi¹, Fathollah Pourfayaz²



Abstract

Methane is a potent greenhouse gas that plays a key role in global warming. The West Asia and North Africa region is severely affected by climate change, including decreased precipitation, desertification, pressure on water resources and agriculture, and threats to energy security. This research addresses the question: "How can the reduction of methane emissions from the energy sector be leveraged to simultaneously achieve climate, energy security, and diplomatic objectives in this region?" The research hypothesis is based on the spatial variation of methane emissions from the oil and gas systems across countries in the region and its dependence on technical, managerial, and policy factors, necessitating continuous monitoring. Using a mixed-method approach involving the analysis of satellite data from the International Methane Emissions Observatory (IMEO), calculation of emission intensity, and review of influencing factors, the findings reveal that energy loss due to methane emissions reaches up to 14% of total energy production in some countries, and emission intensity in the oil industry can reach 20%. Technology level, monitoring, equipment quality, and environmental policies are key factors contributing to this variation. Reducing methane emissions represents a golden opportunity for controlling global warming due to its cost-effectiveness and technical feasibility. This article proposes the establishment of regional monitoring centers utilizing satellite data and collaboration with active companies, which can lead to gradual emission reduction, enhanced energy security, and the development of constructive diplomacy in the region.

Keywords: Monitoring Methane Emissions, Climate Change, Regional Cooperation.

1 - Department of Renewable Energies Technology and Energy Resources Engineering, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran.

2 - Professor, Department of New Energy and Environment, Faculty of Modern Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran.



مرکز پژوهش‌های علمی و
مطالعات استراتژیک خاورمیانه

فصلنامه علمی مطالعات خاورمیانه

سال ۳۲، شماره ۳، پیاپی (۱۲۱)، پاییز ۱۴۰۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۴

Home page: www.cmess.sinaweb.net

نوع مقاله: پژوهشی

ایجاد مراکز منطقه‌ای پایش انتشار متان: راهبرد کلیدی برای امنیت انرژی و دیپلماسی اقلیمی

حسین معاذاللهی^۱، فتح‌اله پورفایز^۲



چکیده

متان به‌عنوان گاز گلخانه‌ای قدرتمند، نقش کلیدی در گرمایش زمین دارد. منطقه غرب آسیا و شمال آفریقا تحت تأثیر شدید تغییرات اقلیمی شامل کاهش بارندگی، بیابان‌زایی، فشار بر منابع آب و کشاورزی و تهدید امنیت انرژی قرار دارد. این پژوهش به این پرسش می‌پردازد که «چگونه می‌توان کاهش انتشار متان از بخش انرژی را برای دستیابی هم‌زمان به اهداف اقلیمی، امنیت انرژی و دیپلماسی در این منطقه به کار گرفت؟». فرضیه تحقیق مبتنی بر تفاوت مکانی انتشار متان در سیستم نفت و گاز کشورهای منطقه و وابستگی آن به عوامل فنی، مدیریتی و سیاست‌گذاری است که پایش مستمر را ضروری می‌سازد. با روشی ترکیبی شامل تحلیل آماری داده‌های گزارش شده انتشار بر پایه داده‌های ماهواره‌ای به دست آمده از رصدخانه بین‌المللی متان، مطالعات مروری، محاسبه شدت انتشار نسبت به میزان تولید و بررسی عوامل مؤثر، یافته‌ها نشان می‌دهد هدررفت انرژی ناشی از انتشار متان وابستگی مکانی دارد و در برخی کشورها به ۱۴٪ از کل تولید انرژی و شدت انتشار در صنعت نفت به ۲۰٪ می‌رسد. سطح فناوری به کار گرفته شده، میزان نظارت و پایش، کیفیت تجهیزات و سیاست‌های محیط‌زیستی از عوامل کلیدی این تفاوت هستند. این در حالی است که کاهش انتشار متان به دلیل مقرون به صرفه بودن و امکان‌پذیری فنی، فرصتی طلایی برای کنترل گرمایش زمین است. این مقاله ایجاد مراکز پایش منطقه‌ای با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و همکاری با شرکت‌های فعال در صنایع نفت و گاز را پیشنهاد می‌دهد که می‌تواند به کاهش تدریجی انتشار، تقویت امنیت انرژی و توسعه دیپلماسی سازنده در منطقه بینجامد. **واژگان کلیدی:** پایش انتشار متان، تغییرات اقلیمی، همکاری منطقه‌ای.

۱ - دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکده‌های بین رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
h.maazallahi@ut.ac.ir

۲ - استاد، گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
pourfayaz@ut.ac.ir

مقدمه

تغییر اقلیم به عنوان یکی از پیچیده ترین و پرچالش ترین مسائل عصر حاضر، امنیت زیست محیطی، اقتصادی و سیاسی جهان را تحت تأثیر قرار داده است. در این میان، منطقه استراتژیک غرب آسیا به دلیل وابستگی شدید به درآمدهای حاصل از سوخت های فسیلی از یک سو و قرارگیری در کمربند خشک و نیمه خشک جهان از سوی دیگر، در کانون آسیب پذیری شدیدتری نسبت به پیامدهای تغییر اقلیم قرار دارد. در این چارچوب، انتشار گازهای گلخانه ای به ویژه متان (CH_4) که با وجود غلظت کمتر در مقایسه با دی اکسید کربن، دارای «پتانسیل گرمایش جهانی»^۱ به مراتب قوی تری است. با این وجود کاهش انتشار گازهای گلخانه ای به ویژه از صنعت نفت و گاز نشان داده که نه تنها امری امکان پذیر در راستای کنترل گرمایش جهانی است، بلکه اثرات مثبت فراوان اقتصادی را نیز به همراه دارد.

صنعت نفت و گاز به عنوان یکی از ارکان اقتصاد کشورهای منطقه، سهم قابل توجهی در انتشار متان دارد. این انتشار نه تنها به عنوان یک آلاینده اقلیمی قدرتمند عمل می کند، بلکه نشانگر هدررفت منابع انرژی و ضعف در مدیریت بهینه زنجیره ارزش این صنعت است. از دست رفتن گاز طبیعی (که عمدتاً از متان تشکیل شده) به معنای از دست دادن یک منبع انرژی ارزشمند برای مصارف داخلی یا صادرات و در نتیجه تضعیف امنیت انرژی و کاهش درآمدهای ملی است.

با این حال، رویکرد غالب به مسئله انتشار متان، اغلب محدود به جنبه های زیست محیطی آن بوده و پیوند عمیق آن با مقوله های امنیت انرژی و دیپلماسی منطقه ای کمتر مورد توجه جامع قرار گرفته است. این مقاله با پذیرش این فرضیه که «وابستگی مکانی میزان انتشار از فعالیت های مربوط به نفت و گاز در منطقه»، در پی پاسخ به این پرسش اصلی است که: «چگونه می توان کنترل و کاهش انتشار متان از بخش انرژی را به بهترین صورت جهت نیل به اهداف اقلیمی، امنیت انرژی و دیپلماسی در منطقه غرب آسیا و شمال آفریقا پیش برد؟»

برای پاسخ به این پرسش، این مقاله از یک رویکرد تحلیلی-توصیفی و مرور مطالعات گذشته بهره می برد. در بعد کیفی، با مرور نظام مند اسناد، گزارش های بین المللی و ادبیات علمی، ابتدا به بیان و بزرگی مسئله در منطقه مورد مطالعه پرداخته می شود. سپس در بعد کمی، به نحوه استفاده از گزارش های انتشار بر پایه داده های ماهواره ای و الگوریتم خوشه بندی برای شناسایی، کمی سازی و مقایسه «شدت

انتشار متان» در بین کشورهای مختلف منطقه پرداخته می‌شود. در بخش بعدی، نتایج به دست آمده از تحلیل کمی-آماري به همراه مرور مطالعات گذشته به بحث گذاشته می‌شود و عوامل تفاوت در میزان شدت انتشار بررسی می‌گردند. در پایان این مقاله در بخش نتیجه‌گیری و پیشنهادات، به پیشنهاد عملی و ساختاری برای نیل به اهداف بیان شده پرداخته می‌شود.

۱- بیان مسئله

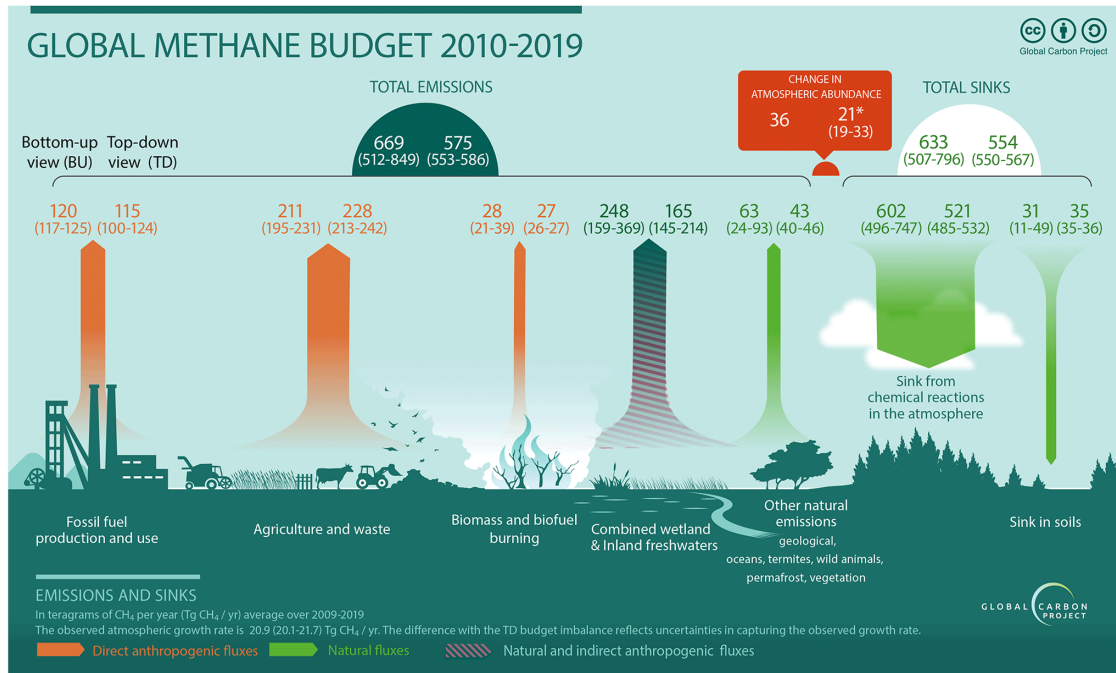
در شرایطی که جهان به سرعت به سمت گذار انرژی حرکت می‌کند، منطقه استراتژیک خاورمیانه در یک دوگانگی تاریخی قرار گرفته است. از یک سو، دارایی‌های عظیم سوخت فسیلی، پایه اقتصادی و ژئوپلیتیک این منطقه را تشکیل می‌دهد و از سوی دیگر، این کشورها در کانون آسیب‌پذیری نسبت به تغییرات اقلیمی و تحت فشار فزاینده بین‌المللی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای قرار دارند. در این میان، متان به عنوان یک گاز گلخانه‌ای قدرتمند با عمر کوتاه‌تر، نه تنها یک تهدید اقلیمی، بلکه نماد یک شکست سه‌گانه در منطقه محسوب می‌شود: شکست محیط زیستی به دلیل تشدید گرمایش جهانی، شکست اقتصادی ناشی از هدررفت منابع گازی با ارزش که می‌تواند به درآمد و امنیت انرژی تبدیل شود و شکست سیاسی به علت تبدیل نشدن این چالش مشترک به فرصتی برای همکاری‌های منطقه‌ای. مسئله اصلی این مقاله این است که چگونه می‌توان با تبدیل کاهش انتشار متان از بخش انرژی از یک الزام صرفاً زیست محیطی به یک راهبرد سودمند سه جانبه، هم‌زمان به اهداف اقلیمی پاسخ گفت، امنیت انرژی و اقتصاد داخلی را تقویت کرد و گفتگوی دیپلماتیک را در یک منطقه پرتنش احیا نمود.

