منظمة الأقطار
العربية المصدرة
للبترول (أوابك)

تخفيض انبعاثات غاز الميثان

نظرة شاملة وجهود عربية

Reducing Methane Gas Emissions:

A Comprehensive Overview and Arab Efforts

OAPEC Oapec Oapec @OAPEC1 OAPEC1 OAPEC ORG

دولة الكويت - مايو 2025

منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

تخفيض انبعاثات غاز الميثان

نظرة شاملة وجهود عربية

إعداد
م. تركي حسن حمش
خبير بترول/ استكشاف وإنتاج

مراجعة
م. عماد ناصيف مكي
مدير إدارة الشؤون الفنية

إعتماد
المهندس خالـــد العتيبـــــي
الأمين العام

تخفيض انبعاثات غاز الميثان
نظرة شاملة وجهود عربية

مقدمة

تزايد الاهتمام العالمي خلال العقود الأخيرة بدراسة الغازات المؤثرة في توازن الغلاف الجوي، في ظل ما يشهده العالم من تحولات مناخية متسارعة وتحديات بيئية متنامية. ويأتي غاز الميثان في مقدمة هذه الغازات من حيث تعقّد مصادره وتنوع مساراته في البيئة الطبيعية والصناعية، الأمر الذي جعل تتبع انبعاثاته وتقييم آثاره موضوعاً محورياً في الأبحاث العلمية المعاصرة. إلا أن الخطاب السائد في كثير من التقارير والوسائط الإعلامية يميل إلى تحميل الصناعة البترولية المسؤولية الرئيسية، في تجاهل نسبي لبقية القطاعات المؤثرة.

وتظهر هذه الدراسة أن هذا التناول يفتقر في كثير من الأحيان إلى الدقة العلمية والتوازن التحليلي، كما توضح أن ما يصنف ضمن قطاع الطاقة في بعض التقارير الدولية، يشمل أنشطة لا تندرج مباشرة ضمن الصناعة البترولية، مما يؤدي إلى تضخيم دورها في المشكلة المناخية.

وفي هذا السياق، تسعى هذه الدراسة إلى تقديم قراءة علمية شاملة لخصائص الميثان، ومصادر انبعاثه، وطرق قياسه وتقديره، إضافة إلى استعراض أبرز التجارب الدولية في التعامل مع تحدياته. كما تولي اهتماماً خاصاً بدور قطاع النفط والغاز في تطوير تقنيات الرصد والمعالجة، وتعزيز ممارسات التشغيل الآمن، وتحسين كفاءة استغلال الموارد.

كما ترصد الدراسة مبادرات وسياسات عربية لتقليل الانبعاثات، من خلال تطوير البنية التحتية، وتبني تقنيات الكشف المبكر عن التسربات، والاستثمار في استغلال الغاز المصاحب، والانخراط في المبادرات الدولية المعنية بخفض الميثان، وهو ما يعكس إدراكاً متزايداً لأهمية المواءمة بين متطلبات التنمية الاقتصادية والمحافظة على التوازن البيئي، بما يسهم في دعم مسارات التنمية المستدامة على المستويين الإقليمي والدولي. ومن ثم تؤكد هذه الدراسة أن معالجة قضية الميثان تتطلب مقاربة شاملة وعادلة، تقوم على توزيع المسؤوليات بين القطاعات المختلفة، ودعم جهود الدول المنتجة في التحول نحو ممارسات أكثر استدامة.

الأمين العام

المهندس خالد العتيبي

جدول المحتويات

مقدمة i
جدول المحتويات iii
الجداول الواردة في الدراسة v
الأشكال الواردة في الدراسة v
ملخص تنفيذي vi
Executive Summary vii
تمهيد 1
تباين تقديرات البيانات 4
الفصل الأول 9
غاز الميثان ومصادره وآلية تأثيره على البيئة 9
1 ما هو غاز الميثان 10
1-2 استخدامات الميثان 11
1-3 مصادر غاز الميثان 12
1-1-3: المصادر الطبيعية 12
2-1-3: المصادر البشرية 13
1-4 تركيز غاز الميثان في الجو 14
1-5 طرق قياس وتقدير انبعاثات الميثان 18
5 -1 -1: برامج كشف التسرب وإصلاحه (LDAR) 20
5 -1- 2: المكونات الأساسية لتصميم برامج LDAR 20
5 -1- 3: مثال عن برنامج LDAR- كندا 21
نطاق المرافق المشمولة بالفحص 21
متطلبات إصلاح التسربات 23
السجلات والوثائق الداعمة 23
1-6 آلية تأثير غاز الميثان على البيئة 23
1-7 الآثار الصحية للميثان 25
1-8 الآثار الاجتماعية لانبعاثات غاز الميثان 26
الفصل الثاني 29

2- 2 الانبعاثات الناجمة عن إنتاج الفحم الحجري حسب المصدر.....31
2- 3 غاز الميثان المنبعث من الصناعة البترولية.....33
2-3- 1 دور صناعة الغاز المسال.....36
2- 4 انبعاثات غاز الميثان في الدول العربية.....38
2- 5 أمثلة عن انبعاثات الميثان.....41
2- 5-1 حادثة Nord Stream.....41
2- 5- 2 حادثة Aliso Canyon.....42
2- 5- 3 انبعاثات الميثان من الزراعة.....44
الفصل الثالث.....45
الجهود الدولية والإقليمية للحد من انبعاثات الميثان.....45
3- 1 الإطار الدولي: تعهد الميثان العالمي.....46
3- 2 الشراكة العالمية للحد من حرق الغاز والميثان.....48
3- 3 كلفة تخفيض انبعاثات الميثان.....53
3- 3- 1: الميثان وصناعة الطعام في العالم.....57
3- 4 أمثلة عن جهود الدول العربية في الحد من انبعاثات الميثان.....59
3- 4- 1: دولة الإمارات العربية المتحدة.....59
3- 4- 2: الجمهورية الجزائرية.....61
3- 4- 3: المملكة العربية السعودية.....64
3- 4- 4: جمهورية العراق.....67
3- 4- 5: دولة قطر.....70
3- 4- 6: دولة الكويت.....71
3- 4- 7: دولة ليبيا.....74
3- 4- 8: جمهورية مصر العربية.....75
المناقشة والنتائج:.....77
ملحق 1: الدول المشاركة في تعهد الميثان العالمي.....80
المراجع.....81

الجداول الواردة في الدراسة

الجدول1 : مقارنة تقديرات انبعاثات الميثان 14
الجدول 2: النسب التقديرية لانبعاثات غاز الميثان بحسب نوع منجم الفحم الحجري..... 31
الجدول 3: إنتاج الفحم الحجري في العالم حسب المجموعات الدولية. 32
الجدول 4: انبعاثات الميثان من مناجم الفحم الحجري عام 2024 حسب المجموعات الدولية 32
الجدول 5: مصادر انبعاثات غاز الميثان حتى شهر مايو 2025 34
الجدول 6: انبعاثات الميثان من الدول العربية والعالم عام 2024..... 38
الجدول 7: انبعاثات الميثان من الصناعة البترولية في الدول العربية عام 2024 39
الجدول 8: الدول العشر الأولى في حرق الغاز عام 2024..... 51
الجدول 9: المؤشرات المرجعية لتكاليف خفض الميثان: الجدوى المالية والوفورات الاقتصادية..... 56
الجدول 10: مقارنة كثافة حرق الغاز بين السعودية والولايات المتحدة وروسيا 67
الجدول 11: بعض المشاريع المنجزة/ قيد الإنجاز في العراق 68
الجدول 12: كثافة حرق الغاز في الكويت..... 74
الجدول13 : المنفذ والمخطط لخفض حرق الغاز في ليبيا 75

الأشكال الواردة في الدراسة

الشكل 1: نسبة غاز الميثان في بعض حقول العالم 11
الشكل 2: تركيز غاز الميثان قبل الميلاد (جزء بالمليار) 15
الشكل 3: تركيز غاز الميثان في الجو..... 16
الشكل 4: الزيادة السنوية في تركيز غاز الميثان في الجو..... 17
الشكل 5: نسب غازات الدفيئة في الجو 24
الشكل 6: مقارنة نسب إنتاج الفحم الحجري وانبعاثات الميثان حسب المجموعة الدولية لعام 2024..... 33
الشكل 7: أهم مصادر انبعاثات الميثان في الدول العربية عام 2024 41
الشكل 8: حرق الغاز مقابل النفط والغاز المنتج في العالم 51
الشكل 9: الغاز المحروق في الإمارات بالعلاقة مع كمية النفط المنتج 61
الشكل 10: الغاز المحروق في الجزائر بالعلاقة مع كميات النفط المنتجة..... 63
الشكل 11: الغاز المحروق في السعودية بالعلاقة مع كميات النفط المنتجة 66
الشكل 12: الغاز المحروق في الكويت بالعلاقة مع كميات النفط المنتجة..... 73
الشكل 13: كميات الغاز المحروق وكثافة الحرق في مصر 76

ملخص تنفيذي

تناولت هذه الدراسة قضية انبعاثات غاز الميثان في سياقها العالمي والإقليمي، مع تركيز خاص على دور الصناعة البترولية في الدول العربية المنتجة للنفط والغاز. ويأتي هذا الاهتمام في ظل تصاعد الضغوط الدولية الرامية إلى خفض انبعاثات الغازات الدفيئة، وما يصاحبها من خطاب إعلامي وسياسي يحمّل قطاع النفط والغاز مسؤولية رئيسية عن تفاقم مشكلة الميثان.

أظهرت نتائج الدراسة، استناداً إلى بيانات المؤسسات الدولية، أن مصادر انبعاث الميثان متعددة ومتداخلة، ولا تقتصر على الصناعة البترولية وحدها. إذ تشير الأرقام إلى أن قطاع الزراعة يمثل المصدر الأكبر عالمياً، يليه قطاع الطاقة بمكوناته المختلفة، التي تشمل الفحم والوقود الحيوي إلى جانب النفط والغاز. وعند عزل انبعاثات النفط والغاز تحديداً، يتبين أنها تمثل نسبة محدودة نسبياً من الإجمالي العالمي، لا تتجاوز نحو ربع الانبعاثات.

كما أوضحت الدراسة أن مساهمة الدول العربية في انبعاثات الميثان العالمية تبقى دون مستوى مساهمتها في إنتاج الطاقة، حيث تمثل أقل من 10% من الانبعاثات، مقابل نحو ربع الإنتاج العالمي من النفط. ويعكس ذلك تحسناً ملحوظاً في كفاءة العمليات التشغيلية، وتزايد الاستثمارات في تقنيات تقليل الحرق والتسرب، وتطوير البنية التحتية لاستغلال الغاز المصاحب.

سلطت الدراسة الضوء على التباينات المنهجية بين قواعد البيانات الدولية، وما يترتب عليها من اختلافات في التقديرات، مما يؤثر في دقة تقييم المسؤوليات القطاعية والجغرافية. كما تشير إلى أن تطور تركيز الميثان في الغلاف الجوي لا يرتبط فقط بحجم الانبعاثات البشرية، بل يتأثر أيضاً بعوامل كيميائية ومناخية طبيعية. وتستعرض الدراسة نماذج من المبادرات العربية الرائدة في مجال خفض الانبعاثات، خاصة في دولة الإمارات والجزائر والعراق، والتي شملت برامج الكشف المبكر عن التسربات، وخطط تصفير الحرق الروتيني، والانخراط في التعهدات الدولية. كما تؤكد أن حرق الغاز يمثل خسارة اقتصادية كبيرة وفرصة ضائعة لتعزيز أمن الطاقة والتنمية الصناعية.

وخلصت الدراسة إلى أن معالجة قضية الميثان تتطلب نهجاً متكاملاً وعادلاً، يقوم على توزيع المسؤوليات بين القطاعات المختلفة، وتحسين جودة البيانات، وتعزيز التعاون الدولي، وربط السياسات المناخية بالعوائد الاقتصادية. وتوصي بدعم جهود الدول العربية المنتجة للطاقة، وتمكينها تقنياً ومالياً، بما يضمن تحقيق أهداف خفض الانبعاثات دون الإضرار بأمن الطاقة أو مسارات التنمية المستدامة.

Methane Gas: A Comprehensive Overview and Arab Experiences

Executive Summary

The study addresses the issue of methane emissions within its global and regional contexts, with a specific focus on the role of the petroleum industry in Arab oil and gas-producing countries. This interest arises amid escalating international pressures aimed at reducing greenhouse gas emissions, accompanied by a media and political discourse that holds the oil and gas sector primarily responsible for the exacerbation of the methane problem.

The findings of the study, based on data from international institutions, show that methane emission sources are multiple and overlapping, and are not limited to the petroleum industry alone. Figures indicate that the agricultural sector represents the largest global source, followed by the energy sector with its various components, which include coal and biofuels alongside oil and gas.

When specifically isolating oil and gas emissions, it becomes clear that they represent a relatively limited percentage of the global total, not exceeding one-quarter of emissions.

Furthermore, the study illustrates that the contribution of Arab countries to global methane emissions remains below their contribution to energy production; they account for less than 10% of emissions compared to about a quarter of global oil production. This reflects a significant improvement in the efficiency of operational processes, increasing investments in technologies to reduce flaring and leaks, and the development of infrastructure to utilize associated gas.

The study also highlights the methodological discrepancies between international databases and the resulting differences in estimates, which affect the accuracy of assessing sectoral and geographical responsibilities. It also points out that the evolution of methane concentration in the atmosphere is not solely linked to the volume of human emissions but is also influenced by natural chemical and climatic factors. The study reviews models of leading Arab initiatives in the field of emission reduction, particularly in the UAE, Algeria, and Iraq, which included early leak detection programs, plans to zero out routine flaring, and involvement in international pledges. It also emphasizes that gas flaring represents a major economic loss and a missed opportunity to enhance energy security and industrial development.

The study concludes that addressing the methane issue requires an integrated and fair approach based on distributing responsibilities among different sectors, improving data quality, enhancing international cooperation, and linking climate policies to economic returns. It recommends supporting the efforts of Arab energy-producing countries and empowering them technically and financially to ensure that emission reduction goals are met without harming energy security or sustainable development paths.

تمهيد

شهد القرن التاسع عشر ظهور أولى الدراسات التي تحدثت عن تغير المناخ وما سمي لاحقاً بالدفآن أو الاحترار العالمي. ففي عام 1824، كتب الباحث الفرنسي Joseph Fourier عن قدرة الغازات في الغلاف الجوي على حبس الحرارة، مما يجعل الأرض أكثر دفئاً.

وفي عام 1856، أجرت العالمة الأمريكية Eunice Foote تجارب أظهرت أن ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء يحتفظان بالحرارة، واستنتجت أن زيادة هذه الغازات في الغلاف الجوي يمكن أن ترفع درجة حرارة الأرض. تم تحرّي هذا المفهوم تجريبياً في عام 1859 على يد John Tyndall الذي أشار إلى أن بعض الغازات مثل الميثان تمتص الطاقة الحرارية، مما يؤثر أيضاً على حرارة الأرض.