۱-۱- اهمیت پرداختن به انتشار گاز متان

متان یکی از گازهای گلخانه‌ای اصلی است که به رغم حضور کمتر آن نسبت به دی‌اکسیدکربن (CO_2) در جو، اثر گرمایشی بسیار قوی‌تری دارد. متان از نظر پتانسیل گرمایش جهانی در یک بازه زمانی ۲۰ ساله حدود ۸۴ تا ۸۶ برابر و در بازه ۱۰۰ ساله حدود ۲۸ تا ۳۶ برابر قوی‌تر از دی‌اکسیدکربن (Forster et al., 2021: 1017) در به دام انداختن گرمای زمین است. این به آن معنا است که هر واحد متان منتشر شده، در کوتاه مدت تأثیر بسیار بیشتری بر افزایش دمای زمین دارد. باتوجه به طول عمر کوتاه متان در جو که 9.1 ± 0.9 سال (Prather et al., 2012) است، باعث می‌شود کاهش انتشار آن بتواند در بازه زمانی کوتاه، تأثیر قابل توجهی در کاهش نرخ گرمایش جهانی داشته باشد. به همین دلیل، مهار انتشار متان یکی از مؤثرترین راهبردهای فوری برای مقابله با تغییر اقلیم به شمار می‌رود. بررسی‌ها نشان داده

است که کاهش ۴۵٪ انتشار گاز متان با منشا انسانی می‌تواند ۰.۳ درجه سلسیوس از گرمایش کره زمین در دو دهه آینده را جلوگیری نماید (CCAC, 2021: 6). با جود انتشار کمتر دی‌اکسیدکربن در تولید واحد انرژی از گاز طبیعی نسبت به دیگر سوخت‌های فسیلی، انتشار گاز متان باعث خنثی شدن این اثر مثبت محیط زیستی می‌گردد (جبّاری و همکاران، ۱۳۹۹: ۱). در این بین، کاهش انتشار از سیستم‌های نفت و گاز نشان داده که علاوه بر فواید محیط زیستی دارای اهمیت اقتصادی، بهبود کیفیت هوا و تامین امنیت انرژی نیز می‌باشد (West et al., 2006: 3988). انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه دی‌اکسیدکربن و متان که در این میان فعالیت‌های انسانی نقش اصلی را ایفا می‌کنند (Wang et al., 2017: 5)، باعث گرمایش کره زمین و در پیرو آن تغییرات اقلیمی می‌گردد. انتشار گاز متان را با تجهیزات و روش‌های متفاوت می‌توان رصد نمود. برای مثال انتشار متان را می‌توان از سیستم گاز شهری با استفاده از سنجنده‌های زمینی (Maazallahi et al., 2020; Afshoun et al., 2022) و یا از مناطق وسیع صنعتی توسط سنجنده‌های ماهواره‌ای (کلائی و سام‌خانیانی، ۱۴۰۴: ۱) شناسایی و کمی‌سازی نمود. صنعت سوخت‌های فسیلی بین ۱۵ تا ۲۱٪ کل انتشار گاز متان (مجموع منشا انسانی و طبیعی) را در بین سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۱۹ را بر عهده داشته (تصویر ۱) که اگر تنها به مشارکت صنایع سوخت‌های فسیلی به میزان انتشار کل با منشا انسانی پرداخته شود، این مشارکت در حدود ۳۰٪ می‌باشد.

تصویر ۱- منابع انتشار حذف گاز متان در سطح جهانی، تخمین زده می‌شود که صنعت سوخت فسیلی در طول سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۱۹ به طور میانگین سالانه بین ۱۰۰ تا ۱۲۵ تراگرم انتشار متان داشته باشد که به میزان ۳۰٪ مشارکت کل منابع انتشار با منشا انسانی و ۱۵-۲۱٪ کل میزان انتشار با منشا طبیعی و انسانی در سطح جهانی بوده است.



(Saunois et al., 2025: 1914)

۲-۱- آسیب‌پذیری منطقه غرب آسیا از منظر تغییر اقلیم

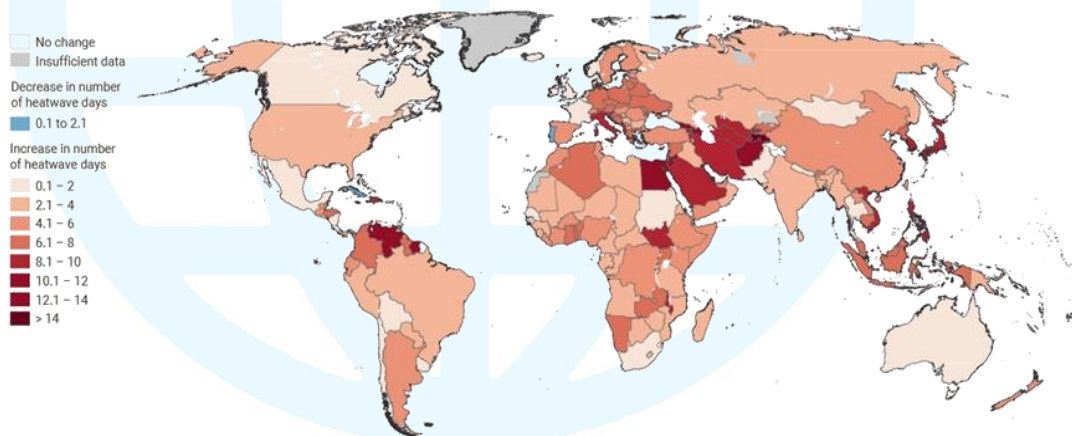
تغییر اقلیم در خاورمیانه نه تنها یک مسئله محیط زیستی، بلکه تهدیدی راهبردی برای توسعه پایدار، امنیت انسانی و ثبات سیاسی منطقه است. در سطح منطقه‌ای، به‌ویژه در خاورمیانه که اقلیم آن ذاتاً گرم و خشک است، پیامدهای تغییر اقلیم می‌تواند شدیدتر باشد؛ از جمله کاهش منابع آبی، تشدید بیابان‌زایی و افزایش آسیب‌پذیری اقتصادی و اجتماعی، که در نهایت ممکن است به بی‌ثباتی سیاسی و افزایش مهاجرت منجر شود (Waha et al., 2017: 1). مطالعات نشان داده‌اند که سرعت گرم شدن در منطقه خاورمیانه بیشتر از میانگین جهانی است (UNICEF, 2022: 2).

۱-۲-۱- افزایش مناطق و روزهای گرم، کاهش بارندگی، بیابانزایی

منطقه غرب آسیا در دهه‌های اخیر با روندهای اقلیمی نگران‌کننده‌ای مواجه شده که از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به افزایش دمای میانگین سالانه، کاهش بارندگی و گسترش پدیده بیابانزایی اشاره کرد. داده‌های اقلیمی نشان می‌دهند که نرخ گرم شدن هوا در خاورمیانه بالاتر از میانگین جهانی است (Malik et al., 2024: 1; Ahmadalipour & Moradkhani, 2018: 215). این منطقه در آینده ممکن است برای زندگی انسان غیر قابل تحمل شوند. در مقیاس جهانی مناطقی که با موج گرمای شدید مواجه شده‌اند از ۱۸٪ در دهه ۱۹۵۱-۱۹۶۰ به میزان ۴۷٪ در سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۲۲ افزایش یافته است (Romanello et al., 2023: 2361). همان گونه که در تصویر ۲ مشاهده می‌گردد، افزایش میانگین تعداد روزهای گرم محسوس توسط افراد با سن ۶۵ سال به بالا در منطقه خاورمیانه در سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۲۲ نسبت به سال‌های ۱۹۸۶-۲۰۰۵ نسبت به دیگر نقاط جهان بالاتر می‌باشد.

تصویر ۲- افزایش روزهای گرم محسوس برای سنین بالای ۶۵ سال در سال، مقایسه میانگین افزایش

سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۲۲ نسبت به ۱۹۸۶-۲۰۰۵



(داده‌های برگرفته از (Romanello et al., 2023) و ارائه شده در گزارش (UNEP, 2025: 54))

۱-۲-۲- تأثیرات بر منابع آب، کشاورزی و سکونتگاه‌ها

هم‌زمان با افزایش گرما در منطقه خاورمیانه، کاهش منابع بارندگی و افت سطح آب‌های زیرزمینی موجب فشار فزاینده بر منابع آبی (Khosravi et al., 2024: 1) و کشاورزی (Shahpari et al., 2023: 1) شده و زمینه‌ساز مهاجرت‌های اقلیمی و ناپایداری اجتماعی گشته است. گسترش بیابان‌ها، کاهش پوشش گیاهی و فرسایش خاک، به‌ویژه در کشورهای خشک و نیمه خشک

منطقه، پیامدهای مستقیمی بر امنیت غذایی، منابع طبیعی و حتی ساختارهای اقتصادی دارد. آمارها نشان داده که با کمبود منابع آبی در منطق روستایی که بر پایه اقتصاد کشاورزی گسترش یافته‌اند، تمایل به مهاجرت درون منطقه‌ای به‌خصوص به مناطق شهری بیشتر از مهاجرت برون منطقه‌ای است (Almulhim et al., 2024: 2; An et al., 2025: 2).

۱-۲-۳- تهدیدات تغییر اقلیم بر امنیت انرژی در منطقه غرب آسیا

امنیت انرژی در خاورمیانه مفهومی چند وجهی است که هم به ظرفیت تولید و صادرات پایدار انرژی اشاره دارد و هم به تأمین تقاضای داخلی در شرایط اقتصادی و اقلیمی متغیر. در اقتصادهای در حال رشد خاورمیانه، به‌عنوان اقتصادهای در حال رشد، جایگاه انرژی و استفاده بیش از میزان تولید آن در داخل باعث جلوگیری از رشد اقتصادی در بلند مدت می‌گردد (عصاری آرانی، ع. و رستمی، ۱۴۰۱: ۱۴۴). این منطقه با در اختیار داشتن بخش بزرگی از ذخایر نفت و گاز جهان، یکی از قطب‌های اصلی تأمین انرژی در سطح بین‌المللی می‌باشد و ثبات تولید و صادرات آن برای بازارهای جهانی حیاتی تلقی می‌شود. در عین حال، بسیاری از کشورهای خاورمیانه با رشد سریع جمعیت و افزایش مصرف داخلی انرژی روبه‌رو هستند، به‌ویژه در بخش‌های خانگی، صنعتی و سرمایه‌شی. این افزایش رشد جمعیت و کاهش منابع در مناطق روستایی و مهاجرت به شهرها باعث افزایش فشار برای تأمین انرژی می‌گردد و امنیت انرژی و در نهایت رشد اقتصادی این کشورها را مورد تهدید قرار می‌دهد. از این رو، تأمین پایدار انرژی برای نیازهای داخلی بدون لطمه به صادرات و درآمدهای ارزی، یکی از چالش‌های راهبردی منطقه محسوب می‌شود که این مهم نه تنها متأثر از تغییر جمعیتی در این منطقه است، بلکه گرمایش مضاعف در این منطقه موضوع امنیت انرژی را تحت تأثیر قرار داده است.

تغییر اقلیم ناشی از انتشار روزافزون گازهای گلخانه‌ای با افزایش دما، طوفان‌های شدید و بالا آمدن سطح دریاها، تهدیدات متعددی برای امنیت انرژی می‌تواند داشته باشد. تأسیسات نفتی و گازی که اغلب در مناطق ساحلی یا بیابانی مستقر هستند، در معرض آسیب‌های مستقیم ناشی از گرمای شدید، شن‌طوفان‌ها و حتی سیلاب‌های ناگهانی قرار دارند. افزایش دمای محیط می‌تواند کارایی نیروگاه‌ها، خطوط انتقال و تجهیزات خنک‌کننده را کاهش دهد و همچنین خطر آتش‌سوزی و خرابی تجهیزات را بالا ببرد. در برخی مناطق ساحلی مانند خلیج فارس، افزایش دمای آب و بالا آمدن سطح دریا ممکن است زیرساخت‌های حیاتی مانند سکوهای نفتی و پایانه‌های صادراتی را تهدید کند. افزون بر این، اختلال در تأسیسات تولیدی می‌تواند صادرات انرژی را مختل کرده و امنیت عرضه به بازارهای جهانی

را به خطر اندازد. از این رو، تاب‌آوری زیرساخت‌های انرژی در برابر مخاطرات اقلیمی، به بخشی حیاتی از برنامه‌ریزی امنیت انرژی در خاورمیانه تبدیل شده است. افزون بر آن، افزایش شهرنشینی این چالش‌ها را به مراتب تشدید می‌نماید.

۱-۳- دیپلماسی اقلیمی و انرژی: همکاری‌های منطقه‌ای برای کاهش انتشار متان

کشورهای حوزه نفت‌خیز خلیج فارس اکنون برنامه‌هایی را برای مواجهه با تغییرات اقلیمی در دستور کار قرارداده‌اند، اما این اقدامات نشان داده که هم‌راستا با اقلیم این منطقه نمی‌باشد و ریشه در اختلاف سیاسی کشورهای منطقه می‌باشد (Naderi et al., 2021: 1). در این بین، شرکت‌های ملی و خصوصی فعال در این صنعت در این منطقه می‌توانند نقش کلیدی برای کاهش انتشار گاز متان ایفا نمایند (حکاک‌زاده و طالبی، ۱۴۰۱: ۱۷۱). تحولات اقلیمی، نیاز فوری به برنامه‌ریزی‌های اقلیمی و سازگاری با شرایط جدید را در خاورمیانه ضروری ساخته‌اند. عدم ثبات در بخش انرژی می‌تواند تاثیر منفی در تامین مواد غذایی و ایجاد بحران در این زمینه را نیز داشته باشد (Hussein Mohammed Qasem & Scholz, 2025: 10). این مهم نیازمند یک دیپلماسی و ارتباط مستحکم، سازنده و مداوم با اهداف کوتاه، میانه و بلند مدت در میان کشورهای این منطقه می‌باشد. دیپلماسی اقلیمی در خاورمیانه طی سال‌های اخیر به طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته، زیرا کشورهای این منطقه در کنار نقش تاریخی خود به عنوان صادرکنندگان انرژی فسیلی، اکنون با فشارهای بین‌المللی و تهدیدات داخلی ناشی از تغییر اقلیم نیز روبه‌رو هستند. بسیاری از این کشورها، از جمله امارات متحده عربی، عربستان سعودی، قطر و ایران، به توافق‌نامه پاریس پیوسته‌اند (Agreement, 2015 Paris) و متعهد به کاهش تدریجی انتشار گازهای گلخانه‌ای شده‌اند، گرچه میزان تعهد و اجرای عملی آنها متفاوت است. در همین راستا، اقداماتی نظیر میزبانی اجلاس COP28^۱ توسط امارات یا سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر، بیانگر تلاش برای ایفای نقش فعال‌تر در عرصه دیپلماسی اقلیمی جهانی است. با این حال، موفقیت این کشورها در اجرای تعهدات خود تا حد زیادی به توانایی آنها در توازن بین توسعه اقتصادی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی و الزامات زیست محیطی بین‌المللی بستگی دارد. دیپلماسی اقلیمی همچنین می‌تواند بستری برای همکاری منطقه‌ای در انتقال فناوری، تأمین مالی پروژه‌های کم‌کربن و مدیریت منابع مشترک فراهم کند.

همکاری‌های منطقه‌ای و بین‌المللی برای کاهش انتشار متان در سال‌های اخیر به یکی از اولویت‌های دیپلماسی انرژی و اقلیم در خاورمیانه تبدیل شده است. باید این همکاری‌های سازنده برای کاهش اثرات مخرب تغییر اقلیم در چهارچوب دیپلماسی‌های سازنده برای تامین امنیت انرژی و شکوفایی اقتصادی کشورها به صورت سازنده پیگیری شوند. یکی از مهم‌ترین ابتکارات جهانی در این زمینه، «پیمان جهانی متان»^۱ است که با هدف کاهش ۳۰ درصدی انتشار متان تا سال ۲۰۳۰ نسبت به سطح ۲۰۲۰، شکل گرفته و شماری از کشورهای خاورمیانه نیز به آن پیوسته‌اند یا برای عضویت اعلام آمادگی کرده‌اند. این پیمان، زمینه را برای انتقال فناوری، اشتراک‌گذاری داده‌ها و تقویت ظرفیت نظارتی فراهم می‌سازد. افزون بر آن، برخی از کشورهای منطقه در حال بررسی ایجاد کنسرسیوم‌های منطقه‌ای برای مدیریت انتشار متان، ارتقاء استانداردهای صنعتی و اجرای پروژه‌های مشترک برای بازیابی گازهای هدر رفته هستند. چنین همکاری‌هایی می‌تواند ضمن کاهش اثرات زیست محیطی، فرصت‌هایی برای توسعه اقتصادی، جذب سرمایه‌گذاری و بهبود تصویر بین‌المللی کشورهای صادرکننده انرژی فراهم آورد.

منطقه خاورمیانه با وجود چالش‌های سیاسی و رقابت‌های ژئوپلیتیکی، فرصت‌های قابل توجهی برای همکاری منطقه‌ای در حوزه پایش، فناوری و مدیریت گاز متان در اختیار دارد. اشتراک در زیرساخت‌های نفت و گاز، تشابه در چالش‌های زیست محیطی و وابستگی مشترک به صادرات انرژی، بستر مناسبی برای ایجاد چارچوب‌های همکاری فنی و اطلاعاتی میان کشورهای منطقه فراهم کرده است. استفاده از فناوری‌های ماهواره‌ای، حسگرهای پیشرفته و سامانه‌های دیجیتال برای ردیابی نشت متان، می‌تواند از طریق پروژه‌های مشترک و ایجاد شبکه‌های داده منطقه‌ای تسهیل شود. همچنین، همکاری در تدوین استانداردهای مشترک برای کاهش نشت، برگزاری کارگاه‌های فنی و ایجاد کنسرسیوم‌های تحقیقاتی، می‌تواند به ارتقای توان فنی کشورهای کمتر توسعه یافته‌تر در این زمینه کمک کند. چنین همکاری‌هایی نه تنها به کاهش انتشار متان و حفاظت از محیط زیست منجر می‌شود، بلکه اعتمادسازی و همگرایی بیشتری را در سطح منطقه‌ای ممکن می‌سازد.

۲. استفاده از داده‌های ماهواره‌ای جهت محاسبه شدت انتشار متان در صنعت نفت و گاز

منطقه مورد مطالعه

داده‌های ماهواره‌ای می‌توانند میزان انتشار متان از فعالیت‌های مختلف را بسته به میزان انتشار شناسایی و کمی‌سازی نمایند. این داده‌ها می‌توانند به‌عنوان ابزاری برای کاهش انتشار در کشورها و بررسی نقاط انتشار مورد استفاده قرار گیرند. کاهش این انتشارها در صنعت نفت و گاز، نه تنها جنبه اقتصادی و محیط زیستی دارد بلکه می‌تواند به امنیت انرژی با جلوگیری از هدررفت این گاز ارزشمند در این کشورها کمک نماید. مدت زمان میزان انتشار این نقاط در جمع‌بندی بر میزان کلی انتشار سالانه از این منابع تاثیر دارد، اما متأسفانه این داده‌ها در دسترس نمی‌باشند. پایش انتشار متان در مقیاس‌های مختلف، متکی بر سنجنده‌های ماهواره‌ای با قابلیت‌های مکمل است. سنجنده‌های پیشگامی مانند ^۱SCIAMACHY روی ENVISAT و ^۲TANSO-FTS روی GOSAT^۳ با قدرت تفکیک مکانی نسبتاً پایین (در حد کیلومتر)، برای مطالعه روندهای بلند مدت و میانگین‌های منطقه‌ای و جهانی متان ضروری هستند. در میانه این طیف، سنجنده TROPOMI^۴ روی Sentinel-5P با قدرت تفکیک متوسط (۵.۵X۷ کیلومتر) و پوشش روزانه جهانی، به‌عنوان پلی عمل می‌کند که امکان شناسایی «نقاط داغ» انتشار در نواحی وسیع را فراهم می‌سازد. اگرچه ماهواره‌های سنجنش از دوری مانند Landsat و Sentinel-2 که برای تصویربرداری زمینی طراحی شده‌اند، قابلیت ردیابی مستقیم گاز متان در اتمسفر را ندارند، اما داده‌های آنها نقش مکمل حیاتی ایفا می‌کنند. این ماهواره‌ها با قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا (۱۰ تا ۳۰ متر) امکان شناسایی فیزیکی و مکان‌یابی دقیق تأسیسات، تجهیزات و زیرساخت‌های مرتبط با انتشار متان (مانند محل چاه‌های نفت، خطوط لوله، ایستگاه‌های تقویت فشار و سطوح فلرینگ) را فراهم می‌کنند و به زمینه‌یابی و تحلیل علل مکانی نقاط داغ شناسایی شده توسط سنجنده‌های گازی کمک شایانی می‌نمایند. در نهایت، سنجنده‌های نسل جدید با قدرت تفکیک بسیار بالا، مانند ماهواره‌های تجاری GHGSat و سنجنده‌های هایپرسپکترال EMIT^۵، PRISMA و EnMAP^۶ (با دقت در حد متر)، انقلابی در شناسایی و کمی‌سازی دقیق نشت‌های نقطه‌ای از تأسیسات خاص ایجاد کرده‌اند. راهبرد

1 - Scanning Imaging Absorption spectrometer for Atmospheric Chartography

2 - Thermal And Near Infrared Sensor for carbon Observations - Fourier Transform Spectrometer

3 - Greenhouse Gases Observing Satellite

4 - Tropospheric Monitoring Instrument

5 - Earth Surface Mineral Dust Source Investigation

6 - Environmental Mapping and Analysis Program

کارآمد، ترکیب داده‌های این پلتفرم‌ها است؛ به طوری که از TROPOMI برای شناسایی اولیه نقاط داغ، از Landsat و Sentinel-2 برای زمینه‌یابی و شناسایی منبع فیزیکی و از سنجنده‌های با قدرت تفکیک بسیار بالا برای تأیید، رصد دقیق و کمی‌سازی منبع نشت استفاده می‌شود.