بينما كان العالم السويدي Svante Arrhenius، في عام 1896، أول من قدر كمياً تأثير زيادة ثاني أكسيد الكربون على درجات الحرارة العالمية، إذ وضع نموذجاً رياضياً يربط بين غاز ثاني أكسيد الكربون ودرجة حرارة الأرض (Riley, 2025)[1].

وفي بدايات القرن العشرين، ربط Milutin Milankovitch دورات المناخ الطبيعية بالتغيرات في مدار الأرض، حيث تؤدي التغيرات الدورية في شكل ومدار الأرض حول الشمس، وميل محورها، واتجاه هذا المحور، إلى تغييرات كبيرة في كمية وتوزيع الطاقة الشمسية التي تصل إلى سطح الأرض، وبالتالي تؤثر على مناخها على مدى آلاف إلى مئات آلاف السنين. بمعنى آخر، ربط Milankovitch التغيرات المناخية بطبيعة الحركة الفلكية للأرض وليس بالعوامل البشرية (NASA, 2024)[2].

بينما قدم Guy Callendar في عام 1938 بيانات تربط ارتفاع درجات الحرارة العالمية بزيادة انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من الوقود الأحفوري (Dee, 2022)[3].

ثم جلبت حقبة ما بعد الحرب العالمية الثانية تقدماً تكنولوجياً انعكس في قياسات Charles Keeling لتركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي في جزيرة Mauna Loa في هاواي بدءاً من عام 1958، والتي كشفت عن اتجاه تصاعدي يعرف حالياً باسم منحنى Keeling، ويبين متوسط التركيز الشهري لغاز ثاني أكسيد الكربون في المنطقة المذكورة (ACS، بدون تاريخ)[4].

ورغم أن جزيرة Mauna Loa تحتوي على أكبر بركان في هاواي وأكبر بركان نشط في العالم من ناحية الحجم حيث اندفع نحو 33 مرة منذ عام 1843 (USGS, 2023)[5]، إلا أن قياسات ثاني أكسيد الكربون في المنطقة

تراعي أن لا تتداخل انبعاثات البركان مع الأرقام المقاسة لنسب غاز ثاني أكسيد الكربون.

شهدت سبعينات وثمانينات القرن الماضي إنشاء برامج بحث عالمية، وتأسيس الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ* في عام 1988، والتي لعبت منذ ذلك الحين دوراً مركزياً في تقييم علوم المناخ. وعلى مدى العقود الثلاثة الماضية، عززت التطورات في رصد الأقمار الصناعية والنمذجة الحاسوبية وأبحاث المناخ القديم، فرضية أن الأنشطة البشرية (ومنها إنتاج الهيدروكربونات) هي المحرك الأساسي لتغير المناخ الأخير في المقابل ظهر تيار علمي آخر ينفي هذه الفرضية، وإن كان لم ينل حظه من الانتشار بسبب مزاعم وجود إجماع على دور الهيدروكربونات في التغير المناخي، مع أن العلم يتعامل مع لغة الأرقام وليس مع الإجماع من عدمه. وقد أثرت هذه المعلومات المتراكمة على الجهود الرئيسية للسياسات الدولية، بما في ذلك بروتوكول كيوتو† الذي اعتُمد عام 1997 ودخل حيز التنفيذ عام 2005، وألزم الدول الصناعية بخفض انبعاثاتها من غازات الدفيئة، وتبعته اتفاقية باريس‡، التي اعتُمدت عام 2015 ودخلت حيز التنفيذ عام 2016 وتهدف إلى إبقاء الاحترار العالمي أقل من درجتين مئويتين فوق مستويات ما قبل الثورة الصناعية، مع السعي للحد من الارتفاع إلى 1.5 درجة مئوية (Weart, 2025)[6].

وضمن المسار المناخي، اضطلع الإعلام عبر عقودٍ طويلة بدور إيجابي لا ينكر في تعزيز الوعي بالقضايا البيئية. إلا أن ثمة حالات شهدت تجاوزاً للموضوعية العلمية، وصولاً إلى المبالغة في الطرح. وهو ما يمكن أن يتضح جلياً على سبيل المثال في فيلم "حقيقة مرّة"§ الذي صدر عام 2006، والذي كان لنائب الرئيس الأمريكي الأسبق **Al Gore** دور محوري في الترويج له. فقد زعم الفيلم، قبل نحو عقدين من الزمن، أن مستوى سطح البحر سيرتفع بمقدار 20 قدماً (ما يعادل 6 أمتار) في المستقبل القريب جراء ظاهرة الاحترار العالمي.

يتعارض هذا الادعاء مع التقديرات العلمية الصادرة عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ، والتي أشارت إلى أن أقصى ارتفاع متوقع لمستوى سطح البحر، حتى في أسوأ السيناريوهات، لن يتجاوز 20 بوصة أي حوالي نصف متر. وقد سعى العديد من الباحثين إلى الرد على ما اعتبروه مغالطات علمية في الفيلم، ومنها نقطة مستوى سطح البحر، إذ أشار (Braun, 2023)[7] أن لدى وكالة NASA بيانات تتبع متاحة

* IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

† Kyoto Protocol

‡ Paris Agreement

§ An Inconvenient Truth

على الإنترنت لمستويات المحيطات، تظهر التغيرات الشهرية لمستوى سطح البحر منذ شهر يناير 1993*. ومع أن التغير الصافي في مستوى سطح البحر تصاعدي، فإن البيانات تظهر أيضاً بعض الانخفاضات الحادة. فخلال فترة عشرة أشهر من يونيو 2010 حتى أبريل 2011، انخفض مستوى سطح البحر 9.1 مم. وفي المجمل أضافت قياسات NASA على مدار 30 عاماً (1993- 2023) ما يصل إلى زيادة صافية إجمالية في مستوى سطح البحر قدرها 103 مم، أي ما يعادل تقريباً ارتفاع كوب قهوة. لكن تتبع القياسات بعد عام 2023 من خلال موقع NASA يبين أن الزيادة الصافية الإجمالية بلغت 99.5 مم حتى شهر مارس 2025 (NASA, 2025)[8]. ويحدث تغير مستوى سطح البحر -بحسب رأي NASA - نتيجة للاحترار العالمي الناجم عن الأنشطة البشرية تحديداً، حيث ترى أن زيادة المياه تحدث بسبب ذوبان الجبال الجليدية، علاوة على تمدد المياه بسبب ارتفاع درجة الحرارة (NASA, 2025).

تاريخياً، ظل الغاز الطبيعي لغزاً جيولوجياً غامضاً توشّح بعباءة الأساطير، فقبل أن يدرك الإنسان ماهيته الكيميائية، كانت صاعقة عابرة كفيلة بأن تحيل تسربات الهيدروكربون المنبعثة من شقوق القشرة الأرضية إلى شعلات لا تنطفئ. هذه النيران الأبدية لم تكن مجرد ظاهرة فيزيائية بالنسبة للحضارات القديمة، بل كانت مبعثاً للرهبة والتقديس، كما حدث في القرن العاشر قبل الميلاد على جبل Parnassus في اليونان، حيث شيد الإغريق معبد Delphi ظناً منهم أن للنار مصدراً إلهياً. ولا تزال هذه الظاهرة حية في ذاكرة الأرض، كما في شعلات النار الأزلية المستعرة في مدينة كركوك العراقية، وغيرها من دول العالم. ولم يدخل الغاز الطبيعي عصر الإنتاج الممنهج عبر الحفر إلا في عام 1821م، حين قام الحداد William Hart في منطقة Fredonia في نيويورك بابتكار منظومة نقل أولية تتألف من أنابيب حديدية وصندوق تجميع، نجح من خلالها في إيصال الغاز لإنارة مسرح المدينة. ومع توالي الاكتشافات، كبئر Drake الشهير في بنسلفانيا، بدأت ملامح صناعة جديدة تتشكل، وإن ظلت في بداياتها مكبلة بعوائق تقنية واقتصادية، من بينها غياب تقنيات الضغط والتخزين الآمن التي تسمح بنقله لمسافات بعيدة عن مكامنه، وتدني القيمة التجارية للغاز آنذاك، مما جعل الاستثمار فيه غير مجزٍ للمنتجين. وحتى ثلاثينات القرن العشرين، ومع بزوغ فجر صناعة تكرير النفط، ظل الغاز الطبيعي منتجاً غير مرحب به في العمليات البترولية، فقد كان ينظر إليه كمنتج ثانوي يحرق في الهواء أو يطلق في الجو ببساطة. ولم يسترد الغاز اعتباره العلمي والاقتصادي كواحد من أهم مصادر الطاقة إلا في العقود

* وهو بالصدفة الشهر الذي تسلم فيه Al Gore منصبه كنائب للرئيس الأمريكي!

القليلة الماضية، بعد أن تطورت تكنولوجيا الأنابيب العابرة للقارات وتقنيات الإسالة، ليتحول من مجرد أسطورة إلى ركيزة أساسية في الاقتصاد العالمي.

عموماً، تعد انبعاثات الميثان الوجه الآخر لانبعاثات الغاز الطبيعي، نظراً للتطابق الكبير في التركيب الكيميائي، إذ يمثل الميثان المكون الرئيسي والمهيمن في المزيج الهيدروكربوني للغاز الطبيعي بنسب تركيز تتراوح غالباً بين 70% و90%، وقد تبلغ في مستوياتها القصوى 99%. وبناءً على ذلك، فإن أي تسرب غير مقصود أو إطلاق مباشر للغاز الطبيعي عبر شبكات الإمداد أو مرافق الإنتاج إلى الغلاف الجوي، يصنف بوصفه انبعاثاً مباشراً للميثان.

تباين تقديرات البيانات

عند البحث عن مراجع موثوقة لانبعاثات الميثان، يلاحظ أنه لا توجد عملياً منهجية قياس أو تقدير موحدة عالمياً للميثان. بعض الجهات تستخدم تقديرات "من الأسفل إلى الأعلى" (bottom-up) بناءً على البيانات الوطنية، بينما تعتمد أخرى على تقديرات "من الأعلى إلى الأسفل" (top-down) باستخدام قياسات الأقمار الصناعية أو المسوحات الجوية، ثم تقدير حجم الانبعاثات من كل مصدر، ولكل طريقة نقاط ضعفها وعوامل عدم اليقين الخاصة بها. كما تعاني العديد من الدول من نقص في آليات الإبلاغ الشفافة والموثوقة عن انبعاثات الميثان. إضافة إلى ذلك، قد تكون بعض البيانات الحساسة مملوكة لشركات خاصة، مما يجعل الوصول إليها صعباً، وهذا يؤدي إلى فجوات في البيانات أو الاعتماد على تقديرات غير دقيقة.

ولا يمكن التغاضي عن واقع المصالح المختلفة التي قد تؤثر على الأرقام المعلنة. فالدول قد تميل إلى التقليل من تقدير انبعاثاتها لأسباب سياسية أو اقتصادية، بينما قد تسعى المنظمات غير الحكومية إلى تقديرات أعلى لتسليط الضوء على الموضوع، ناهيك عن بعض الشركات التي تعمل في مجال الحد من الانبعاثات والتي من مصلحتها ذكر أرقام مرتفعة.

هذه العوامل تؤثر حتماً على نتائج أي دراسة أو مشروع يهدف للحد من انبعاثات الميثان. فإذا كانت الأرقام غير دقيقة، قد يتم توجيه الجهود والموارد نحو مصادر غير رئيسية، مما يقلل من فعالية استراتيجيات التخفيض، كما يصبح من الصعب تحديد أهداف واقعية لخفض الانبعاثات أو قياس التقدم المحرز بدقة. والأهم من ذلك أن الأرقام المتضاربة قد تؤدي إلى إضعاف الثقة في البيانات العلمية وتعيق صياغة سياسات مناخية فعالة وملزمة.

وعلى سبيل المثال، تمت العودة إلى تقديرات كل من وكالة الطاقة الدولية IEA، والمرصد العالمي للطاقة GEM، واتفاقية الأمم المتحدة بشأن تغير المناخ UNFCCC. حيث بدا بوضوح عدم تجانس المنهجيات، وتركيز وكالة الطاقة الدولية على انبعاثات الميثان من قطاع الطاقة أكثر من غيره، مع الإشارة بشكل عابر إلى الزراعة والنفايات وغيرها كمصادر لانبعاثات الميثان، واعتمادها على مزيج من البيانات الرسمية، والنماذج الإحصائية، وعوامل الانبعاث، بل والتقديرات بناء على بيانات سابقة، وبدأت مؤخراً في دمج بيانات الأقمار الصناعية إنما بشكل تكاملي مع بياناتها التقليدية.

بينما يركز المرصد العالمي للطاقة على البنية التحتية للوقود الأحفوري العالمية (المصانع، خطوط الأنابيب، المناجم) وتأثيرها على البيئة، مع تتبع يركز على تسرب الميثان من هذه البنى. ويعتمد المرصد بشكل كبير على البيانات المفتوحة المصدر، والبحث المستقل، وتحليلات صور الأقمار الصناعية. كما لوحظ أن وكالة الطاقة الدولية غالباً ما تركز على التقديرات السنوية الشاملة، بينما يركز المرصد العالمي للطاقة على تتبع الأحداث الفورية للانبعاثات الكبيرة.

تلعب اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ UNFCCC دوراً محورياً في معالجة انبعاثات الميثان، من خلال توفير إطار قانوني وتنظيمي للجهود الدولية. ومع ذلك، فإن هذا الدور يساهم أيضاً في بعض التحديات المتعلقة بدقة الأرقام والتباينات المشار إليها آنفاً. فبموجب الاتفاقية الإطارية واتفاقية باريس، يتعين على الدول الأطراف إعداد وتقديم تقارير جرد وطنية سنوية (للأطراف المدرجة في الملحق الأول للاتفاقية- الدول المتقدمة) أو تقارير شفافة كل سنتين (للأطراف غير المدرجة في الملحق الأول- الدول النامية) حول انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، بما في ذلك الميثان من جميع القطاعات (الطاقة، الصناعة، الزراعة، النفايات، استخدام الأراضي). تعتمد هذه التقارير على إرشادات الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ IPCC لتحديد منهجيات القياس والتقدير. هذه الإرشادات توفر مستويات مختلفة من التعقيد (Tiers 1, 2, 3)* لتقدير الانبعاثات، حيث يكون Tier 1 هو الأبسط ويعتمد على عوامل انبعاث عامة، بينما Tier 3 هو الأكثر تفصيلاً ويستخدم بيانات محددة للدولة.

* المستوى الأول (Tier 1): الطريقة الأبسط للتقدير، تعتمد على بيانات الأنشطة المتاحة محلياً مع استخدام (عوامل انبعاث افتراضية) دولية توفرها (IPCC)، وهي مخصصة للدول التي تفتقر لبيانات وطنية مفصلة.