برنامه محیط سازمان ملل متحد، با ایجاد سامانه پیشرو و عملیاتی برای کاهش انتشار گاز متان از طریق داده‌های ماهواره‌ای تحت عنوان «سیستم هشدار و واکنش متان»^۱ (MARS, 2025) از طریق «رصدخانه بین‌المللی متان»^۲ به دست آمده (IMEO, 2025)، داده‌های ماهواره‌ای به روز و مفیدی از سنجنده‌های مختلفی را برای استفاده جهت کاهش انتشار در اختیار قرار می‌دهد. در این مطالعه ابتدا نقاط انتشار متان حاصل از تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از روش خوشه‌بندی فضایی^۳ مبتنی بر چگالی برای کاربردهایی که با داده‌های نویزی سر و کار دارند، استفاده شده است. برای خوشه‌بندی شعاع ۱۰۰ متر ترکیب شدند تا نقاط نزدیک به هم به‌عنوان یک منبع واحد در نظر گرفته شوند (Maazallahi et al., 2025b). برای هر خوشه، میانگین نرخ شار متان (کیلوگرم بر ساعت) به‌عنوان نرخ انتشار در نظر گرفته شد و عدم قطعیت با جمع انحراف معیار نرخ‌های اعضای خوشه محاسبه گردید (جدول مکمل ۱). سپس بر اساس تعداد دفعات مشاهده، مدت زمان فعالیت سالانه تعیین شد: اگر تنها یک بار مشاهده شده باشد ۲۴ تا ۷۲۰ ساعت در سال و اگر بیش از یک بار مشاهده شده باشد ۲۹۲۰ تا ۸۷۶۰ ساعت در سال فرض شد. با ضرب نرخ میانگین در بازه ساعات، میزان انتشار سالانه متان (کیلو تن در سال) به دست آمد. این مقادیر با استفاده از ارزش حرارتی متان (۵/۵۵ مگاژول بر کیلوگرم) به انرژی از دست رفته تبدیل شدند (۱ کیلوگرم متان $\approx 1.54 \times 10^{-8}$ تراوات ساعت). در ادامه داده‌های تولید نفت و گاز سال ۲۰۲۳ استخراج شد: برای نفت داده‌های EIA (EIA, 2023) بر حسب هزار بشکه در روز به میلیون بشکه در روز تبدیل و سپس با فاکتور انرژی (۱ Mb/d ≈ 620 تراوات ساعت) در سال محاسبه شد. برای گاز، تولید بر حسب bcf^۴ به bcm^۵ و سپس به تراوات ساعت (۱ bcm ≈ 10.55 TWh) تبدیل گردید. نهایتاً مجموع انرژی تولیدی نفت و گاز با انرژی از دست رفته متان مقایسه و نسبت اتلاف انرژی متان به تولید کل انرژی (درصد) برای هر کشور محاسبه شد.

1 - Methane Alert and Response System (MARS)

2 - International Methane Emission Observatory (IMEO)

3 - Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN)

4 - Billion cubic feet

5 - Billion cubic meter

6 - TeraWatt-hours

شدت انتشار متان به نسبت میزان متان منتشر شده به حجم تولید نفت و گاز یک کشور اشاره دارد و شاخصی کلیدی برای ارزیابی کارایی زیست محیطی صنعت انرژی محسوب می‌شود (Hmiel et al., 2023: 1; Cardoso-Saldaña & Allen, 2020: 2). این شاخص معمولاً به صورت میزان انتشار متان به ازای تولید هر واحد انرژی در صنعت نفت و گاز و یا به صورت درصد متان انتشار یافته به ازای هر واحد تولید گاز بیان می‌شود که بیانگر کارآمدی تولید نفت و گاز است. هرچه شدت انتشار پایین‌تر باشد، نشان‌دهنده عملکرد بهتر در کنترل نشت‌ها، استفاده از فناوری‌های پیشرفته و نظارت دقیق‌تر بر عملیات نفت و گاز است. بالا بودن کیفیت زیرساخت‌ها، بهینه بودن فناوری‌های به کار گرفته شده و متناسب بودن میزان نظارت دقیق در برخی کشورها، بر کاهش میزان شدت انتشار تاثیر مثبت دارد (Von Fischer et al., 2017: 4091; Gallagher et al., 2015: 1; Hendrick et al., 2016: 711). سهم انتشار متان در تمامی شبکه گازرسانی قابل شناسایی است، از جمله شبکه انتقال (محمدی خورسند و همکاران، ۱۳۹۹) و شبکه گاز شهری، همچنین سهم انتشار متان به کل انتشار از تجهیزات مختلف شبکه گازرسانی متفاوت می‌باشد (مسعودی آشتیانی و همکاران، ۱۳۹۱). همچنین، در برخی موارد، سوزاندن گازهای همراه نفت (فلرینگ) یا رهاسازی مستقیم گازها به دلایل اقتصادی و فنی، به افزایش انتشار متان منجر می‌شود (Allen et al., 2016: 119). وجود قوانین زیست محیطی و نظارت‌های لازم نیز دلیل دیگری بر تفاوت در شدت میزان انتشار متان در مناطق مختلف است (MacKay et al., 2021: 1). روسیه، ایران، عراق، آمریکا و ونزوئلا پنج کشور اول در زمینه فلرینگ در رتبه‌بندی جهانی قرار دارند (World Bank, 2025).

شدت انتشار در یک منطقه از کشور می‌تواند از میزان شدت انتشار کل تولیدی نفت و گاز آن کشور متفاوت باشد. برای مثال شدت انتشار از حوضه نفتی باکن^۱ و پرمین^۲ به میزان ۸.۸٪ و ۶.۳٪ گزارش شده، در صورتی که میانگین شدت انتشار متان از فعالیت‌های نفت و گاز آمریکا به میزان ۳.۷٪ در سال ۲۰۱۰ و ۲.۵٪ در سال ۲۰۱۹ گزارش شده است (Lu et al., 2023: 1).

پیرو مطالعات انجام شده و طرح‌های برنامه‌ریزی شده برای کاهش اثرات زیست محیطی و افزایش بهره‌وری اقتصادی تولید نفت و گاز، کشورهای تولیدکننده این محصول و عضو پیمان‌های مرتبط ملزم

1 - Bakken

2 - Permian

به کاهش میزان شدت انتشار گاز متان از تولید نفت و گاز خود به زیر ۰.۲٪ تا پایان سال ۲۰۳۰ شده‌اند (OGCI, 2025; IEA, 2025).

۳. انتشار متان از بخش انرژی در غرب آسیا و شمال آفریقا

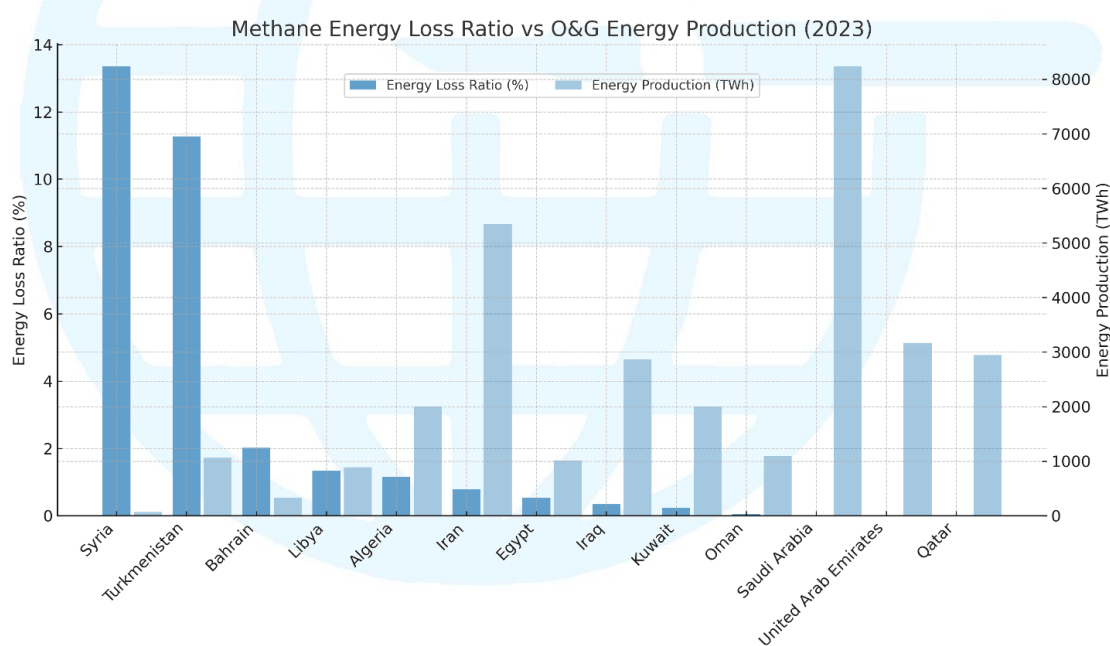
منطقه غرب آسیا دارای منابع عظیم نفت و گاز می‌باشد و تولید نفت و گاز در این منطقه به ترتیب ۳۱٪ و ۱۶٪ تولید جهانی را در سال ۲۰۱۹ شامل شده است (IEA, 2021). بخش نفت و گاز در این منطقه با سهم ۶۰٪ از انتشار متان از فعالیت‌های انسانی (Saunois et al., 2025: 1919)، مهم‌ترین منبع انتشار گاز متان با منشا انسانی در منطقه است. با این وجود مطالعات میزان انتشار در این منطقه محدود است و نیاز به بررسی‌های بیشتر دارد (Germain-Piaulenne et al., 2024: 1). با توجه به سهم بالای خاورمیانه در تولید جهانی سوخت‌های فسیلی، کنترل انتشار متان از این بخش نه تنها برای کاهش اثرات تغییر اقلیم اهمیت دارد، بلکه می‌تواند گامی اساسی در بهره‌وری انرژی و کاهش هدررفت منابع گران‌بها در این منطقه باشد. میزان انتشار گاز متان را می‌توان با استفاده از دستگاه‌های شناسایی و روش‌های کمی‌سازی متفاوت در سطح زمین، هوایی و ماهواره‌ای به صورت ایستا و سیار پیاده‌سازی نمود (Delre et al., 2022; Fiehn et al., 2020; Maazallahi et al., 2025a; Stavropoulou et al., 2016; Fernandez et al., 2023; Pandey et al., 2023). خاورمیانه با انتشار $15.8 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$ به میزان ۲۴٪ در انتشار متان از صنعت نفت و گاز جهانی را شامل می‌شود که بیشترین میزان منطقه‌ای از صنعت نفت و گاز در سطح جهان است (Saunois et al., 2025: 1919). در حالی که بسیاری از این کشورها به واسطه درآمدهای نفتی قدرت اقتصادی یافته‌اند، وابستگی شدید به سوخت‌های فسیلی هم آنها را در برابر فشارهای بین‌المللی برای کاهش انتشار آلاینده‌ها آسیب‌پذیر کرده و هم محیط زیست منطقه را در معرض تهدیدهای جدی قرار داده است. اتحادیه اروپا با تصویب قوانین انتشار متان برای واردات نفت و گاز به این قاره، مقرر کرده که برای واردات سوخت‌های فسیلی کشورهای صادرکننده نیازمند رسیدن به استانداردهای تولید و در صورت نیاز کاهش شدت انتشار متان هستند (EU, 2024). این قوانین کشورهای صادرکننده نفت و گاز را برای ارائه مستندات مربوطه برای تولید نفت و گاز با انتشار حداقلی گاز متان را ملزم می‌سازد.

۳-۱- شدت انتشار متان در صنعت نفت و گاز: مقایسه منطقه‌ای با استفاده از داده‌های

گزارش شده ماهواره‌ای

در تصویر ۳ میزان درصد هدررفت انرژی برای هر کشور و میزان انرژی تولیدی از استخراج نفت و گاز برای هر کشور به نمایش گذاشته است. لازم به ذکر است که میزان انتشار برای هر کشور بر اساس داده‌های ماهواره است و این میزان شامل انتشارهای کوچک‌تر و غیر قابل شناسایی از طریق ماهواره نمی‌شود. در این تحلیل سوریه و ترکمنستان با هدررفت ۱۳٪ و ۱۱٪ بیشترین هدررفت انرژی از انتشار گاز متان در فعالیت‌های نفتی را شامل می‌باشند. میزان انرژی تولیدی از طریق استخراج نفت و گاز به همراه داده‌های مربوطه به هدررفت انرژی از طریق انتشار متان در بخش اطلاعات مکمل این مقاله در تصویر مکمل ۱ و ۲ و جدول مکمل ۱ آماده است.