المستوى الثاني (Tier 2): منهجية متوسطة التعقيد، تستخدم نفس القواعد الحسابية للمستوى الأول، لكنها تعتمد على (عوامل انبعاث وطنية) محددة تعكس الظروف المحلية للدولة بدقة أكبر من القيم الافتراضية. المستوى الثالث (Tier 3): المنهجية الأكثر دقة وتعقيداً، تعتمد على نماذج محاكاة متطورة أو أنظمة قياس مباشر في الموقع (Field Measurements)، مع تحليل دقيق للبيانات على مستويات جغرافية وزمنية تفصيلية.

كما تدعو اتفاقية باريس Paris Agreement الدول إلى تقديم مساهماتها المحددة وطنياً التي توضح التزاماتها بخفض الانبعاثات، بما في ذلك الميثان. أما ما يسمى الالتزام العالمي للميثان Global Methane Pledge وعلى الرغم من أنه ليس جزءاً رسمياً من الاتفاقية الإطارية بحد ذاته، إلا أن هذا الالتزام الذي أطلقته الولايات المتحدة والاتحاد الأوروبي ويدعمه برنامج الأمم المتحدة للبيئة وتحالف المناخ والهواء النظيف CCAC، يهدف إلى خفض انبعاثات الميثان العالمية بنسبة 30% على الأقل بحلول عام 2030 من مستويات 2020. هذا التعهد يكمل جهود UNFCCC ويوفر زخماً إضافياً لخفض الميثان.

ورغم أن الاتفاقية الإطارية تشجع على الشفافية في الإبلاغ عن الانبعاثات من خلال عمليات مراجعة تقارير الجرد الوطنية، إلا أن مستويات التدقيق والتحقق تختلف بين الدول المتقدمة والنامية. وعلى الرغم من أهمية دور الاتفاقية الإطارية، فقد لوحظ أن هناك عدة نقاط يمكن أن تساهم في التباين والتشكيك في دقة الأرقام، منها الاختلاف في تطبيق إرشادات الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ التي توفر مرونة للدول في اختيار مستوى التعقيد (Tier) والطرق المناسبة لظروفها الوطنية. هذا يؤدي إلى اختلافات في المنهجيات المستخدمة بين الدول، مما يجعل مقارنة البيانات صعبة. على سبيل المثال، قد تمتلك دولة ما بيانات تفصيلية لتقدير الانبعاثات من مزارع الأبقار فتستخدم مستوى تعقيد Tier 3، بينما قد تستخدم دولة أخرى ذات بيانات أقل تفصيلاً مستوى تعقيد Tier 1 الذي يمثل عوامل انبعاث عامة. وحتى مع وجود إرشادات موحدة، فإن جودة البيانات الأساسية (مثل عدد رؤوس الماشية، حجم النفايات في مدافن النفايات) التي تستخدمها الدول يمكن أن تختلف بشكل كبير، مما يؤثر على دقة التقديرات النهائية. (الف

وهو أمر من الضروري جلاؤه من خلال توضيح ما يلي:

- ينص تقرير وكالة الطاقة الدولية (الذي نشر في مايو 2025) صراحة على أن انبعاثات الميثان المرتبطة بالطاقة كانت حوالي 145 مليون طن في عام 2024. ويذكر أيضاً أن قطاع الطاقة يساهم "بأكثر من 35% من انبعاثات الميثان المرتبطة بالإنسان" ، مما يعني أن إجمالي الانبعاثات البشرية المرتبطة بالإنسان تبلغ حوالي 410 مليون طن. وتمثل انبعاثات الميثان من قطاع الطاقة الحيوية نحو 20 مليون طن. تركز وكالة الطاقة الدولية بشكل كبير على قطاع الطاقة وغالباً ما تشير إلى أن الزراعة والنفايات هما المصدران البشريان الرئيسيان الآخران دون تقديم أرقام مطلقة عن عام 2024 لهما. تشير كلمة "أخرى" في تقارير وكالة الطاقة الدولية إلى المصادر الطبيعية في إجمالي الميزانيات العالمية (الأراضي الرطبة والجيولوجية) ، والتي لا يتم تفصيلها عادة من قبل وكالة الطاقة الدولية، وغالباً ما

تقدم إجمالياً عالمياً يبلغ حوالي 610 مليون طن (410 طن من الأنشطة البشرية + 200 طن من مصادر طبيعية). وفيما يخص فئتي (النفايات وأخرى)، تستخدم الوكالة في جداولها المنشورة عن تقديرات انبعاثات غاز الميثان لعام 2024 بيانات تقديرية صادرة عام 2022 عن "الاتفاقية الإطارية لتغير المناخ". لكن الموقع الرسمي لوكالة الطاقة الدولية حول تتبع انبعاثات الميثان (آخر تحديث في 7 مايو 2025) يذكر أن إجمالي انبعاثات الميثان هي 354.4 مليون طن. وتذكر وكالة الطاقة الدولية في النص المرافق على الموقع أن انبعاثات الميثان الناتجة عن الوقود الأحفوري تبلغ أكثر من 120 مليون طن (IEA, 2025)[9].

- يعمل المرصد الدولي لانبعاثات الميثان* IMEO بشكل وثيق مع "الميزانية العالمية للميثان†" GMB. وقد أفادت وكالة الفضاء الأوروبية ومشروع الكربون الدولي (ESA / GCP) أن إجمالي الانبعاثات العالمية تبلغ 610 مليون طن، ثلثاها تقريباً (400- 410 مليون طن) ناتجة عن النشاطات البشرية. وترى "الميزانية العالمية للميثان" أن الزراعة هي المسؤول الأول عن انبعاثات الميثان من المصادر البشرية (40%)، بينما الوقود الأحفوري مسؤول عن 34% من الانبعاثات، وتساهم النفايات بنسبة 19%، وحرق الكتلة الحيوية بنسبة 7%. بينما ينص تقرير وكالة الطاقة الدولية (الذي نشر في مارس 2024) صراحة على أن انبعاثات الميثان المرتبطة بالطاقة كانت حوالي 120 مليون طن في عام 2023. وأشارت الوكالة إلى أن قطاع الطاقة الحيوية ساهم في 10 مليون طن أخرى. أما في تقريرها الصادر في مايو 2025، فقد ضمنت فيه أن قطاع الطاقة عموماً يساهم "بأكثر من 35% من انبعاثات الميثان المرتبطة بالإنسان". وفيما يخص فئتي (النفايات، وأخرى) تستخدم الوكالة في جداولها المنشورة عن تقديرات انبعاثات غاز الميثان لعام 2024 بيانات تقديرية صادرة عام 2022 عن "الاتفاقية الإطارية لتغير المناخ". لكن الموقع الرسمي لوكالة الطاقة الدولية حول تتبع انبعاثات الميثان (آخر تحديث في 7 مايو 2025) يذكر أن إجمالي انبعاثات الميثان هي 354.4 مليون طن. وتذكر وكالة الطاقة الدولية في النص المرافق على الموقع أن انبعاثات الميثان الناتجة عن الوقود الأحفوري تبلغ أكثر من 120 مليون طن (IEA, 2025)[10].

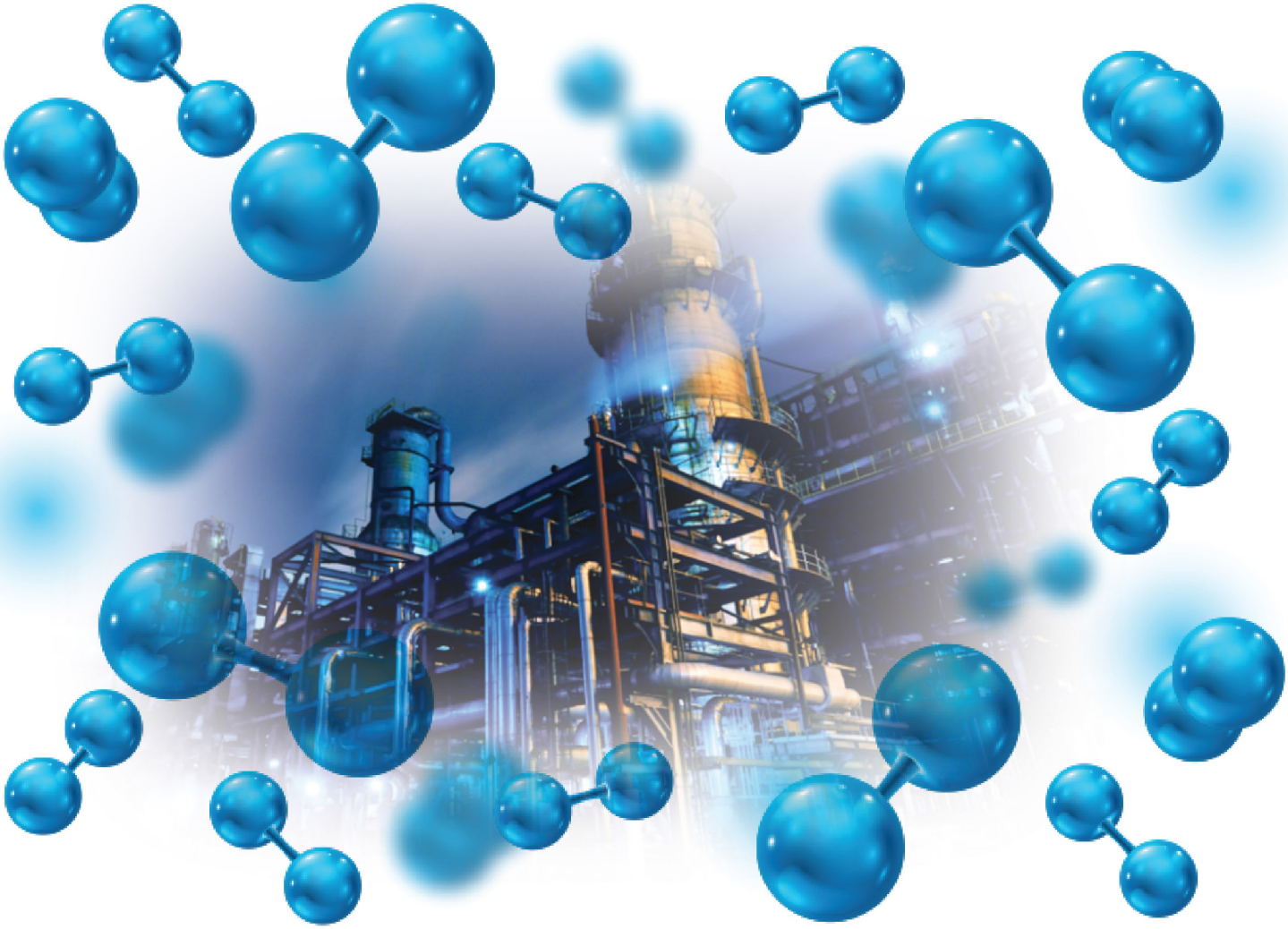
* International Methane Emissions Observatory

† Global Methane Budget.

- يوفر أحدث إصدار للبيانات العامة من "قاعدة بيانات الانبعاثات للأبحاث الجوية العالمية*" EDGAR بيانات حتى عام 2023 فقط! وهي عموماً تتوافق مع بيانات وكالة الطاقة الدولية وبيانات برنامج الأمم المتحدة للبيئة. وتتضمن فئة (أخرى) لانبعاثات الميثان في هذه القاعدة حرق الكتلة الحيوية ويمكن أن يشمل مصادر طبيعية أخرى ، اعتمادا على النطاق المقدم.
- تكمن قوة بيانات وكالة حماية البيئة الأمريكية EPA في البيانات التفصيلية الخاصة بالولايات المتحدة. أما بالنسبة للأرقام العالمية، فإنها تشير إلى الهيئات الدولية أو تتماشى معها.
- تعمل "لجنة تحالف الهواء والماء النظيف" CCAC بشكل وثيق جداً مع برنامج الأمم المتحدة للبيئة، وبياناتها تتوافق مع نتائج "الميزانية العالمية للميثان".
- هذه الفروقات والاختلافات الجوهرية في الأرقام وطرق التقدير بين الجهات المختلفة، قد تثير شكوكاً حول دقة البيانات وربما تؤثر سلباً على جهود خفض هذه الانبعاثات عالمياً. ومن الواضح أن هذه التباينات تنبع من عدة أسباب ربما يكون من بينها المنهجيات المختلفة، وجودة البيانات، والمصالح المتباينة للجهات المعنية، فعلى سبيل المثال تختلف تقديرات حرق الغاز عموماً بين المصادر المختلفة، فبيانات البنك الدولي تذكر أن حرق الغاز بلغ 151 مليار متر مكعب عام 2024، ويذكر معهد الطاقة أن الحرق بلغ 158.8 مليار متر مكعب، بينما تذهب شركة Capterio المتخصصة في حلول خفض حرق الغاز إلى أن الرقم هو 173 مليار متر مكعب، مضيفة إلى بيانات معهد الطاقة 14.2 مليار متر مكعب من الغاز الذي لم يحترق تماماً.

وفي ضوء ما سبق، يتضح أن التقديرات الحالية لانبعاثات الميثان، رغم تطورها الملحوظ، لا تزال عرضة لقدر من عدم اليقين المرتبط بتباين أدوات القياس واختلاف ظروف الرصد الميداني. وعليه، فإن تعزيز التكامل بين القياسات الأرضية وبيانات الأقمار الصناعية، إلى جانب توحيد بروتوكولات الرصد والإبلاغ، من شأنه أن يسهم في رفع مستوى الدقة والموثوقية. كما أن إدماج الأبعاد الاقتصادية والتنظيمية في دراسات الميثان المستقبلية يمثل خطوة ضرورية لضمان استدامة جهود الحد من الانبعاثات على المدى الطويل

* Emissions Database for Global Atmospheric Research



الفصل الأول

غاز الميثان ومصادره وآلية تأثيره على البيئة

1- 1 ما هو غاز الميثان

اكتشف غاز الميثان في عام 1776 على يد الفيزيائي والكيميائي Alessandro Volta. ففي رحلة صيد على بحيرة Maggiore في إيطاليا، لاحظ وجود فقاعات تتصاعد إلى السطح في المياه الضحلة للمستنقعات، أطلق عليها اسم غاز المستنقعات* القابل للاشتعال (Nature, 2023) [11]

يعرف الميثان من الناحية الكيميائية بأنه غاز عديم اللون والرائحة يعتبر أبسط غاز في سلسلة البارافينات† وصيغته هي CH_4. الميثان غير قابل للذوبان في الماء إلا بشكل طفيف، يحترق بسهولة في الهواء بلهب أزرق، مكوناً في الحالة المثالية غاز ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء. الميثان مقاوم إلى حد كبير للعديد من العوامل الكيميائية لكنه يتفاعل بسهولة مع الكلور، ومع المذيبات العضوية.

أما من الناحية الفيزيائية، فتبلغ درجة غليان الميثان -162 درجة مئوية ونقطة انصهاره -182.5 درجة مئوية. وهو غاز أخف من الهواء، إذ يبلغ ثقله النوعي 0.554 (Specific Gravity)، وكثافته 0.656 كغ/المتر المكعب. الميثان بشكل عام غاز مستقر للغاية، لكن المزيج من الميثان والهواء الذي يحتوي 4-15% من الغاز يصبح مزيجاً متفجراً، وهو ما تكرر كثيراً في مناجم الفحم وكان سبباً للعديد من الكوارث فيها(Rafferty, 2025) [12].

تشكل خصائص الميثان، ولا سيما افتقاره إلى اللون والرائحة، تحدياً كبيراً للكشف عنه في البيئات الصناعية والبيئية. إذ أن الملاحظة الحسية التقليدية غير كافية لتحديد التسريبات، خاصة في العمليات واسعة النطاق داخل قطاع النفط والغاز، مما يوجب استخدام تقنيات متطورة مثل كاميرات الأشعة تحت الحمراء ومعدات التصوير البصري للغازات‡، لتحديد الانبعاثات أو التسربات. وهذا يعني الحاجة إلى تكاليف إضافية تؤثر بشكل مباشر على فعالية وكفاءة تكلفة برامج الكشف عن التسرب والتي تعتبر ضرورية للتخفيف من غاز الميثان. علاوة على ذلك، تساهم صعوبة الكشف البصري أو الشمي عن الميثان في احتمال انخفاض تقدير الانبعاثات وتعقّد الرقابة عليه، مما يزيد من أهمية أنظمة الرصد والإبلاغ والتحقق§.

* Marsh Gas

† مركبات هيدروكربونية مشبعة لها الصيغة العامة C_nH_{2n+2}

‡ OGI: Optical Gas Imaging

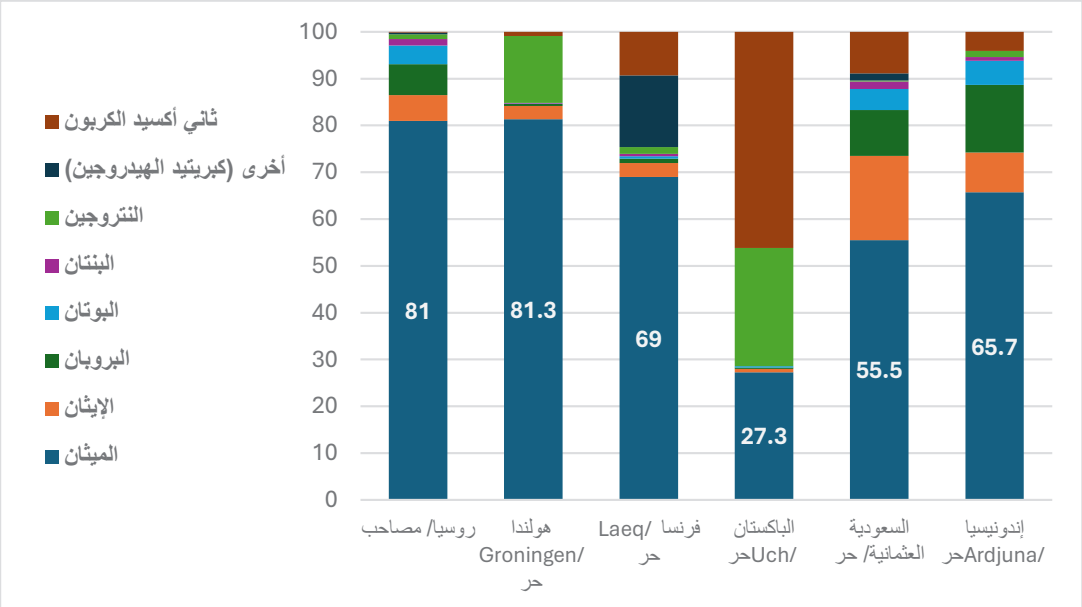
§ MRV: Monitoring, Reporting, and Verification

1-2 استخدامات الميثان

يتمتع غاز الميثان بسبب خصائصه الفيزيائية والكيميائية بمحتوى عالٍ من الطاقة عند الاحتراق، وهو عملياً حجر الزاوية في مشهد الطاقة العالمي، ذلك أن الميثان هو المكون الرئيسي للغاز الطبيعي الذي يستخدم على نطاق واسع في مختلف القطاعات، ويتكون الغاز الطبيعي وسطياً من أكثر من 90% من الميثان.

فعلى سبيل المثال، يشكل الميثان نحو 87- 97% من الغاز الطبيعي الذي ينقل عبر خطوط الغاز التابعة لشركة Union Gas في ولاية أونتاريو الكندية. ويتكون الغاز المرافق (المصاحب) في روسيا من 81% من الميثان. ومع ذلك، تظل الطبيعة عصية على القواعد الثابتة، فالتنوع في باطن الأرض يفرض تمايزاً ملحوظاً في تركيبة الغاز، إذ قد تتباين حصة الميثان تبايناً واضحاً بين الغاز الحر القابع في مكامن مستقلة، وبين الغاز المصاحب الذي يرافق النفط الخام، مما يجعل كل حقل غاز بمثابة بصمة كيميائية فريدة (Shimekit, 2012)[13]، كما هو مبين في الشكل 1.

الشكل 1: نسبة غاز الميثان في بعض حقول العالم



مصدر البيانات (Shimekit، 2012)

وربما يكون أهم استخدام للميثان هو توليد الكهرباء، حيث يُحرق الغاز الطبيعي في محطات الطاقة لإنتاج الطاقة الميكانيكية، والتي يتم تحويلها بعد ذلك إلى طاقة كهربائية. كما يستخدم في الأماكن السكنية والتجارية والصناعية على نطاق واسع لأغراض التدفئة، وتشغيل الأفران والغلايات.

علاوة على ذلك، يتم استخدام الميثان بشكل متزايد كوقود للنقل، سواء في شكله المضغوط، مثل الغاز

الطبيعي المضغوط CNG* ، أو في حالته المسالة، مثل الغاز الطبيعي المسال LNG† ، ويوفر الميثان بديلاً أنظف من الوقود السائل التقليدي في المركبات، مما يساهم في تقليل انبعاثات بعض الملوثات.

بطبيعة الحال تتفاوت مصادر الطاقة المختلفة بشكل كبير في كثافتها الطاقية (الطاقة النوعية) وتكاليفها كذلك. يتميز الميثان (الغاز الطبيعي إن صح التعبير) بطاقة نوعية عالية تبلغ حوالي 55.5 ميغا جول/كغ‡. وتتأثر تكلفته بشكل كبير بأسعار الغاز الطبيعي العالمية، وتقدّر بحوالي 2.50 دولار أمريكي/كغ، مع ملاحظة أن هذا الرقم يخضع لتقلبات السوق وعوامل التوريد. بينما يحتوي البنزين على طاقة نوعية تبلغ 45.8 ميغا جول/كغ، ويمتلك الديزل قيمة قريبة تبلغ 45.5 ميغا جول/كغ (Turns, 2013)[14].

تكشف القراءة المتأنية لهذه البيانات عن وجود علاقة دقيقة بين كثافة الطاقة والقيمة الاقتصادية لها، وهي معادلة ترسم الحدود الفاصلة بين النظري والممكن في عالم الصناعة. فالطاقة ليست مجرد أرقام صمّاء، بل هي ميزانٌ كفته الأولى تختزن القدرة الكامنة في وحدة الحجم، وكفته الثانية تقدر التكاليف الرأسمالية والتشغيلية اللازمة لاستخراجها، ويحدد هذا التوازن مدى مواءمة المصدر للتطبيقات المختلفة. فما قد يصلح وقوداً فعالاً لمحطات التوليد الثابتة قد لا يكون خياراً مجزياً لوسائل النقل، والعكس صحيح.

يستخدم الميثان أيضاً كمادة خام أساسية لتصنيع الأمونيا والميثانول والمواد الكيميائية الأخرى الضرورية لإنتاج الأسمدة والبلاستيك، والأوليفينات الخفيفة والمركبات العطرية. وقد قدّر منتدى الدول المصدرة للغاز أن نحو 230 مليار متر مكعب من الغاز الطبيعي تستخدم سنوياً في الصناعات البتروكيميائية (GECF, 2023)[15].

1-3 مصادر غاز الميثان

1-1-3: المصادر الطبيعية

على خلاف الشائع، يوجد الميثان بوفرة في الطبيعة وليس بسبب الأنشطة البشرية فقط، إذ تشير وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA, 2022)[16] إلى أن الأنشطة البشرية هي السبب وراء وجود 50- 60% من هذا الغاز في الجو، مما يعني بالتالي أن **40- 50%** منه على الأقل يتكون من **مصادر طبيعية**، منها على سبيل المثال:

*Compressed Natural Gas

† Liquified Natural Gas

‡ من باب المقارنة فقط، تمتلك بطاريات الليثيوم المستخدمة في السيارات الكهربائية طاقة نوعية أقل بكثير مقارنة بالوقود التقليدي، تتراوح بين 0.43 و 0.94 ميغا جول/كغ من وزن البطارية.

- الأراضي الرطبة التي تعدّ أكبر مصدر طبيعي للميثان، حيث تساهم بنحو 20-30% من انبعاثات الميثان العالمية. ينتج الميثان عن طريق ميكروبات لاهوائية (مولدات الميثان) تحلّل المواد العضوية في تربة فقيرة بالأكسجين ومشبعة بالمياه (Saunois, 2020)[17].
- كما يتولد غاز الميثان أثناء هضم السليلوز بواسطة الأحياء الدقيقة في أمعاء النمل الأبيض. ويساهم النمل الأبيض بنحو 1-3% من انبعاثات الميثان العالمية (Sanderson, 1996)[18].
- ويتولد كذلك في رواسب المحيطات والبحيرات والأنهار من خلال النشاط البكتيري ويتحرر الغاز مروراً بالماء إلى الغلاف الجوي (Reeburgh, 2007).[19]
- يحتجز الميثان في التربة المتجمدة (التربة الصقيعية) وتتكون هيدرات الميثان تحت سطح البحر في الشروط المناسبة، وهي هياكل بلورية تشبه الجليد حيث يتم تغليف جزيئات الميثان في أقفاص مائية. قد يؤدي ذوبان الجليد إلى إطلاق الميثان المخزن، مما قد يزيد من تركيزاته في الغلاف الجوي (Schuur, 2015)[20].
- يتسرب الميثان طبيعياً من المكامن الجوفية عبر الصدوع الجيولوجية والبراكين الطينية والفتحات البركانية. ومشاركة هذه الانبعاثات أقل من غيرها، لكنها مستمرة (Etiope &Lollar, 2013)[21].

3-1-2: المصادر البشرية

تشمل هذه المصادر عمليات إنتاج النفط والغاز والفحم الحجري، والزراعة وتربية الماشية (التخمر المعوي في الحيوانات المجترة، زراعة الأرز)، وإدارة النفايات (مدافن النفايات، معالجة مياه الصرف الصحي)، والعمليات الصناعية (إنتاج الأسمنت، الصناعات الكيميائية)، وحرق الكتلة الحيوية.

ولا يكاد يخفى على المتتبع أن هناك انحيازاً واضحاً يحاول التركيز على دور الوقود الأحفوري فقط في انبعاثات الميثان بدعوى أنه المجال الأكثر قدرة على الحد من هذه الانبعاثات، ومن أمثلة هذا الانحياز أن تقرير تتبع الميثان العالمي الصادر عن وكالة الطاقة الدولية في عام 2025 (IEA, 2025)[22]، يذكر كميات هذا الغاز مقدرة بالمليون طن عند الحديث عن عمليات الاستكشاف والإنتاج في قطاع البترول، و الاحتراق غير الكامل لشعلات المصافي، وآبار النفط والغاز المهجورة، وغاز الميثان من مناجم الفحم العاملة والمهجورة، والانبعاثات الناتجة عن احتراق الوقود (الاستخدام النهائي). لكن تقرير الوكالة نفسه عند الحديث عن الانبعاثات من إمدادات الغاز الحيوي، والنفايات والزراعة، يتناول الأمر بدون تفاصيل. وربما كان هذا معقولاً

لو أن التقارير السابقة تناولت الأمر بنفس المنهجية، لكن المستغرب أن الوكالة في تقريرها السابق الصادر في عام 2024 (IEA, 2024)[23] كانت قد فصلّت مصادر الانبعاثات بكل دقة، وهو ما يبعث على التساؤل عن سبب هذا التغير!

ويلاحظ كذلك أن تقديرات وكالة الطاقة الدولية تزيد حتى عن بيانات اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ، وهو ما يمكن ملاحظته من بيانات تقارير الوكالة بالمقارنة مع تقارير اتفاقية الأمم المتحدة، كما هو مبين في الجدول 1، وتبرر الوكالة ذلك بأن القياسات التي تقوم بها الدول أو الشركات غير دقيقة، أو أن التقارير المقدمة للأمم المتحدة غير وافية.

الجدول1 : مقارنة تقديرات انبعاثات الميثان

2023		2022		
IEA	UNFCC	IEA	UNFCC	
142.3	127.1	141.4	127.3	الزراعة
133.4	78.6	135.2	79.2	الطاقة
70.8	54.6	73	55	المخلفات
9.7	14.3	7.3	13.1	أخرى
356.2	274.6	356.9	274.6	المجموع (مليون طن)
مصدر البيانات: تقارير تتبع انبعاثات الميثان (IEA, 2023, 2024)				

بالرغم من ذلك، تشير البيانات إلى أن الزراعة هي المصدر الرئيسي من المصادر البشرية لانبعاثات هذا الغاز، وهو ما أكدته أرقام وكالة الطاقة الدولية سابقاً والتي أشارت إلى أن الزراعة تسببت في انبعاث 142 مليون طن من غاز الميثان في عام 2023، أي ما يعادل 40% من إجمالي انبعاثات ذلك العام (IEA, 2024).