تصویر ۳- میزان انرژی هدر رفته به دلیل انتشار متان شناسایی شده با داده‌های ماهواره از انتشارهای بزرگ نسبت به میزان انرژی تولید شده از نفت و گاز در کشورهای غرب آسیا و شمال آفریقا

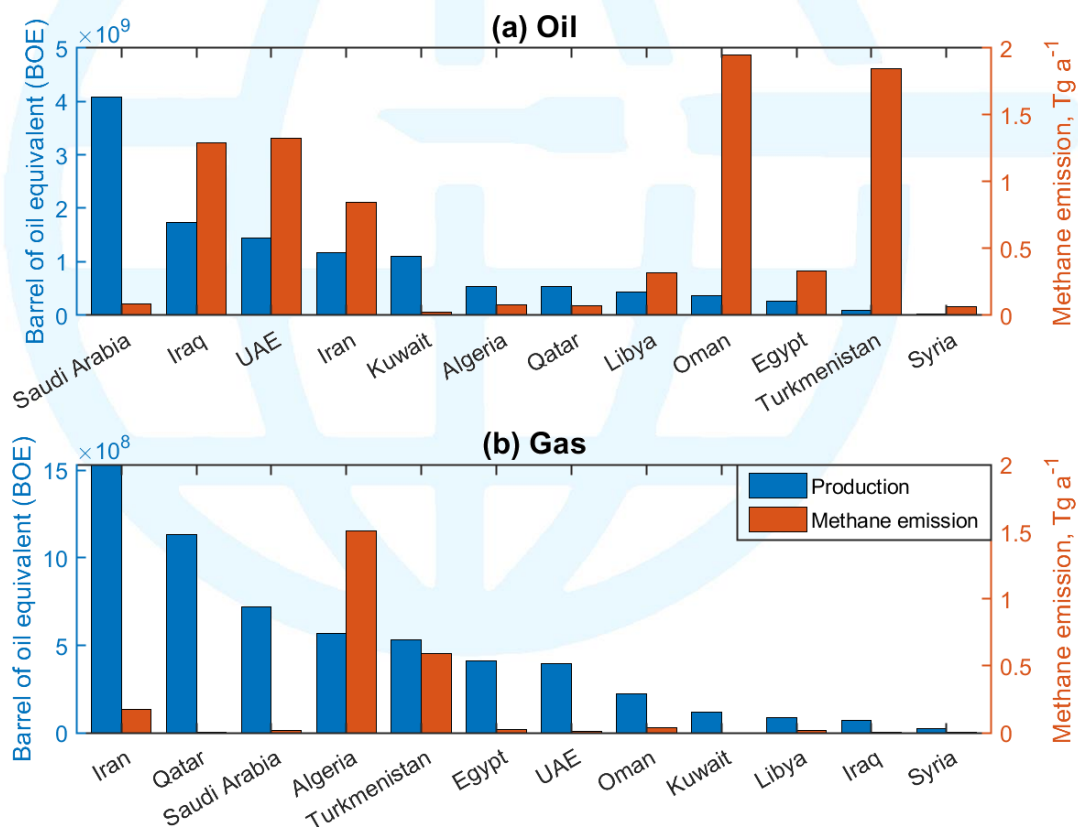


۳-۲- داده‌های منتشر شده درباره شدت انتشار متان در کشورهای منطقه غرب آسیا و

شمال آفریقا

گاز متان منتشر شده از فعالیت‌های نفت و گاز در کشورهای مختلف در هر کدام از این صنایع تفاوت چشمگیری دارد. این تفاوت در منطقه غرب آسیا در صنعت نفت به میزان حداکثری ۲ تراگرم در سال در کشور عمان و با تفاوتی اندک در همین حدود در کشور ترکمنستان گزارش شده است. اما در صنعت گاز این میزان در بین کشورهای غرب آسیا و شمال آفریقا به میزان ۱.۵ تراگرم در سال در کشور الجزیره و حدود ۰.۵ تراگرم در سال در کشور ترکمنستان گزارش شده است. این در حالی است که در سال ۲۰۲۰، بیشترین تولید نفت در کشور عربستان سعودی و بیشترین میزان گاز در کشور ایران گزارش شده است (تصویر ۴).

تصویر ۴- میزان انتشار گاز متان و تولید نفت و گاز در کشورهای غرب آسیا و شمال آفریقا



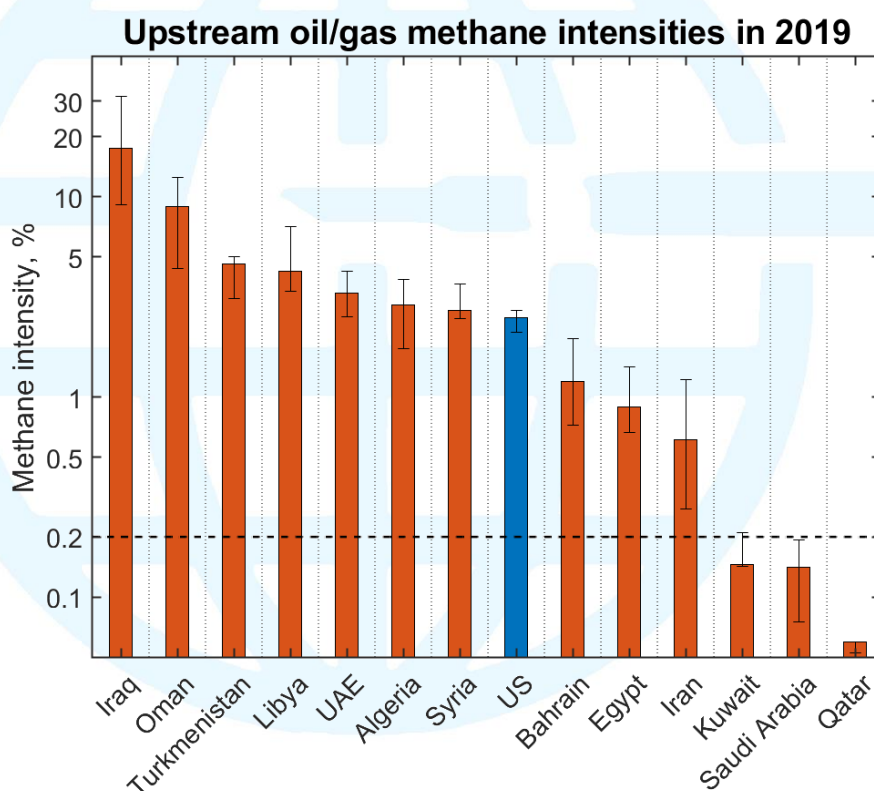
(Chen et al., 2023: 5960)

میزان شدت انتشار گاز متان از فعالیت‌های مربوط به استخراج نفت و گاز در تصویر ۴ نشان می‌دهد که هدررفت این گاز در کشورهای مختلف در چه مقیاس می‌باشد. تصویر ۴ نشان می‌دهد که بیشترین شدت با میزان حدود $12 \pm 19\%$ در کشور عراق و سه کشور قطر، عربستان سعودی و کویت دارای

شدت زیر ۰.۲٪ می‌باشند (Chen et al., 2023: 5962). همان گونه که بیان شد، شدت انتشار گاز متان در کشورهای متان نشان‌دهنده تأثیرات محیط زیست پرداختن به استخراج و استفاده از نفت و گاز در کشورهای مختلف است. کشورهای ایران در غرب آسیا و مصر در شمال آفریقا به ترتیب با شدت حدود $0.5 \pm 0.6\%$ و $0.3 \pm 1\%$ در رده های چهارم و پنجم بزرگی شدت انتشار گاز متان در این دو صنعت قرار می‌گیرند. این میزان شدت انتشار بیان شده در این مقاله با میزان و رتبه‌بندی کشورها در تصویر ۴ متفاوت می‌باشد که می‌تواند به دلیل تفاوت در میزان ثبت شده در میزان انتشار و/یا تعریف شدت انتشار متان باشد.

تصویر ۳- میزان شدت انتشار گاز متان و تولید نفت و گاز در کشورهای غرب آسیا و شمال آفریقا و

ایالات متحده



(Chen et al., 2023: 5962)

۳-۳- عوامل مؤثر بر تفاوت‌ها: فناوری، نظارت، نشت تجهیزات، سیاست‌های محیط

زیستی

شدت انتشار متان در کشورهای مختلف تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل فنی، مدیریتی و سیاست‌گذاری قرار دارد (Maazallahi et al., 2020: 14735; Magazzino et al., 2024: 10). یکی از مهم‌ترین این

عوامل، سطح فناوری مورد استفاده در استخراج، انتقال و ذخیره‌سازی نفت و گاز است؛ کشورهایی از تجهیزات نوین و سیستم‌های کنترلی پیشرفته بهره می‌برند، می‌توانند انتشار متان را در زنجیره تامین سوخت‌های فسیلی کاهش دهند (Deng et al., 2024: 12). عامل دیگر، میزان نظارت و پایش مستمر بر فعالیت‌های صنعت انرژی است؛ نبود داده‌های دقیق، شفاف و در دسترس عموم و نظارت ضعیف، امکان شناسایی و کنترل نشت‌ها و بررسی میزان اثرگذاری سیاست‌گذاری‌ها را کاهش می‌دهد (Olczak, 2023: 520). کیفیت و نگهداری تجهیزات نیز نقش مهمی دارد، به‌ویژه در کشورهایی با زیرساخت‌های فرسوده که نشت از اتصالات و خطوط لوله رایج‌تر است. در نهایت، سیاست‌های محیط زیستی و الزامات قانونی برای کاهش آلاینده‌ها می‌توانند تفاوت‌های چشم‌گیری در عملکرد کشورها ایجاد کنند؛ با این وجود سیاست‌گذاری و نحوه اجرا و نظارت آن نیز بر اثرگذاری میزان کاهش در سایه سیاست‌ها تاثیر دارد (Ibid: 522). این عوامل به طور ترکیبی موجب می‌شوند شدت انتشار متان بین کشورهای منطقه به طور قابل توجهی متفاوت باشد.

جمع‌بندی و پیشنهادات

بررسی آماری داده‌های جمع‌آوری شده در این مطالعه به وضوح نشان می‌دهد که شدت انتشار متان در صنعت نفت و گاز کشورهای منطقه از اختلاف چشمگیری برخوردار است، که این امر لزوم توجه فوری به نظام‌های پایش و اندازه‌گیری را بیش از پیش آشکار می‌سازد. مرور مطالعات اقلیمی به روشنی ثابت می‌کند که منطقه غرب آسیا و شمال آفریقا با شتابی بیش از میانگین جهانی، در حال تجربه پیامدهای سخت تغییرات اقلیمی از جمله کاهش بارندگی، بیابان‌زایی، تنش آبی و تخریب سیستم‌های کشاورزی است. این شرایط آسیب‌پذیری منطقه را تشدید کرده و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را به یک ضرورت راهبردی تبدیل کرده است.

در این میان، کاهش انتشار متان به دلیل عمر کوتاه‌تر آن در اتمسفر و امکان‌پذیری فنی بالای مهار آن از صنایع نفت و گاز، یک فرصت طلایی و کم هزینه برای کاستن از سرعت گرمایش جهانی محسوب می‌شود. با این حال، تحقق این فرصت در گروی تدوین راهبردهای کاهشی و هدف‌گذاری مؤثر است که خود کاملاً وابسته به وجود داده‌های دقیق، شفاف، مستمر و قابل اتکا برای پایش مستمر انتشار متان می‌باشد. امروزه ترکیب داده‌های ماهواره‌ای با اندازه‌گیری‌های زمینی به تنها راهکار قابل اعتماد برای درک صحیح از وضعیت انتشار، شناسایی نقاط بحرانی و اتخاذ تصمیم‌های آگاهانه تبدیل شده است.