1-4 تركيز غاز الميثان في الجو

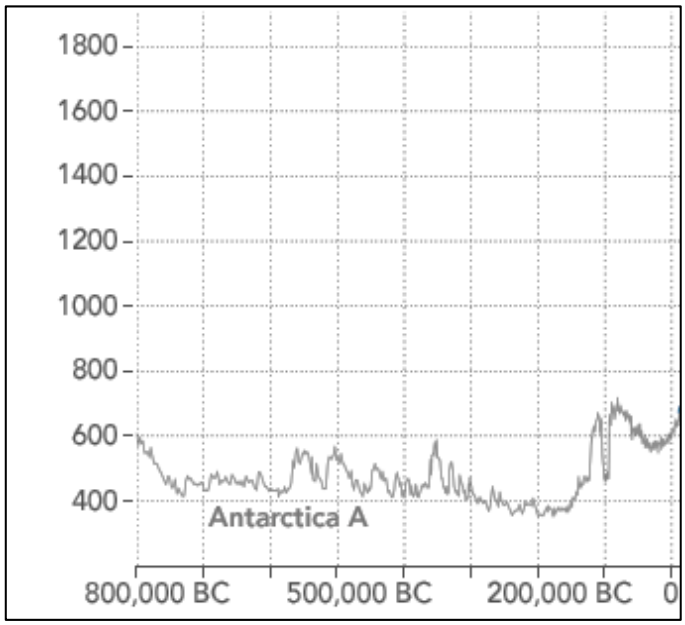
رغم أن قياس تركيز الميثان على المستوى المعملي أمر بسيط نسبياً يمكن أن يتم بعدة أجهزة مثل التحليل الطيفي بالليزر، أو باستخدام أجهزة الكروماتوغرافيا*، إلا أن قياس التركيز في الجو على مستوى العالم، أمرٌ مختلف تماماً، وغالباً ما يكون غير مباشر ويعتمد على تقديرات رياضية. فمن ضمن الأدوات التي تستخدمها وكالة ناسا جهاز (الجيل الجديد من مقياس الطيف التصويري المرئي والأشعة تحت الحمراء المحمول جواً)† وهو جهاز يثبت على طائرات الأبحاث، ويقيس الضوء المنعكس عن سطح الأرض. إذ يمتص الميثان بعضاً

* هو **جهاز تحليلي يستخدم لفصل وتحليل المركبات العضوية المتطايرة وشبه المتطايرة في العينات**، ويعتمد على مبدأ فصل مكونات الخليط بين طورين.

† AVIRIS-NG: Airborne Visible InfraRed Imaging Spectrometer - Next Generation

من هذا الضوء المنعكس، ومن خلال قياس الأطوال الموجية الدقيقة للضوء التي يتم امتصاصها، يمكن للجهاز تحديد كمية الغازات الموجودة. يتميز هذا النوع من الأجهزة بدقة عالية للقياسات الطيفية تصل إلى 95%، حيث يمكنه رصد انبعاثات الميثان عند حدود تتراوح بين 2- 10 كغ من الميثان في الساعة. وكانت الوكالة قد أضافت في عام 2022، أداة (التحقق من مصادر غبار المعادن على سطح الأرض)* إلى محطة الفضاء الدولية. ورغم أن هذه الأداة صممت أساساً لدراسة العواصف الترابية ومصادرها، فإن الوكالة تستخدمها كذلك لرصد مصادر الميثان الكبيرة تحديداً، حيث أن أقل معدل انبعاثات يمكن رصده بهذا الجهاز هو 300 كغ من الميثان في الساعة. أما في فترة ما قبل ظهور القياسات، فإن تركيز الميثان يقدر من خلال العينات الجليدية التي تحتوي على فقاعات من الغاز، وهو ما ساهم في تحديد تركيز الميثان لفترات ممتدة في عمق التاريخ تصل إلى 800 ألف سنة قبل الميلاد كما هو مبين في الشكل 2 (Voiland, 2016)[24].

الشكل 2: تركيز غاز الميثان قبل الميلاد (جزء بالمليار)



المصدر (Voiland, 2016) والقياسات من عينات من القارة القطبية الجنوبية Antarctica

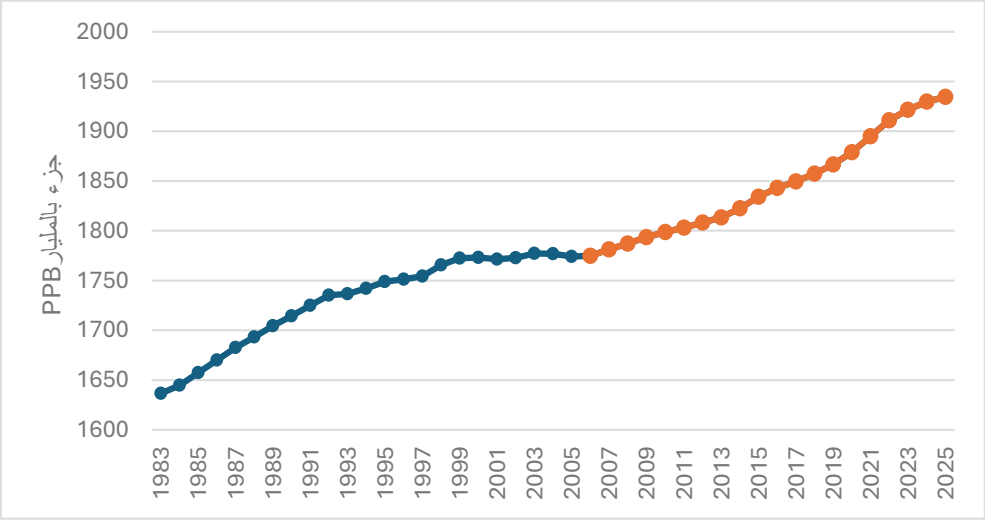
تشير تقديرات وكالة الفضاء الأمريكية إلى أن تركيز الميثان في الجو وصل في يناير 2025 إلى 1935 جزء بالمليار (0.0001935%) ، وترى الوكالة أن تركيز غاز الميثان في الجو قد تضاعف خلال 200 عام، وهو ما جعله

* EMIT: Earth Surface Mineral Dust Source Investigation

مسؤولاً عن 20- 30% من الاحترار العالمي منذ الثورة الصناعية التي بدأت في عام 1750* (NASA, 2025)[25].

عموماً يبدو من بيانات مختلف الهيئات أن تركيز غاز الميثان في الجو يرتفع بشكل تدريجي، وهو ما يمكن ملاحظته من الشكل 3، كما يبين الشكل بوضوح أن تركيز غاز الميثان (مقدراً بالجزء من المليار) ارتفع بشكل ملحوظ بعد عام 2006، وهو ما دعا العديد من الهيئات لتحري السبب. أشارت أصابع الاتهام بداية إلى التشقيق (التكسير) الهيدروليكي في الولايات المتحدة الأمريكية، إلا أن الدراسات المعمقة جعلت معظم الهيئات ومن بينها جامعة Yale الأمريكية المعروفة، تتفق على أن السبب لم يكن التشقيق الهيدروليكي أو حتى الوقود الأحفوري (Pearce, 2016)[26]. وأكدت دراسة صادرة عن الإدارة الوطنية الأمريكية للجو والمحيطات† أنه على الرغم من الزيادة الكبيرة في إنتاج الغاز الطبيعي، فلم يكن هناك اتجاه تصاعدي في الانبعاثات الصناعية (Schwietzke, 2016)[27].

الشكل 3: تركيز غاز الميثان في الجو



مصدر البيانات (NASA, 2025)[28]

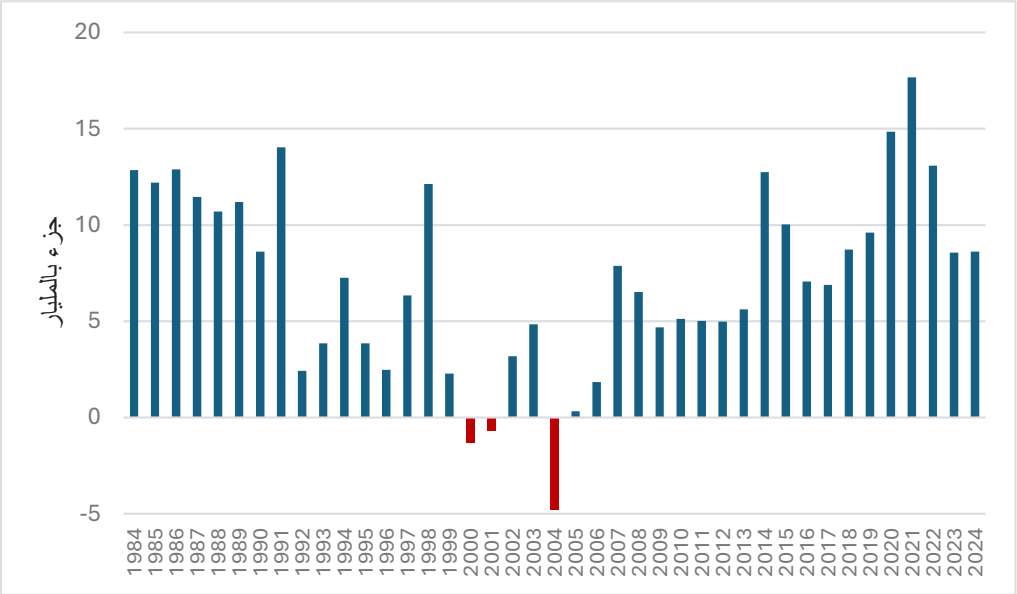
إنما يلاحظ من الشكل أيضاً أن هناك فترات تراجع فيها تركيز غاز الميثان في الجو، وهو ما يدفع للنظر في تغير معدل الزيادة السنوية للتركيز والذي يمكن تتبعه من خلال بيانات المخبر الدولي للمراقبة‡ التابع الإدارة الوطنية الأمريكية للمحيطات والغلاف الجوي، كما هو مبين في الشكل 4 (Lan et al, 2025)[29].

* ساهمت الثورة الصناعية في زيادة عدد سكان الأرض وبالتالي زيادة النشاطات البشرية.

† NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

‡ GML: Global Monitoring Laboratory

الشكل 4: الزيادة السنوية في تركيز غاز الميثان في الجو



مصدر البيانات: (Lan et al, 2025)

يبين الشكل 4 وجود بضع سنوات تراجع فيها نمو التركيز، وقد حاولت العديد من الدراسات تقصّي السبب وراء ذلك التراجع، دون أن تقدم أي منها سبباً وافياً، وإن كان بعضها أشار إلى أن السبب الرئيسي ربما يعزى إلى أن الانبعاثات من المصادر البشرية (مثل الزراعة، وإنتاج الوقود الأحفوري، ومدافن النفايات) لم تشهد زيادة كبيرة في تلك الفترة (Pison et al, 2013)[30].

وربما تجدر الإشارة هنا إلى دراسة حاولت رصد التذبذبات في التغيرات السنوية لتركيز الميثان خلال الفترة من 1970 إلى 2012 باستخدام نموذج عالمي (Oslo CTM3). وعمل الباحثون على تقييم شامل لبيانات مواقع القياس السطحي ضمن الشبكات الدولية، مختارين مجموعة فرعية منها مناسبة للمقارنة مع نتائج النموذج. ثم جرت مقارنة بين نتائج النموذج وبين بيانات الرصد لفهم أسباب التذبذبات طويلة الأمد والتقلبات قصيرة الأمد.

خلصت الدراسة التي شارك بها باحثون من النرويج وإسبانيا والولايات المتحدة (Dalsøren et al, 2016)[31] إلى أن التغيرات في انبعاثات الأراضي الرطبة هي المحرك الرئيسي للتغيرات السنوية في تركيز الميثان. أما بالنسبة للاتجاهات طويلة الأمد، فلا يزال سببها محل جدل واسع. ولم يتم التوصل إلى إجماع حول المساهمة النسبية لكل قطاع من قطاعات الانبعاثات، ولا حول نسبة المصادر الطبيعية مقارنة بالمصادر البشرية. كما لحظت الدراسة بعض التباينات الكبيرة في أداء النموذج، مما أثار تساؤلات حول دقة بيانات انبعاثات الميثان في بعض المناطق والفترات الزمنية. وأكدت الدراسة أنه بعد فترة من استقرار مستويات الميثان بين عامي 2000

و2006، لوحظ ارتفاع في المستويات بدءاً من عام 2006 في نصفي الكرة الأرضية. ومنذ عام 2006، تم المبالغة في تقدير النمو في جميع المناطق بالنموذج، وخاصة في آسيا. وقد أثّر النمو الكبير في الانبعاثات الآسيوية على اتجاهات الميثان في معظم مناطق العالم.

كما أوضحت الدراسة نقطة في غاية الأهمية إذ يعتمد تطور تركيز الميثان في النموذج على التغيرات في فقدان الميثان من الغلاف الجوي. حيث يعد عمر الميثان مؤشراً على معدل فقدانه. وقد أظهرت المحاكاة أن عمر الميثان انخفض بأكثر من 8% بين عامي 1970 و2012. ويعزى هذا التغير الكبير إلى زيادة قدرة الغلاف الجوي على الأكسدة. وهو ما عزته الدراسة نظرياً إلى تفاعلات معقدة بين عدد من المكونات الكيميائية والعوامل المناخية حيث أظهر التحليل أن العوامل الرئيسية لهذا التطور هي التغيرات في الرطوبة النوعية، ونسبة انبعاثات أكاسيد النيتروجين المختلفة NO_x إلى CO ، وانبعاثات NO_x الناتجة عن البرق، وإجمالي حجم الأوزون.

ومن الملاحظ كذلك بناء على البيانات المتاحة، أن تركيز غاز الميثان في الجو (الشكل 3) تراجع رغم استمرار معدلات نمو إنتاج النفط والغاز بين عامي 1999 و2006. ولم يكن هناك تفسير لذلك إلا بتفكك الاتحاد السوفيتي السابق، إذ كانت خطوط الأنابيب التي تنقل كميات ضخمة من الغاز الطبيعي من حقول سيبيريا إلى أوروبا تعاني من تسريبات كثيفة، فأدى انهيار الاتحاد السوفيتي في عام 1991 إلى انخفاض حاد في الإنتاج أولاً، ثم أعقبه دخول التكنولوجيا الغربية التي ساعدت بشكل كبير في سد التسريبات وتقليل الفاقد.

1-5 طرق قياس وتقدير انبعاثات الميثان

تنقسم طرق قياس وتقدير انبعاثات الميثان إلى نوعين رئيسيين*:

من الأصغر إلى الأكبر bottom-up أي قياس الانبعاثات من مصادر فردية ثم تعميمها. و من الأكبر إلى الأصغر top-down حيث يقاس تركيز الميثان في الغلاف الجوي لاستنتاج الانبعاثات ضمن نطاقات معينة. ولكل منهما نقاط قوة وضعف لذلك قد تستخدمان معاً للتحقق من صحة ودقة التقديرات.

- الطرق من الأكبر إلى الأصغر (من الأعلى إلى الأسفل)

تعتمد على قياسات تركيز الميثان في الغلاف الجوي لتقدير الانبعاثات ضمن مساحات واسعة مثل المدن أو المناطق أو حتى على المستوى العالمي، وهي تفيد في تحديد مناطق الانبعاثات الكبيرة ومقارنة الفروق مع

* هناك العديد من التقنيات المستخدمة، وتم استعراض بعضها بشكل مبسط، إذ أن الآلية التفصيلية لهذه القياسات ليست ضمن نطاق الدراسة.