بدون این زیرساخت داده‌ای جامع، تلاش‌ها برای کنترل انتشار این گاز گلخانه‌ای قدرتمند و تحقق تعهدات جهانی در راستای محدودسازی گرمایش زمین با چالش جدی مواجه خواهد شد. عدم وجود این داده‌ها، در عین حال، یک فرصت استثنایی برای همکاری منطقه‌ای به وجود می‌آورد. از طریق ایجاد مراکز مشترک پایش، تبادل تجربیات و فناوری و تدوین استانداردهای هماهنگ، کشورهای منطقه می‌توانند این چالش مشترک را به فرصتی برای اعتمادسازی، تقویت امنیت انرژی جمعی و تثبیت جایگاه خود در دیپلماسی بین‌المللی اقلیم تبدیل نمایند. بنابراین، سرمایه‌گذاری در ایجاد یک نظام پایش یکپارچه و شفاف، نه تنها اولین گام، بلکه کلید گذار به سمت آینده‌ای پایدار با امنیت انرژی بالاتر و همکاری‌های منطقه‌ای تقویت شده در غرب آسیا و شمال آفریقا است.

قدردانی

این مطالعه با حمایت مادی برنامه کانکت معاونت علمی، فناوری و اقتصاد دانش‌بنیان ریاست جمهوری ایران در دانشگاه تهران انجام گرفته است. از حمایت معنوی سرکار خانم الهام پیشداد، مدیر محترم گروه مطالعات تغییر اقلیم در خاورمیانه، سپاسگزار هستیم. از دو داور گرانقدر که به صورت ناشناس این مقاله را داوری و حمایت علمی نمودند و نقطه نظرات مثبتی را در جهت ارتقا مقاله ارائه نمودند کمال تشکر را داریم.

فهرست منابع

منابع فارسی

- ۱- مسعودی آشتیانی، ا. م.؛ یوسف‌زادگان، م. م.؛ سیف، س. ش. و نیکنام، م. (۱۳۹۱). اندازه‌گیری انتشار گاز گلخانه‌ای متان از شبکه گازرسانی استان خراسان رضوی. اولین همایش بین‌المللی بحران‌های زیست محیطی ایران و راهکارهای بهبود آن. <https://elmnet.ir/doc/20233605-99791>.
- ۲- کلائی، ف. و سام‌خانیانی، ع. (۱۴۰۴). پایش غلظت آلاینده متان در استان‌های صنعتی ایران بر اساس مشاهدات ماهواره‌ای. نشریه علوم و فناوری‌های فضایی. **Doi:10.22034/jsst.2025.1564**
- ۳- جباری، س. م.؛ خاتمی، س. م. س. و افشون، ح. ر. (۱۳۹۹). مروری بر روش‌های نوین برآورد موجودی انتشار متان در شبکه توزیع گاز طبیعی. نشریه مهندسی گاز/ایران، ۷(۱۱).
- ۴- حکاک‌زاده، م. ر. و طالبی، ف. (۱۴۰۱). تاثیر گاز متان بر محیط زیست بین‌الملل و ایران با محوریت نقش شرکت ملی گاز ایران. مجله مطالعات علوم سیاسی، حقوق و فقه، ۲(۱)، ۱۴۸-۱۷۳.

۵- محمدی خورسند، ز.؛ شجاعیان، ا.؛ بهرامیان، ع.؛ پیرزادی جهرمی، م. ر.، و علیزاده، م. (۱۳۹۹). اندازه‌گیری تجربی و پیش‌بینی ضرایب انتشار گاز متان: مطالعه موردی منطقه هفت عملیات انتقال گاز، *مجله علمی-پژوهشی پژوهش نفت*. **Dor:20.1001.1.23452900.1399.30.996.5.6**

۶- عصارای آرانی، ع.، و رستمی، س. (۱۴۰۱). تاثیر امنیت انرژی بر رشد اقتصادی. *پژوهشنامه اقتصادی*، ۲۲ (۸۴)، ۱۳۹-۱۶۹. **Doi:10.22054/joer.2022.67463.1057**

منابع غیر فارسی

- 1- Afshoun, H. R., Jabbari, S. M., Jalaei Salmani, H. (2022). A regional study of the fugitive methane emissions from the gas distribution system in Iran by direct measurement. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 105 (2022) 104716. **Doi:10.1016/j.jngse.2022.104716**.
- 2- Ahmadalipour, A., Moradkhani, H. (2018). Escalating heat-stress mortality risk due to global warming in the Middle East and North Africa (MENA). *Journal of Environment International*. Volume 117, August 2018, Pages 215-225. **Doi:10.1016/j.envint.2018.05.014**.
- 3- Allen, D. T., Smith, D., Torres, V. M., and Cardoso-Saldaña, F., (2016), Carbon dioxide, methane and black carbon emissions from upstream oil and gas flaring in the United States, *Current Opinion in Chemical Engineering*, Volume 13, Pages 119-123, ISSN 2211-3398, **Doi:10.1016/j.coche.2016.08.014**.
- 4- Almulhim, A.I., Alverio, G.N., Sharifi, A., Rajib, S., Saleemul, H., Md Juel, M., Shakil, A., Ismaila Rimi, A., (2024). Climate-induced migration in the Global South: an in-depth analysis. *npj Clim. Action* 3, 47. **Doi:10.1038/s44168-024-00133-1**.
- 5- An, N., Demiralay, Z., Ucal, M., Kurnaz, M., L. (2025). The nexus between migration and environmental degradation based on fundamental climate variables and extreme climate indices for the MENA domain, *Climate Services*, Volume 38, 100564, ISSN 2405-8807, **Doi:10.1016/j.cliser.2025.100564**.
- 6- Cardoso-Saldaña, F. J., and Allen, D. T., (2020), Projecting the Temporal Evolution of Methane Emissions from Oil and Gas Production Sites, *Environ. Sci. Technol.* 2020, 54, 22, 14172–14181. **Doi:10.1021/acs.est.0c03049**.
- 7- Chen, Z., Jacob, D. J., Gautam, R., Omara, M., Stavins, R. N., Stowe, R. C., Nesser, H., Sulprizio, M. P., Lorente, A., Varon, D. J., Lu, X., Shen, L., Qu, Z., Pendergrass, D. C., and Hancock, S. (2023). Satellite quantification of methane emissions and oil–gas methane intensities from individual countries in the Middle East and North Africa: implications for climate action, *Atmos. Chem. Phys.*, 23, 5945–5967. **Doi:10.5194/acp-23-5945-2023**.
- 8- Delre, A., Hensen, A., Velzeboer, I., Van den Bulk, P., Essonanawe Edjabou, M., Scheutz, C. (2022) Methane and ethane emission quantifications from onshore oil and gas sites in Romania, using a tracer gas dispersion method. *Elementa: Science of the Anthropocene*; 10 (1): 000111. **Doi:10.1525/elementa.2021.000111**.
- 9- Elkhalfi, O., Chaabita, R., Ghoujdami, M., Zehraoui, K., EL Alaoui, H., Belhaj, I. (2025). The impact of climate change on food security in the Middle East and North Africa: Challenges and adaptation strategies, *Journal of Agriculture and Food Research*, Volume 21, 101963, ISSN 2666-1543. **Doi:10.1016/j.jafr.2025.101963**.
- 10- Fernandez, J. M., Maazallahi, H., France, J. L., Menoud, M., Corbu, M., Ardelean, M., Calcan, A., Townsend-Small, A., van der Veen, C., Fisher, R. E., Lowry, D., Nisbet, E. G., Röckmann, T. (2023). Street-level methane emissions of Bucharest, Romania and the

- dominance of urban wastewater., *Atmospheric Environment: X*, Volume 13, 100153, ISSN 2590-1621. **Doi:10.1016/j.aeaoa.2022.100153.**
- 11- Fiehn, A., Kostinek, J., Eckl, M., Klausner, T., Gałkowski, M., Chen, J., Gerbig, C., Röckmann, T., Maazallahi, H., Schmidt, M., Korbeń, P., Nečki, J., Jagoda, P., Wildmann, N., Mallaun, C., Bun, R., Nickl, A.-L., Jöckel, P., Fix, A., and Roiger, A. (2020): Estimating CH₄, CO₂ and CO emissions from coal mining and industrial activities in the Upper Silesian Coal Basin using an aircraft-based mass balance approach, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 12675–12695. **Doi:10.5194/acp-20-12675-2020.**
 - 12- Forster, P., T. Storelvmo, K. Armour, W. Collins, J.-L. Dufresne, D. Frame, D.J. Lunt, T. Mauritsen, M.D. Palmer, M. Watanabe, M. Wild, and H. Zhang, (2021): The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 923–1054. **Doi:10.1017/9781009157896.009.**
 - 13- Gallagher, M. E., Down, A., Ackley, R. C., Zhao, K., Phillips, N., and Jackson, R. B. (2015), Natural Gas Pipeline Replacement Programs Reduce Methane Leaks and Improve Consumer Safety, *Environ. Sci. Technol. Lett.*, 2, 286–291. **Doi:10.1021/acs.estlett.5b00213.**
 - 14- Germain-Piaulenne, E., Paris, J. D., Gros, V., Quéhé, P. Y., Pikridas, M., Baisnée, D., Berchet, Jean Sciare, A., Bourtsoukidis, E. (2024): Middle East oil and gas methane emissions signature captured at a remote site using light hydrocarbon tracers, *Atmospheric Environment: X*, Volume 22, 100253, ISSN 2590-1621. **Doi:10.1016/j.aeaoa.2024.100253.**
 - 15- Hendrick, M. F., Ackley, R., Sanaie-Movahed, B., Tang, X., and Phillips, N. G. (2016), Fugitive methane emissions from leak-prone natural gas distribution infrastructure in urban environments, *Environ. Pollut.*, 213, 710–716. **Doi:10.1016/j.envpol.2016.01.094.**
 - 16- Hmiel, B., Lyon, D. R., Warren, J. D., Yu, J., Cusworth, D. H., Duren R. M., and Hamburg, S. P., (2023), *Environ. Res. Lett.* 18 024029. **Doi:10.1088/1748-9326/acb27e.**
 - 17- Hussein Mohammed Qasem, R., Scholz, M. (2025). Climate change impact on resources in the MENA region: a systematic and critical review, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Volume 139, 103936, ISSN 1474-7065. **Doi:10.1016/j.pce.2025.103936.**
 - 18- Khosravi, M., Mojtabaeian, S. M., Sarvestani, M. A. (2024). A Systematic Review on the Outcomes of Climate Change in the Middle-Eastern Countries: The Catastrophes of Yemen and Syria. *Environmental Health Insights*.18. **Doi:10.1177/11786302241302270.**
 - 19- Korbeń, P., Jagoda, P., Maazallahi, H., Kammerer, J., Nečki, J. M., Wietzel, J. B., Bartyzel, J., Radovici, A., Zavala-Araiza, D., Röckmann, T., Schmidt, M. (2022) Quantification of methane emission rate from oil and gas wells in Romania using ground-based measurement techniques. *Elementa: Science of the Anthropocene*; 10 (1): 00070. **Doi:10.1525/elementa.2022.00070.**
 - 20- Lelieveld, J., Hadjinicolaou, P., Kostopoulou, E., Chenoweth, J., El Maayar, M., Giannakopoulos, C., Hannides, C., Lange, M. A., Tanarhte, M., Tyrllis, E., Xoplaki, E. (2012), Climate change and impacts in the Eastern Mediterranean and the Middle East. *Climatic Change* 114, 667–687. **Doi:10.1007/s10584-012-0418-4.**
 - 21- Lu, X., Jacob, D. J., Zhang, Y., Shen, L., Sulprizio, M. P., Maasakkers, J. D., Varon, D. J., Qu, Z., Chen, Z., Hmiel, B., Parker, R. J., Boesch, H., Wang, H., He, C., & Fan, S. (2023), Observation-derived 2010-2019 trends in methane emissions and intensities from US oil and

- gas fields tied to activity metrics, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 120 (17) e2217900120. **Doi:10.1073/pnas.2217900120.**
- 22- Maazallahi, H., Fernandez, J. M., Menoud, M., Zavala-Araiza, D., Weller, Z. D., Schwietzke, S., von Fischer, J. C., Denier van der Gon, H., and Röckmann, T. (2020). Methane mapping, emission quantification, and attribution in two European cities: Utrecht (NL) and Hamburg (DE), *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 14717–14740. **Doi:10.5194/acp-20-14717-2020.**
 - 23- Maazallahi, H., Stavropoulou, F., Sutanto, S. J., Steiner, M., Brunner, D., Mertens, M., Jöckel, P., Visschedijk, A., Denier van der Gon, H., Dellaert, S., Velandia Salinas, N., Schwietzke, S., Zavala-Araiza, D., Ghemulet, S., Pana, A., Ardelean, M., Corbu, M., Calcan, A., Conley, S. A., Smith, M. L., and Röckmann, T. (2025): Airborne in situ quantification of methane emissions from oil and gas production in Romania, *Atmos. Chem. Phys.*, 25, 1497–1511. **Doi:10.5194/acp-25-1497-2025.**
 - 24- Maazallahi, H., Pourfayaz, F., Irakulis-Loitxate, I., and Avishan, M (2025): Satellite-based Detection and Quantification of Methane Emissions from Energy and Waste Sectors in Iran, EGU General Assembly 2025, Vienna, Austria, 27 Apr–2 May, EGU25-18300, **Doi:10.5194/egusphere-egu25-18300.**
 - 25- MacKay, K., Lavoie, M., Bourlon, E., Atherton, E., O’Connell, E., Baillie, J., Fougère, C., Risk, D., (2021), *Sci Rep* 11, 8041. **Doi:10.1038/s41598-021-87610-3.**
 - 26- Magazzino, C., Madaleno, M., Waqas, M., Leogrande, A. (2024), Exploring the determinants of methane emissions from a worldwide perspective using panel data and machine learning analyses, *Environmental Pollution*, Volume 348, 123807, ISSN 0269-7491. **Doi:10.1016/j.envpol.2024.123807.**
 - 27- Malik, A., Stenchikov, G., Mostamandi, S., Parajuli, S., Lelieveld, J., Zittis, G., Sheraz Ahsan, M., Atique, L., Usman, M., (2024). Accelerated Historical and Future Warming in the Middle East and North Africa. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129, e2024JD041625. **Doi:10.1029/2024JD041625.**
 - 28- Naderi Beni, A., Marriner, N., Sharifi, A., Azizpour, J., Kabiri, K., Djamali, M., Kirman, A. (2021): Climate change: A driver of future conflicts in the Persian Gulf Region?, *Heliyon*, Volume 7, Issue 2, e06288, ISSN 2405-8440. **Doi:10.1016/j.heliyon.2021.e06288.**
 - 29- Pandey, S., Houweling, S., Krol, M., Aben, I., Chevallier, F., Dlugokencky, E. J., Gatti, L. V., Gloor, E., Miller, J. B., Detmers, R., Machida, T., and Röckmann, T. (2016): Inverse modeling of GOSAT-retrieved ratios of total column CH₄ and CO₂ for 2009 and 2010, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 5043–5062. **Doi:10.5194/acp-16-5043-2016.**
 - 30- Paris Agreement: Participants, Secretary-General of the United Nations, (2015), [Online], Available from:
https://treaties.un.org/Pages/showDetails.aspx?objid=08000000280458f37&clang=_en, Last Access: 5 August 2025.
 - 31- Prather, M. J., Holmes, C. D., and Hsu, J. (2012): Reactive greenhouse gas scenarios: Systematic exploration of uncertainties and the role of atmospheric chemistry, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L09803. **Doi:10.1029/2012GL051440.**
 - 32- Romanello, M., Napoli, C. di., Green, C., Kennard, H., Lampard, P., Scamman, D., Walawender, M., Ali, Z., Ameli, N., Ayeb-Karlsson, S., Beggs, P. J., Belesova, K., Berrang Ford, L., Bowen, K., Cai, W., Callaghan, M., Campbell-Lendrum, D., Chambers, J., Cross, T. J., van Daalen, K. R., Dalin, C., Dasandi, N., Dasgupta, S., Davies, M., Dominguez-Salas, P., Dubrow, R., Ebi, K. L., Eckelman, M., Ekins, P., Freyberg, C., Gasparyan, O., Gordon-Strachan, G., Graham, H., Gunther, S. H., Hamilton, I., Hang, Y., Hänninen, R., Hartinger, S., He, K., Heidecke, J., Hess, J. J., Hsu, S. C., Jamart, L., Jankin, S., Jay, O., Kelman, I., Kieseewetter, G., Kinney, P., Kniveton, D., Kouznetsov, R., Larosa, F., Lee, J. K.W., Lemke,

- B., Liu, Y., Liu, Z., Lott, M., Lotto Batista, M., Lowe, R., Odhiambo Sewe, M., Martinez-Urtaza, J., Maslin, M., McAllister, L., McMichael, C., Mi, Z., Milner, J., Minor, K., Minx, J. C., Mohajeri, N., Momen, N. C., Moradi-Lakeh, M., Morrissey, K., Munzert, S., Murray, K. A., Neville, T., Nilsson, M., Obradovich, N., O'Hare, M. B., Oliveira, C., Oreszczyn, T., Otto, M., Owfi, F., Pearman, O., Pega, F., Pershing, A., Rabbaniha, M., Rickman, J., Robinson, E. J.Z., Rocklöv, J., Salas, R. N., Semenza, J. C., Sherman, J. D., Shumake-Guillemot, J., Silbert, G., Sofiev, M., Springmann, M., Stowell, J. D., Tabatabaei, M., Taylor, J., Thompson, R., Tonne, C., Treskova, M., Trinanes, J. A., Wagner, F., Warnecke, L., Whitcombe, H., Winning, M., Wyns, A., Yglesias-González, M., Zhang, S., Zhang, Y., Zhu, Q., Gong, P., Montgomery, H., Costello, A. (2023). The 2023 report of the Lancet Countdown on health and climate change: the imperative for a health-centred response in a world facing irreversible harms. *The Lancet*. Volume 402, Issue 10419p2346-2394. **Doi:10.1016/S0140-6736(23)01859-7.**
- 33- Sauniois, M., Martinez, A., Poulter, B., Zhang, Z., Raymond, P. A., Regnier, P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Patra, P. K., Bousquet, P., Ciais, P., Dlugokencky, E. J., Lan, X., Allen, G. H., Bastviken, D., Beerling, D. J., Belikov, D. A., Blake, D. R., Castaldi, S., ... Zhuang, Q. (2025). Global Methane Budget 2000–2020. *Earth System Science Data*, 17(5), 1873–1958. **Doi:10.5194/ESSD-17-1873-2025**
- 34- Shahpari, G., Ashena, M., Martinez-Cruz, A.L. García León, D. (2023), Implications for the Iranian economy from climate change effects on agriculture—a static computable general equilibrium approach. *Theor Appl Climatol* 153, 1221–1235. **Doi:10.1007/s00704-023-04506-0.**
- 35- Stavropoulou, F., Vinković, K., Kers, B., de Vries, M., van Heuven, S., Korbeň, P., Schmidt, M., Wietzel, J., Jagoda, P., Necki, J. M., Bartyzel, J., Maazallahi, H., Menoud, M., van der Veen, C., Walter, S., Tuzson, B., Ravelid, J., Morales, R. P., Emmenegger, L., Brunner, D., Steiner, M., Hensen, A., Velzeboer, I., van den Bulk, P., Denier van der Gon, H., Delre, A., Edjabou, M. E., Scheutz, C., Corbu, M., Iancu, S., Moaca, D., Scarlat, A., Tudor, A., Vizireanu, I., Calcan, A., Ardelean, M., Ghemulet, S., Pana, A., Constantinescu, A., Cusa, L., Nica, A., Baci, C., Pop, C., Radovici, A., Mereuta, A., Stefanie, H., Dandocsi, A., Hermans, B., Schwietzke, S., Zavala-Araiza, D., Chen, H., and Röckmann, T. (2023): High potential for CH₄ emission mitigation from oil infrastructure in one of EU's major production regions, *Atmos. Chem. Phys.*, 23, 10399–10412, **Doi:10.5194/acp-23-10399-2023.**
- 36- von Fischer, J. C., Cooley, D., Chamberlain, S., Gaylord, A., Griebenow, C. J., Hamburg, S. P., Salo, J., Schumacher, R., Theobald, D., and Ham, J. (2017). Rapid, Vehicle-Based Identification of Location and Magnitude of Urban Natural Gas Pipeline Leaks, *Environ. Sci. Technol.*, 51, 4091–4099. **Doi:10.1021/acs.est.6b06095.**
- 37- Waha, K., Krummenauer, L., Adams, S., Aich, V., Baarsch, F., Coumou, D., Fader, M., Hoff, H., Jobbins, G., Marcus, R., Mengel, M., Otto, I., M., Perrette, M., Rocha, M., Robinson, A., Schleussner, C. F., (2017). Climate change impacts in the Middle East and Northern Africa (MENA) region and their implications for vulnerable population groups. *Reg Environ Change* 17, 1623–1638. **Doi:10.1007/s10113-017-1144-2.**
- 38- Wang, G., Yang, P., & Zhou, X. (2017). Identification of the driving forces of climate change using the longest instrumental temperature record. *Scientific Reports* 7:1, 7(1), 1–7. **Doi:10.1038/srep46091**
- 39- West, J. J., Fiore, A. M., Horowitz, L. W., & Mauzerall, D. L. (2006). Global health benefits of mitigating ozone pollution with methane emission controls, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 103 (11) 3988-3993. **Doi:10.1073/pnas.0600201103.**

- 40- Deng, W., Xie, X., Guo, Y., Hu, G. (2024). Breakthroughs in CH₄ capture technologies: Key to reducing fugitive methane emissions in the energy sector, Carbon Capture Science & Technology, Volume 13, 100316, ISSN 2772-6568. **Doi:10.1016/j.ccst.2024.100316.**
- 41- Olczak, M., Piebalgs, A., Balcombe, P. (2023). A global review of methane policies reveals that only 13% of emissions are covered with unclear effectiveness, One Earth, Volume 6, Issue 5, Pages 519-535, ISSN 2590-3322. **Doi:10.1016/j.oneear.2023.04.009.**