التقديرات التي نتجت عن تقنيات الأصغر إلى الأكبر. ومن بين هذه الطرق:

- القياسات الأرضية: وهي أنظمة قياس متنقلة على مركبات مزودة بأجهزة ليزر دقيقة تكشف عن تركيزات الميثان عند مستوى الشوارع، مما يساعد على تحديد التسريبات بسرعة من شبكات توزيع الغاز الطبيعي (Maazallahi et al, 2023)[32]
- الاستشعار الجوي والفضائي عن بعد: تستخدم فيه طائرات عادية، أو طائرات بدون طيار، وأقمار صناعية مجهزة بحساسات ليزرية خاصة تقيس تركيزات الميثان على مساحات واسعة. وهناك العديد من الأقمار الصناعية التي تتبع لجهات مختلفة تقدم بيانات على النطاق الإقليمي والعالمي لتحديد مصادر الانبعاث الكبيرة وفهم الاتجاهات الإقليمية (Kuze et al, 2016).
- النمذجة العكسية: وهي تقنية حسابية تدمج قياسات تركيزات الغازات الجوية مع نماذج محاكاة افتراضية في محاولة لتحديد المواقع والمعدلات المحتملة للانبعاثات بناءً على تراكيز الميثان المرصودة (Environmental Defense Fund, 2019)[33].

- الطرق من الأصغر إلى الأكبر (من الأسفل إلى الأعلى)

- تقنيات الحجرة: طريقة شائعة خاصة للمصادر الزراعية، مثل أماكن تربية الحيوانات أو مقالب النفايات، حيث تستخدم حجرات تنفس أو حجرات تدفق Chambers لجمع وقياس تركيز الميثان (Kuze et al, 2016)[34]. في حالة الحيوانات مثلاً، يتم احتجازها داخل حجرة لفترة ما، ويقاس تركيز الميثان في الهواء الداخل والخارج لحساب معدل الانبعاثات. أما للأسطح مثل التربة أو الروث، فتوضع الحجرة على السطح لالتقاط الغاز وقياس الزيادة في تركيز الميثان لفترة قصيرة لتحديد التركيز وبالتالي الانبعاثات، مما يوفر قياسات دقيقة في هذا النوع من البيئات (Storm et al, 2012)[35].
- تقنيات غازات التتبع: تنطوي على إطلاق كمية معروفة من غاز تتبع مثل سداسي فلوريد الكبريت* SF_6، ويتم قياس نسبة غاز التتبع إلى الميثان في اتجاه حركة الغاز لحساب معدل انبعاث الميثان. تستخدم هذه التقنية خصوصاً مع الحيوانات في المراعي أو في المصادر الصناعية المنفردة (Storm et al, 2012).
- القياسات من مصادر نقطية: تستخدم في أماكن المصادر الصناعية مثل التسريبات في الأنابيب

* sulfur hexafluoride

أو الفتحات، ويمكن إجراء قياسات مباشرة بأدوات متنوعة مثل أجهزة تحليل محمولة أو أكياس معايرة سلفاً بهدف التقاط الغاز وتحديد كمياته ، مما يسمح بحساب دقيق للانبعاثات من نقاط محددة (EPA, 2016)[36].

5 -1 -1: برامج كشف التسرب وإصلاحه (LDAR)

من بين الطرق المصنفة ضمن محور (من الأصغر إلى الأكبر)، برامج كشف التسرب وإصلاحه (LDAR)*، والتي تعد من الركائز الأساسية في استراتيجيات الحد من انبعاثات غاز الميثان في قطاع النفط والغاز.

تهدف هذه البرامج بشكل رئيسي إلى تحديد ومعالجة الانبعاثات غير المقصودة، والتي تعرف بالانبعاثات الهاربة†، الناتجة عن المعدات والوصلات المختلفة مثل الصمامات وغيرها.

تكمن أهمية برامج LDAR في كون الانبعاثات الهاربة تمثل أحد أكبر مصادر انبعاثات الميثان في الصناعة النفطية. وما يميز هذه البرامج هو إمكانية البدء في تنفيذها دون الحاجة إلى بيانات شاملة أو قياسات دقيقة مسبقة لمستويات الانبعاثات، حيث يمكن للمشغلين البدء فوراً في إجراء مسوحات الكشف وإصلاح التسربات المكتشفة، مما يؤدي إلى خفض فوري في الانبعاثات.

5 -1- 2: المكونات الأساسية لتصميم برامج LDAR

تتأثر فعالية برامج LDAR بعدة اعتبارات تصميمية وتنظيمية، منها :

1. **نطاق المرافق المشمولة:** يتم تحديد المنشآت التي يجب فحصها، مع إمكانية استثناء المنشآت الصغيرة أو البعيدة أو المكونات التي يشكل فحصها خطراً على السلامة.
2. **تقنيات الكشف:** تتنوع الوسائل المستخدمة من الفحص البصري والسمعي والشمي (AVO) البسيط وغير المكلف، إلى استخدام أجهزة المراقبة المحمولة وكاميرات التصوير البصري للغاز (OGI) الأكثر دقة وفعالية.
3. **وتيرة التفتيش:** تؤثر عدد مرات الفحص (سنوياً أو بشكل دوري) على قدرة البرنامج في خفض الانبعاثات، حيث تساهم المسوحات المتكررة في كشف التسربات وإصلاحها بشكل أسرع، رغم تكلفتها الإضافية.
4. **متطلبات الإصلاح:** تضع اللوائح جداول زمنية محددة لإتمام الإصلاحات (مثل 30 يوماً)، مع توفير مرونة في حال تطلب الإصلاح إيقافاً كاملاً للمنشأة.

---

* Leak Detection And Repair

† Fugitive Emissions

5. **إدارة البيانات والتقارير:** يلزم المشغلون بتوثيق عملية الكشف والإصلاح والاحتفاظ بالسجلات وتقديم تقارير دورية للجهات التنظيمية.

5 -1- 3: مثال عن برنامج LDAR- كندا

وضعت الحكومة الفيدرالية الكندية في عام 2018، لائحة متطلبات وطنية لبرامج (LDAR) تتضمن العديد من الاعتبارات التي وردت أعلاه (US DOC, 2024)[37]:

نطاق المرافق المشمولة بالفحص

تنطبق اللائحة الكندية على المرافق الكبيرة فقط، وهي تغطي بشكل عام جميع مرافق النفط والغاز في مرحلة التنقيب والإنتاج، بما في ذلك منصات الآبار ومحطات الضغط التي تنتج أو تتعامل مع أكثر من 60 ألف متر مكعب من الغاز الطبيعي سنوياً.

يستثني القسم 28(1) من اللائحة صراحةً بعض المعدات من متطلبات (LDAR)، وهي:

A. مكونات المعدات المستخدمة في رأس بئر بموقع لا يوجد فيه أي رأس بئر آخر أو معدات أخرى، باستثناء وجود أنابيب تجميع أو عداد متصل برأس البئر.

B. زوج من صمامات العزل على خط أنابيب نقل إذا لم تكن هناك معدات أخرى تقع ضمن الجزء من خط الأنابيب الذي يمكن عزله بإغلاق هذه الصمامات.

C. مكونات المعدات المستخدمة في منشأة نفط وغاز قد يشكل فحصها خطراً جسيماً على صحة الإنسان أو سلامته.

من خلال تحديد المرافق أو المعدات أو الظروف المستثناة، تركز اللائحة الكندية عمليات التفتيش على مصادر التسرب الأكثر أهمية لتحقيق تخفيضات ملموسة. فعلى سبيل المثال، ونظراً لأن التسربات غالباً ما تحدث من المكونات أو المعدات في المنشأة، يتم استثناء المواقع التي تحتوي على رؤوس آبار فقط مع عدد قليل من المكونات ولا توجد بها معدات أخرى (مثل خزانات التخزين، والضواغط، وما إلى ذلك) بسبب انخفاض احتمالية حدوث تسربات. وبالمثل، يتم استثناء صمامات العزل في خطوط أنابيب النقل في الفقرة (B) لأن احتمالية الانبعاثات من هذه المكونات في تلك المرافق منخفضة. ويغطي الاستثناء الثالث في الفقرة (C) أي حالة قد يشكل فيها التفتيش خطراً على صحة الإنسان أو سلامته، مما يوفر وضوحاً أقل بشأن المواقع التي قد ينطبق عليها هذا الاستثناء.

يمكن للاستثناءات أن تقلل الأعباء على المشغلين، ولكنها قد تؤدي إلى إغفال انبعاثات ميثان كبيرة، كما قد تضع عبئاً على الجهة التنظيمية لمعالجة طلبات الاستثناء.

وقد حددت كندا نوعين من الأدوات المؤهلة للاستخدام في عمليات التفتيش:

1. أجهزة مراقبة محمولة تستوفي مواصفات تشغيل ومعايرة معينة.
2. أجهزة التصوير البصري للغاز (OGI) القادرة على تلبية متطلبات كشف محددة.

ينص قسم من اللائحة على أن أجهزة المراقبة المحمولة يجب أن تتوافق مع متطلبات وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA) من حيث المواصفات والتطبيق والمعايرة، ومن خلال الإشارة إلى مواصفات قائمة لدى جهة تنظيمية أخرى، تتجنب القاعدة الكندية الحاجة إلى تطوير معيار تقني مفصل، مع ضمان الاتساق للمشغلين الذين يتعين عليهم الامتثال لنفس المواصفات في نطاقات عملهم.

كما تحدد اللائحة مواصفات دقيقة لكاميرات (OGI)، إذ تتطلب عتبة تركيز تبلغ (500 جزء في المليون من الميثان حجماً كحد أقصى، وبمعدل تدفق لا يقل عن 60 (جراماً/ساعة) يتسرب من فوهة قطرها 0.635 سنتيمتراً)، وتتضمن اللائحة أيضاً متطلبات تتعلق بمسافة الرؤية. وبطبيعة الحال قد يستلزم فرض استخدام هذه الأجهزة تكاليف تتعلق بالتدريب والمعدات، إلا أنها قادرة على كشف التسربات التي قد تغفل عنها الطرق الحسية (سمع، بصر، شم).

من جهة ثانية، تسمح اللوائح الكندية للمشغلين بإنشاء برنامج (LDAR) بديل، متوافق مع اللائحة الكندية، بشرط أن يتضمن البرنامج البديل العناصر التالية: التفتيش عن التسربات، وتشغيل وصيانة ومعايرة أدوات كشف التسرب، وإصلاح التسربات التي يتم اكتشافها.

تسمح هذه المرونة للمشغل باستخدام أداة غير مدرجة بشكل مباشر في اللوائح، أو إجراء التفتيش بمدد زمنية (وتيرة) مختلفة. ويضع استخدام برنامج بديل العبء على عاتق المشغل لإثبات فعالية البرنامج من خلال وثائق داعمة يجب تقديمها إلى الجهة التنظيمية .

وتحدد اللوائح الكندية الجداول الزمنية لعمليات التفتيش الأولية واللاحقة على النحو التالي :

- يجب إجراء التفتيش الأول خلال 60 يوماً من تاريخ بدء الإنتاج الفعلي في المنشأة.
- بالنسبة لعمليات التفتيش اللاحقة، يجب إجراؤها ثلاث مرات سنوياً على الأقل، مع ضرورة وجود فاصل زمني بمعدل 60 يوماً بين كل عمليتي تفتيش. ويلاحظ أن هذه الوتيرة تمنح للمشغلين مرونة في تحديد أفضل جدول زمني للتفتيش عبر مرافق متعددة ضمن الحدود التي وضعتها اللوائح .

متطلبات إصلاح التسربات

تفرض اللوائح الكندية إصلاح التسربات المكتشفة، وتختلف المواعيد النهائية للإصلاح بناءً على سهولة التنفيذ، فإذا كان من الممكن إجراء الإصلاح أثناء تشغيل المكون، فيجب على المشغل إتمامه في غضون 30 يوماً من تاريخ اكتشافه. أما في الحالات التي يتطلب فيها الإصلاح إيقاف المنشأة، يمكن تأجيله حتى موعد التوقف التالي المخطط له ضمن المنشأة. وتحدد اللائحة موعد التوقف التالي بناءً على حجم التسرب مقارنة بالانبعاثات التي قد تنتج عن عملية الإصلاح نفسها، وبحيث لا يتجاوز موعد التوقف التاريخ الذي يتساوى فيه حجم الغاز المتوقع تسربه (بدون إصلاح) مع حجم الغاز الذي سيتم تفريغه (Purging) من المعدات لغرض الإصلاح. بمعنى آخر، بما أن إيقاف التشغيل قد يتطلب تنفيس الغاز الموجود داخل المكونات، يجب جدولة الإصلاح قبل أن تتجاوز الانبعاثات التراكمية الناتجة عن التسرب حجم الانبعاثات المتوقعة جراء عملية الإغلاق .

السجلات والوثائق الداعمة

عموماً، تلزم اللوائح الكندية المشغلين بإنشاء والاحتفاظ بسجلات تفصيلية تشمل كل عملية معايرة لأدوات التفتيش، وتواريخ عمليات التفتيش، ونوع وموقع المعدات باستخدام إحداثيات (GPS)، إضافة إلى نوع الجهاز المستخدم في الفحص. وفي حالة استخدام كاميرات (OGI) يجب تسجيل صور تتضمن مؤشرات مدمجة للتاريخ والوقت. كما يجب إنشاء سجلات تفصيلية تبين التسربات المكتشفة وتوثيق الخطوات المتخذة لإصلاحها، وذلك في غضون 30 يوماً من توفر المعلومات، وتقديمها خلال 60 يوماً عند الطلب، والاحتفاظ بها لمدة 5 سنوات.

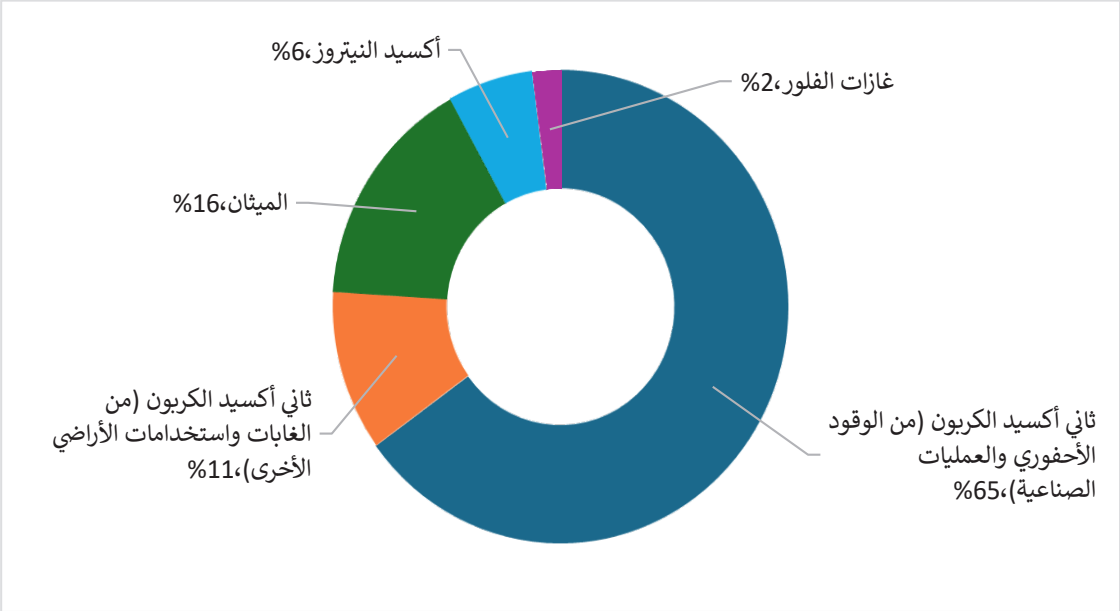
ومن الواضح أن هذا الإطار التنظيمي الذي تفرضه كندا، يساهم في تقليل العبء الإداري المستمر على الجهة التنظيمية مع ضمان وصولها إلى المعلومات عند الحاجة، وتشدد اللوائح على أن عدم الامتثال لمتطلبات التقارير أو أي أحكام أخرى ضمن اللوائح قد تؤدي إلى فرض عقوبات مالية على المشغل.