منابع اینترنتی

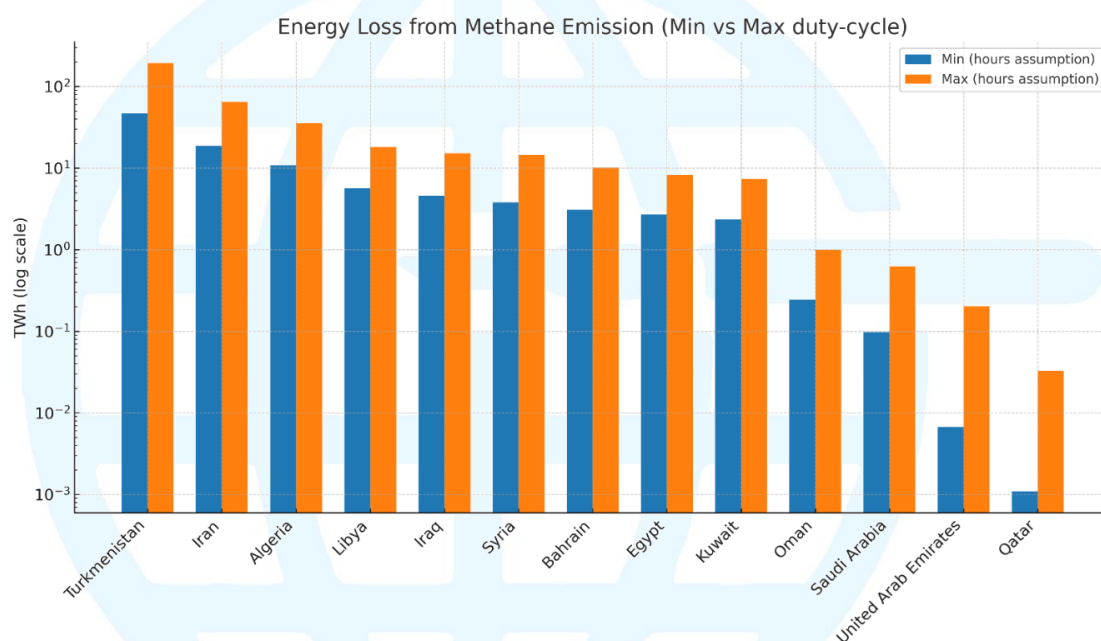
- 1- CCAC: Climate and Clean Air Coalition, United Nations Environment Programme, (2021). Global Methane Assessment: benefits and costs of mitigating methane emissions. [Online], Available from: <https://www.ccacoalition.org/content/global-methane-assessment>. Last access: 10 August 2025.
- 2- UNEP: United Nations Environment Programme (2025). Frontiers 2025: The Weight of Time – Facing a new age of challenges for people and ecosystems. Nairobi. Available from: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/48122>, Last access: 22 July 2025.
- 3- UNICEF: The impact of climate change on children in the Middle East and North Africa (2022), [online], available from: <https://www.unicef.org/mena/media/19631/file/ClimateChangeImpactOnChildren-MENA-Report-5Nov22.pdf%20.pdf>, last access: 08 July 2025.
- 4- MARS: UNEP-Methane Alert and Response System (2025). Eye on Methane Data Platform. <https://methanedata.unep.org/methane-alert-response-system>.
- 5- IMEO: UNEP-International Methane Emission Observatory (2025). Eye on Methane Data Platform. <https://methanedata.unep.org/>.
- 6- EIA: Energy Information Administration, (2023) [Online], Available from: <https://www.eia.gov/international/data/world>, last access: 21 August 2025.
- 7- World Bank: Global Gas Flaring Tracker Report (2025), [online], available from: <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/bd2432bbb0e514986f382f61b14b2608-0400072025/original/Global-Gas-Flaring-Tracker-Report-July-2025.pdf>, last access: 15 November 2025.
- 8- OGCI: Methane intensity target (2025). [Online]. Available from: <https://www.ogci.com/methane-emissions/methane-intensity-target/>, Last access: 05 August 2025.
- 9- IEA: What did COP28 mean for methane? (2025). [Online]. Available from: <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2024/what-did-cop28-mean-for-methane>, Last access: 05 August 2025.
- 10- IEA: World Energy Balances: Overview (2021), IEA, Paris, [online], Available from: <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>. Last access: 09 July 2025.
- 11- EU: Regulation (EU) 2024/1787 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 on the reduction of methane emissions in the energy sector and amending Regulation (2024), [online], available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401787&pk_campaign=todays_OJ&pk_source=EURLEX&pk_medium=X&pk_keyword=energy_sector&pk_content=Regulation&pk_cid=EURLEX_todaysOJ. Last access: 07 July 2025.

بخش اطلاعات مکمل

در تصویر مکمل ۱، میزان انتشار بسط داده شده در طول سال و شناسایی شده از طریق داده‌های ماهواره‌ای به صورت کمینه و بیشینه با در نظر گرفتن فرضیات مربوطه بیان شده در مقاله به نمایش گذاشته شده‌اند. این میزان انتشار با ضریب مربوطه به میزان تولید انرژی دریافتی از متان به واحد انرژی تبدیل شده است. در این میزان انتشار بسط داده شده، میزان انتشارهای کوچک‌تر از قابلیت شناسایی ماهواره‌ای قرار نگرفته است.

تصویر مکمل ۱- میزان حداقلی و حداکثری میزان متان هدر رفته از طریق انتشار در طول تولید نفت

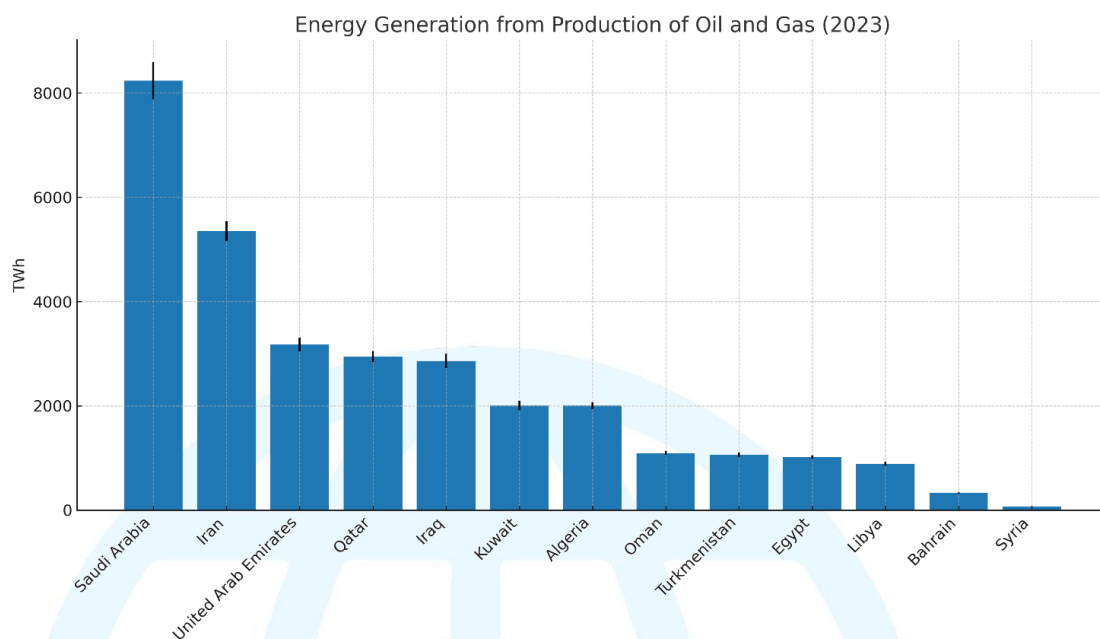
و گاز در کشورهای غرب آسیا و شمال آفریقا



(شناسایی شده توسط داده‌های ماهواره‌ای)

در تصویر مکمل ۲، میزان تولید انرژی در کشورهای مربوطه از نفت و گاز نمایش گذاشته شده است. این میزان انرژی تولید و میزان انرژی هدررفت از طریق انتشار متان را میتوان برای محاسبه شدت انتشار متان از فعالیت‌های نفت و گاز استفاده نمود.

تصویر مکمل ۲- میزان انرژی تولید شده از طریق تولید نفت و گاز در کشورهای غرب آسیا و شمال آفریقا، میزان تولید نفت و گاز با ضرایب مربوطه و عدم قطعیت ۵٪ نشان داده شده‌اند.



در جدول مکمل ۱، میزان انرژی هدر رفته از طریق انتشار متان در کشورهای غرب آسیا و شمال آفریقا و میزان انرژی تولیدی در این کشورها از طریق استخراج منابع نفت و گاز بیان شده است. نسبت میزان هدررفت انرژی از طریق انتشار متان به میزان تولید انرژی، میزان هدررفت انرژی و یا همان شدت انتشار متان در مرحله استخراج را محاسبه می‌نماید. در این محاسبه بیشترین میزان شدت انتشار مربوط به کشور سوریه و ترکمنستان می‌باشد.

جدول مکمل ۱- میزان انرژی تولیدی از استخراج نفت و گاز در کشورهای غرب آسیا و شمال آفریقا، میزان هدررفت انرژی از طریق انتشار متان شناسایی شده از طریق ماهواره و میزان نسبی هدررفت انرژی نسبت به تولید انرژی

کشور	انرژی هدر رفته از انتشار متان (تراوات ساعت)	تولید بشکه نفت در سال ۲۰۲۳ (میلیون بشکه)	میزان تولید گاز در سال ۲۰۲۳ (میلیارد متر مکعب)	انرژی تولیدی از نفت، سال ۲۰۲۳ (تراوات ساعت)	انرژی تولیدی از گاز، سال ۲۰۲۳ (تراوات ساعت)	کل میزان انرژی تولیدی از نفت و گاز در سال ۲۰۲۳ (تراوات ساعت)	میزان هدررفت انرژی (%)
الجزیره	۱۲۷.۱۷±۲۳.۱۸	۵۲۷	۱۰۵	۸۹۶±۴۵	۱۱۰۷±۵۵	۲۰۰۳±۷۱	٪۱.۱۶
بحرین	۱۷.۷۵±۶.۵۷	۷۰	۲۰	۱۲۰±۶	۲۰۶±۱۰	۳۲۶±۱۲	٪۲.۰۲
مصر	۱۲.۱۹±۵.۴۵	۲۴۳	۵۷	۴۱۳±۲۱	۶۰۳±۳۰	۱۰۱۷±۳۷	٪۰.۵۴
ایران	۱۴۲.۸۶± ۴۱.۵۳	۱۵۰۴	۲۶۵	۲۵۵۶±۱۲ ۸	۲۷۹۷±۱۴۰	۵۳۵۲±۱۸ ۹	٪۰.۷۸
عراق	۲۵.۹۱±۹.۸۶	۱۶۱۹	۱۱	۲۷۵۲±۱۳ ۸	۱۱۱±۶	۲۸۶۳±۱۳ ۸	٪۰.۳۴
کویت	۱۰.۴۲±۴.۴۸	۱۰۱۶	۱۹	۱۸۰۳±۹۰	۲۰۳±۱۰	۲۰۰۶±۹۱	٪۰.۲۴
لیبی	۳۸.۹۸±۱۱.۸۹	۴۵۴	۱۱	۷۷۲±۳۹	۱۱۸±۶	۸۹۰±۳۹	٪۱.۳۴
عمان	۱.۲۱±۰.۶۲	۳۸۶	۴۲	۶۵۶±۳۳	۴۴۰±۲۲	۱۰۹۶±۴۰	٪۰.۰۶
قطر	۰.۰۱±۰.۰۲	۶۶۶	۱۷۲	۱۱۳۳±۵۷	۱۸۱۲±۹۱	۲۹۴۵±۱۰ ۷	٪۰.۰۰
عربستان سعودی	۲.۷۳±۰.۳۶	۴۰۹۳	۱۲۱	۶۹۵۸±۳۴ ۸	۱۲۷۹±۶۴	۸۲۳۷±۳۵ ۴	٪۰.۰۰
سوریه	۳۳.۴۶±۹.۰۹	۲۳	۳	۳۹±۲	۲۹±۲	۶۸±۲	۱۳.۳۵ ٪
ترکمنستان	۶۹۵.۳۶±۱۱۹.۳۶	۱۰۰	۸۴	۱۷۰±۹	۸۸۹±۴۵	۱۰۶۰±۴۵	۱۱.۲۷ ٪
امارات	۰.۱۰±۰.۰۵	۱۵۱۹	۵۶	۲۵۸۳±۱۲ ۹	۵۸۹±۲۹	۳۱۷۱±۱۳ ۳	٪۰.۰۰