1-6 آلية تأثير غاز الميثان على البيئة

يرى المنتدى الاقتصادي العالمي* أن الميثان يشكل 16% من إجمالي غازات الدفيئة (WEF, 2022)[38]، كما هو مبين في الشكل 5.

* WEF: World Economic Forum

الشكل 5: نسب غازات الدفيئة في الجو



مصدر البيانات: (WEF, 2022)

ولقياس إمكانية أي غاز على المساهمة في الاحتباس الحراري، تتم مقارنته مع غاز ثاني أكسيد الكربون الذي يستخدم كنقطة مرجعية تعطى القيمة 1. على سبيل المثال، إذا كانت قدرة غاز ما على المساهمة في الاحترار العالمي 50، فهذا يعني أن طناً واحداً منه يتسبب بمتوسط الاحترار نفسه الذي ينتج عن 50 طناً من ثاني أكسيد الكربون.

للميثان عمر في الغلاف الجوي قد لا يتجاوز 12 عاماً، مقارنة بغاز ثاني أكسيد الكربون الذي قد يبقى لقرون، إلا أن الميثان يتكون من ذرة كربون وأربع ذرات هيدروجين متوضعة ضمن بنية تسمح لها بامتصاص أطوال موجية من الأشعة تحت الحمراء أكثر مما يفعله غاز ثاني أكسيد الكربون، مما يعني أنه أكثر قدرة على المساهمة في الاحتباس الحراري، حيث يمتص الطاقة ويعيد إصدارها سواء نحو الأرض أو نحو الغلاف الجوي. وهذا ما يجعل قدرته على حبس الحرارة في الغلاف الجوي أعلى بمعدل 28- 84 مرة من ثاني أكسيد الكربون خلال 20 عاماً، و 34 مرة خلال 100 عام (US EPA, 2023)[39]

علاوة على ذلك، يساهم الميثان في تكوين الأوزون الأرضي (التروبوسفيري) من خلال دوره كمسبِّب طويل الأمد في التفاعلات الكيميائية الجوية (Butler & Lupascu, 2020)[40]. حيث يتأكسد الميثان في الغلاف الجوي، بشكل رئيسي بواسطة جذور الهيدروكسيل (OH) منتجاً جذور ميثيل بيروكسي (CH_3O_2) وهيدرو بيروكسي (HO_2). تعدّ هذه الجذور وسائط رئيسية في سلسلة التفاعلات التي تؤدي إلى تكوين الأوزون. ففي وجود أكاسيد النيتروجين (NO_x) وأشعة الشمس، تتفاعل جذور البيروكسي هذه مع أول أكسيد النيتروجين

(NO) لتكوين ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2)، الذي يتحلل بدوره ضوئياً محرراً الأكسجين الذري (O)، الذي يتحد مع الأكسجين الجزيئي (O_2) لإنتاج الأوزون (O_3) الذي يعتبر أيضاً من الغازات المسببة للاحتباس الحراري.

1-7 الآثار الصحية للميثان

لا يعتبر غاز الميثان ساماً بالمعنى التقليدي، أي أن استنشاقه بتراكيز منخفضة أو متوسطة لا يسبب تسمماً كيميائياً، لكن خطورته تظهر عند وجوده بتراكيز عالية إذ يزيح الأكسجين من الهواء، مما يرفع من خطورة الاختناق. وهو ما يظهر في بعض الكهوف مسبباً حوادث مؤسفة، سجل أحدها في شهر يوليو 2025، حيث قضى اثنا عشر جندياً تركياً نحبهم بسبب تسربات غاز الميثان (CBS News, 2025)[41] خلال عملية عسكرية شملت تفتيش أحد الكهوف.

وينظر إلى الميثان كمؤثر على جودة الهواء، خاصة من ناحية مساهمته في تكوين الأوزون، الذي قد يسبب تلف الشعب الهوائية، ويثير نوبات الربو، ويؤدي لتفاقم أمراض الرئة.

وترى بعض الأبحاث أن التعرض الطويل للأوزون يمكن أن يؤدي إلى الوفاة المبكرة بسبب أمراض الجهاز التنفسي، وأمراض القلب والأوعية الدموية، وحتى السرطان (Nguyen et al, 2023)[42]. وقد حدد التقييم العالمي للميثان* لعام 2022 علاقة خطية بين الأوزون والميثان - فكلما زادت تركيزات الميثان، زاد تركيز الأوزون، وتشير التقديرات إلى أن ما بين 1.04 و1.23 مليون حالة وفاة تنفسية لدى البالغين الذين تزيد أعمارهم عن 30 عاماً مرتبطة بالتعرض للأوزون الأرضي (Malley et al, 2017)[43].

ينبعث الميثان عادةً مع ملوثات أخرى تؤدي إلى نتائج صحية سلبية. فعلى سبيل المثال، في قطاع الطاقة، يطلق تنفيس الغاز الطبيعي وإشعاله غازَ الميثان إلى جانب المركبات العضوية المتطايرة (VOCs) التي يمكن أن تكون مسرطنة، وتؤثر على الجهاز العصبي، أو تسبب عيوباً خلقية. ويمكن أن يؤدي استخدام مواقد الطهي التي تعمل بالغاز في المنازل إلى تسرب الميثان إلى جانب أكسيد النيتروجين مما قد يتسبب في زيادة حالات الربو وأمراض الجهاز التنفسي.

وفي قطاع الزراعة، تطلق عملية إزالة الأشجار والنباتات من خلال إشعال الحرائق غاز الميثان، إلى جانب الكربون الأسود والجسيمات الدقيقة والمركبات العضوية المتطايرة، مما يفاقم أمراض الجهاز التنفسي ويؤثر

* UN Global Methane Assessment

على الصحة الرئوية.

من جهة أخرى، تنتج حرائق مكبات النفايات، التي يشعلها الميثان الناتج عن تحلل النفايات العضوية، الكربون الأسود وأول أكسيد الكربون، مما يهدد صحة وسلامة المجتمعات القريبة، كما يمكن أن تساهم الملوثات المصاحبة للميثان في تكوين ملوثات هوائية أخرى، مثل أكاسيد النيتروجين آنفة الذكر.

علاوة على ما سبق، يعد الميثان، في ظل تركيزاته العالية، شديد الاشتعال والانفجار، مما يؤدي إلى إصابات وخسائر في الأرواح نتيجةً للأنشطة في قطاع الوقود الأحفوري. وقد حدث وأدت تسربات الميثان من أنابيب الغاز الطبيعي إلى حرائق وانفجارات مميتة. ففي الولايات المتحدة، على سبيل المثال، تسببت أنابيب الوقود الأحفوري في أكثر من 5500 حادث، و800 حريق، و300 انفجار، و600 إصابة، و125 حالة وفاة (UNEP, 2021)[44]

وعند وجود الميثان بتراكيز عالية في مناجم الفحم سيئة التهوية، يمكن أن يتسبب في حدوث انفجارات، كما حصل في حادثة عام 2022 التي أودت بحياة تسعة عمال نتيجة انفجار منجم فحم في إندونيسيا (Daily Sabah, 2022)[45].

وفي قطاع الصرف الصحي، يمكن أن يكون لسوء إدارة النفايات الصلبة ومعالجة مياه الصرف الصحي آثار مدمرة أيضاً. إذ قد يؤدي عدم انتظام جمع النفايات إلى تراكم النفايات العضوية، والتي - في ظل الظروف الحارة والرطبة - تتحلل بسرعة وتنتج غاز الميثان.

1-8 الآثار الاجتماعية لانبعاثات غاز الميثان

تعتبر الدراسة التي أجراها فريق من مختبر لورانس بيركلي الوطني وجامعة كاليفورنيا في Berkeley Lab، إضافة جوهرية للفهم العلمي والاقتصادي لانبعاثات الميثان (Frank et al, 2021)[46].

ولتوضيح أهمية الدراسة، من الضروري أولاً تعريف المفهوم الأساسي الذي تدور حوله، وهو: التكلفة الاجتماعية للميثان Social Cost of Methane وهي مقياس يستخدم لتقدير الأضرار الاقتصادية الإجمالية طويلة الأجل التي تنتج عن انبعاث طن متري إضافي واحد من غاز الميثان في الغلاف الجوي. تترجم هذه الأضرار إلى قيمة نقدية بالدولار، وتشمل مجموعة واسعة من التأثيرات التي يتسبب فيها تغير المناخ، مثل:

- الأضرار الاقتصادية المباشرة: كالخسائر في الإنتاج الزراعي، وتدمير البنية التحتية جراء الكوارث الطبيعية كالعواصف والفيضانات، وزيادة تكاليف الطاقة المرتبطة بتكييف الهواء.

- المخاطر الصحية: تزايد الأمراض المرتبطة بارتفاع درجات الحرارة، وهو ما تمت الإشارة إليه آنفاً.
- التأثيرات البيئية: مثل فقدان التنوع البيولوجي وتدهور النظم البيئية.

تستخدم هذه الأداة لمساعدة صناع السياسات والشركات على موازنة التكاليف الحالية لتقليل الانبعاثات (مثل الاستثمار في تكنولوجيا نظيفة) مقابل الفوائد المستقبلية المتمثلة في تجنب هذه الأضرار. فهي توفر إطاراً لاتخاذ قرارات اقتصادية رشيدة وفعالة في مجال السياسات المناخية.

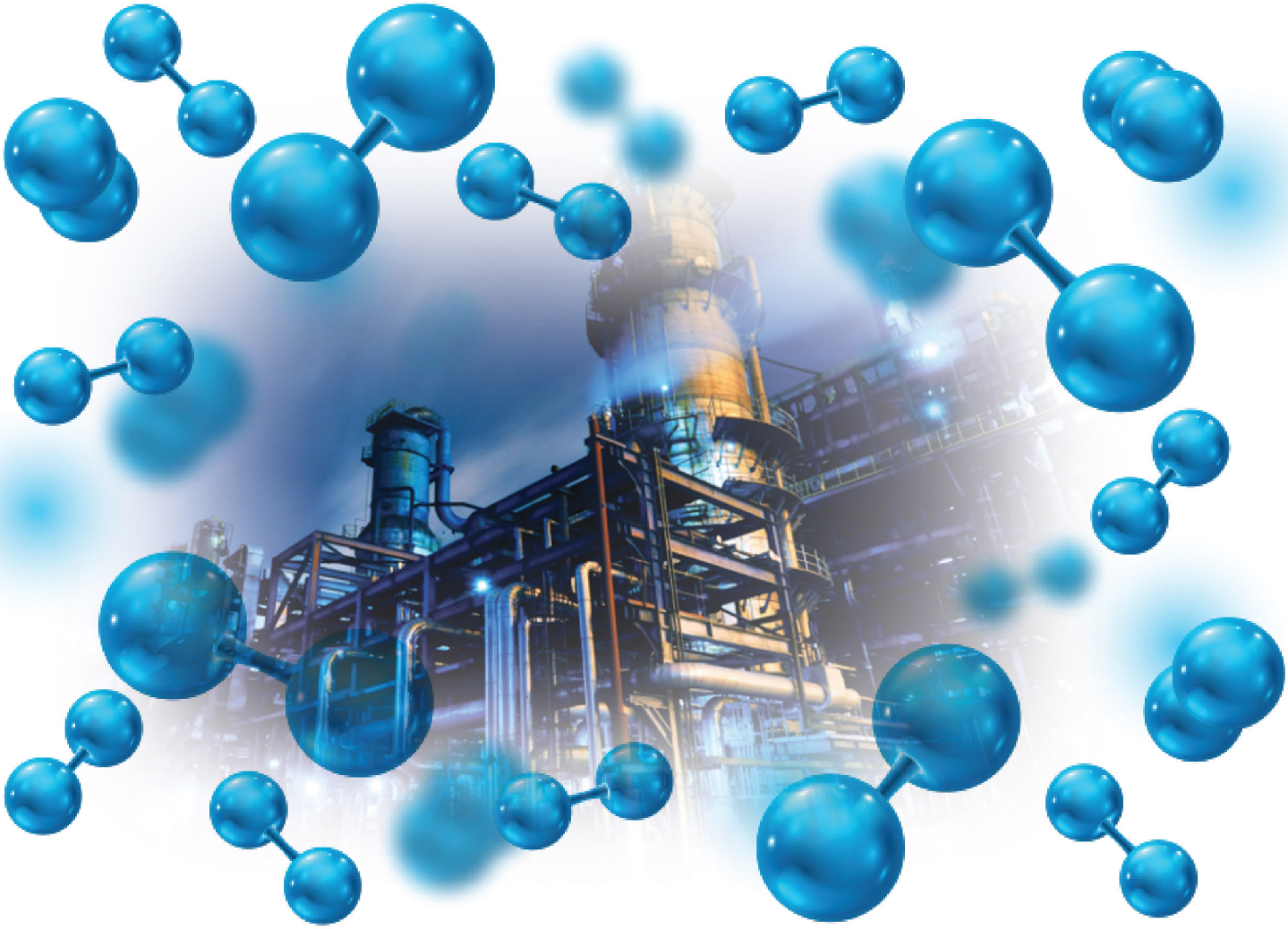
وسّعت هذه الدراسة نطاق المفهوم الحيوي للآثار الاجتماعية للميثان، وقدمت مجموعة رؤى هامة، مثل:

- التفاوت الجوهري في التكلفة الاجتماعية للميثان بين المناطق: النتيجة الأكثر وضوحاً في الدراسة هي أن التكلفة الاجتماعية للميثان ليست قيمة عالمية ثابتة، بل تختلف بشكل كبير اعتماداً على المنطقة الجغرافية ومستوى التطور الاقتصادي. إذ أظهرت الدراسة أن قيمة هذه التكلفة في المناطق الصناعية الغنية يمكن أن تكون أعلى بعشر مرات منها في المناطق النامية. ففي الولايات المتحدة على سبيل المثال، قفزت التكلفة الاجتماعية للميثان إلى 8,040 دولاراً للطن. هذا الارتفاع يعكس أن المجتمعات الغنية لديها القدرة الاقتصادية على تقدير الخسائر بالدولار بشكل مختلف عن المناطق الفقيرة. بينما في دول أفريقيا انخفضت التكلفة إلى 130 دولاراً للطن. هذا الانخفاض لا يعني أن تأثيرات تغير المناخ أقل وطأة على هذه المناطق، بل على العكس، فإن نفس التأثير المناخي يسبب خسارة أكبر في الرفاهية للمناطق ذات الدخل المنخفض، ولكن القيمة النقدية المقدرة لتلك الأضرار تكون أقل بسبب التفاوت الاقتصادي. وهذا التباين يوضح أن استخدام قيمة عالمية واحدة ومتوسطة، يمكن أن يكون مضللاً وغير دقيق عند وضع السياسات المحلية، لأنه يتجاهل حقيقة أن الأضرار تعاني منها المناطق الفقيرة بشكل أكبر، حتى لو كانت القيمة الدولارية المقدرة لها أقل.
- دور "العدالة والإنصاف" كمصدر رئيسي لعدم اليقين: لطالما اعتقد العلماء أن أكبر مصدر لعدم اليقين في تقدير التكلفة الاجتماعية للميثان يأتي من الجانب الفيزيائي، أي صعوبة تقدير مدى تأثير الميثان على الاحترار العالمي بدقة. لكن الدراسة قدمت تحولاً في هذا الفهم، إذ يشير الباحثون المشاركون في الدراسة إلى أن التقدم في علم المناخ قد قلل من عدم اليقين في الجانب الفيزيائي، بينما بات عدم اليقين الأكبر يأتي من الجانب الاجتماعي والاقتصادي، وتحديداً من كيفية تقدير الأضرار وأخذ قضايا الإنصاف والعدالة في الاعتبار. لذلك، تؤثر العديد من العوامل على التكلفة الاجتماعية للميثان، مثل كيفية اختيار المجتمعات أن تتطور في المستقبل. على سبيل المثال: هل ستبنى المدن على طول

السواحل المعرضة للفيضانات، أم ستتحرك بعيداً عن المناطق المعرضة للكوارث؟ هذه القرارات، التي يصعب التنبؤ بها، تزيد من عدم اليقين في تقدير الأضرار المستقبلية. وهنا تؤكد الدراسة أن تبني سياسات أكثر قوة للتخفيف من تغير المناخ سيؤدي إلى انخفاض حاد في التكلفة الاجتماعية للميثان، مما يسلط الضوء على العلاقة المباشرة بين الإجراءات السياسية والقيمة الاقتصادية للتأثيرات المناخية.

- أجرت الدراسة تصحيحاً فنياً لتقديرات التكلفة الاجتماعية للميثان التي كانت سارية في عهد إدارة الرئيس أوباما (حوالي 1,400 دولار للطن)، مما أدى إلى تقدير متوسط عالمي جديد يبلغ 922 دولاراً للطن المتري. وربما كان لهذا التغيير في القيمة أهمية كبيرة، ولكنه يتضاءل مقارنة بالنتيجة الأوسع والأكثر أهمية حول التفاوت الإقليمي.

عموماً، قدمت الدراسة تحولاً في كيفية التفكير في التكلفة الاجتماعية للميثان، وأوضحت أن معالجة عدم المساواة الاقتصادية والعدالة البيئية يجب أن تكون في صميم أي تقييم دقيق للتكاليف والأضرار المناخية. أي أنها أوضحت بشكل علمي أن السياسات المناخية التي تتجاهل التفاوت الاقتصادي تفاقم الظلم وتضع عبئاً أكبر على المناطق الفقيرة.



الفصل الثاني

غاز الميثان المنبعث عن الوقود الأحفوري

2- 1 غاز الميثان المنبعث من مناجم الفحم الحجري

تتداول صناعة الفحم مصطلحاً أو اختصاراً هو CMM*، يشير هذا المصطلح إلى غاز الميثان المنبعث من الفحم الحجري وطبقات الصخور المحيطة به نتيجة لأنشطة التعدين المختلفة. ومثل أي مصدر آخر، يشكل هذا الميثان في المناجم خطراً على السلامة لقدرته الانفجارية عند اختلاطه بالهواء. تولّد غاز الميثان في تكوينات الفحم القديمة في نفس وقت تكون الفحم، عندما تحولت بقايا النباتات (مثل تلك الموجودة في المستنقعات) ببطء إلى فحم بعد دفنها وتغطيتها لفترة طويلة من خلال عملية تعرف باسم "التفحم".

ينطلق غاز الميثان المنبعث من الفحم بعدة طرق، تختصرها وكالة حماية البيئة الأمريكية فيما يلي (EPA, 2025)[47]:

1- المناجم النشطة تحت الأرض:

تطلق هذه المناجم الجوفية غاز الميثان إلى الجو من خلال أنظمة إزالة الغازات (ميثان أنظمة الصرف أو التهوية).

2- المناجم المهجورة:

تطلق المناجم المهجورة أو المغلقة غاز الميثان من فتحات أو أنابيب التهوية، أو الآبار، أو الشقوق في الأرض، وقد حددت وكالة حماية البيئة الأمريكية أكثر من 400 منجم من هذا النوع في الولايات المتحدة في عام 2017، لا تزال تتسبب في انبعاثات الميثان.

3- المناجم السطحية:

وهي تطلق كميات من غاز الميثان أقل من نظيرتها الجوفية، إنما بسبب حجمها الكبير، فإن بعض المناجم السطحية يمكنها أيضاً إطلاق غاز الميثان بكميات كبيرة.

تمثل انبعاثات مناجم الفحم الجوفية الجزء الأكبر انبعاثات الميثان من تعدين الفحم في العالم، وينبعث معظم غاز الميثان من المناجم الجوفية من خلال أنظمة التهوية. وعلى سبيل المثال شكلت انبعاثات الميثان من الصناعة المنجمية للفحم نحو 8% من إجمالي انبعاثات الميثان في الولايات المتحدة في عام 2019 (EPA, 2025).

يبين الجدول 2 النسب التقديرية لانبعاثات غاز الميثان من الأنواع المختلفة من مناجم الفحم

* CMM: Coal Mine Methane

الحجري، ويلاحظ منه أن نسب الانبعاثات من المناجم المهجورة تمثل رقماً لا يستهان به إذ تقارب نسب الانبعاثات من المناجم السطحية النشطة.

الجدول 2: النسب التقديرية لانبعاثات غاز الميثان بحسب نوع منجم الفحم الحجري

النوع	نسبة الانبعاثات %
المناجم الجوفية	85 -70
المناجم السطحية	23 -12
المناجم المهجورة	20 -13
المصدر: تم استخراج النسب بالعودة إلى كل من: (IEA, 2024)[48]، (GEM, 2022)[49]، (Visualizing Energy, 2023)[50]، (Global Methane Initiative, 2020)[51].	

2- 2 الانبعاثات الناجمة عن إنتاج الفحم الحجري حسب المصدر

هناك العديد من المصادر التي تتابع إنتاج الفحم الحجري في العالم، وقدر معهد الطاقة العالمي* أن إنتاج العالم من الفحم الحجري تجاوز 9 مليار طن في عام 2025 (Energy Institute, 2025)[52]. لكن قلة قليلة تتابع عدد المناجم ونوعها. تشير بيانات المرصد العالمي لمراقبة الطاقة GEM† إلى أن هناك حوالي 6900 منجم فحم تتوزع في 70 دولة حول العالم، وبحسب بيانات المرصد (GEM, 2025)[53] المحدّثة حتى شهر مايو 2025، فإن 53% من إنتاج العالم من الفحم يأتي من مناجم سطحية، و47% مناجم جوفية.

يوضح الجدول 3 إنتاج الفحم الحجري في العالم حسب المجموعات الدولية مرتبة من الأكبر إلى الأصغر. تنتج دول آسيا والمحيط الهادئ أكثر من 80% من إجمالي إنتاج العالم من الفحم الحجري، حيث يتركز معظم الإنتاج في الصين (51.7%)، والهند (11.7%)، وإندونيسيا (9%).

بينما تنتج أوقيانوسيا حوالي 5% من إجمالي إنتاج العالم، ويتركز معظم الإنتاج في أستراليا، وهي بذلك على قدم المساواة مع الولايات المتحدة الأمريكية التي تنتج بدورها نحو 5% من إجمالي الفحم الحجري في العالم (EI، 2025).

* EI: Energy Institute ال

† GEM: Global Energy Monitor

الجدول 3: إنتاج الفحم الحجري في العالم حسب المجموعات الدولية.

المجموعة الدولية	الإنتاج عام 2024 (مليون طن)	النسبة من إنتاج العالم %
آسيا والمحيط الهادئ وأوقيانوسيا	7417.1	80.3
كومنولث الدول المستقلة	556.2	6
أمريكا الشمالية	512.4	5.5
أوروبا	416.9	4.5
أفريقيا	267	2.9
أمريكا الجنوبية والوسطى	61	0.7
الشرق الأوسط	11	0.1
المصدر: (Energy Institute, 2025)		

ليس هناك اتفاق حول رقم دقيق عن حجم انبعاثات الميثان من مناجم الفحم الحجري حول العالم، لكن التقديرات عموماً تتراوح بين 40- 60 مليون طن سنوياً، أو ما يزيد عن 88 مليار متر مكعب*. ومصادر هذه الانبعاثات حسب المجموعات الدولية مبينة في الجدول 4.

الجدول 4: انبعاثات الميثان من مناجم الفحم الحجري عام 2024 حسب المجموعات الدولية

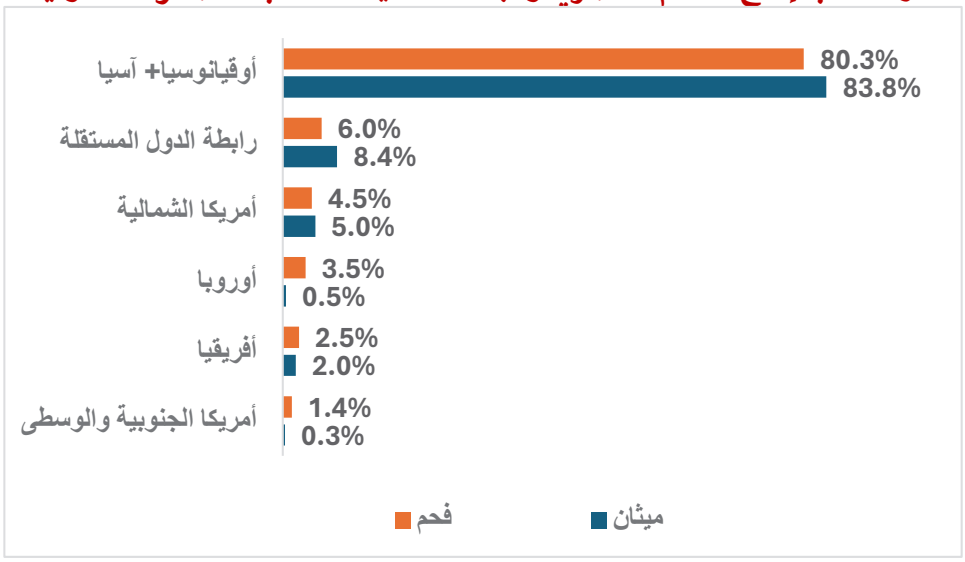
المجموعة الدولية	الانبعاثات عام 2024 (مليون طن)	النسبة من إجمالي العالم %
أوقيانوسيا وآسيا (48 آسيا + 3 أوقيانوسيا - 1 آسيا الوسطى)	50	83.8
رابطة الدول المستقلة (أوروبا الشرقية + آسيا الوسطى)	5 (1+4)	8.4
أمريكا الشمالية	3	5
أفريقيا	1.2	2
أوروبا (باستثناء رابطة الدول المستقلة) (أوروبا الشمالية + الجنوبية + الغربية)	0.3	0.5
أمريكا الجنوبية والوسطى	0.2	0.3
الإجمالي (مناجم عاملة 41+ مناجم مهجورة 18)	59.7	
المصدر: تم احتساب الأرقام بناء على تقديرات كل من (GEM, 2025) و(IEA, 2024) آسيا وأوقيانوسيا معاً: إجمالي آسيا = 48 مليون طن. أوقيانوسيا = 3 مليون طن تم استبعاد آسيا الوسطى (1 مليون طن) هنا لأنها محسوبة ضمن رابطة الدول المستقلة (CIS) أي: 48 + 3 - 1 = 50 مليون طن أوروبا (باستثناء رابطة الدول المستقلة): شمال أوروبا: 0.0049 مليون طن. جنوب أوروبا: 0.1001 مليون طن. غرب أوروبا: 0.217 مليون طن. الإجمالي (باستثناء شرق أوروبا / رابطة الدول المستقلة) ≈ 0.322 مليون طن.		

يمكن تلخيص محتوى الجدولين 3 و4 في الشكل 6، والذي يبين أن أعلى انبعاثات لغاز الميثان من مناجم الفحم الحجري تتركز في دول أوقيانوسيا وآسيا، وهو أمر متوقع بسبب الحجم الكبير لإنتاج الفحم في دول مثل الصين والهند وأستراليا، والتي تمتلك احتياطيات ضخمة من الفحم وتعتمد عليه بشكل كبير في توليد

* تقريباً، كل 1 مليون متر مكعب من الميثان في الشروط القياسية يعادل حوالي 0.0007 مليون طن.

الطاقة. يشير هذا التركيز إلى أنه في حال وجود استراتيجيات لتخفيف الانبعاثات من الميثان، فإن هذه المنطقة يقع عليها العبء الأكبر كونها الدول الأعلى إنتاجاً للفحم الحجري في العالم. ويلاحظ عدم ظهور بيانات حول انبعاثات للميثان من مناجم الفحم الحجري في الشرق الأوسط ضمن المجموعات الدولية، وسبب ذلك هو أن إنتاج الفحم الحجري في الشرق الأوسط محدود جداً وغالباً ما يكون للاستهلاك المحلي في بضع دول مثل إيران والعراق والأردن.

الشكل 6: مقارنة نسب إنتاج الفحم الحجري وانبعاثات الميثان حسب المجموعة الدولية لعام 2024



مصدر البيانات: الجدولين 3و 4 استناداً إلى (Energy Institute, 2025) و(GEM, 2025) و(IEA, 2024).

ولابد هنا من الإشارة إلى أن الفحم المستخدم في صناعة الفولاذ (فحم الكوك) يساهم في نحو 27% من انبعاثات الميثان في قطاع الفحم الحجري (ما يقارب 10 مليون طن سنوياً)، وترى وكالة الطاقة الدولية أن استخدام الفحم في صناعة الفولاذ يجب أن ينخفض بنسبة 83% ضمن خطة صافي الصفر الكربوني للوكالة. بينما من المتوقع أن تنمو صناعة الفولاذ بأكثر من 33% حتى عام 2050 (Embr, 2024)[54].

2- 3 غاز الميثان المنبعث من الصناعة البترولية

تشير وكالة الطاقة الدولية على موقعها الرسمي (IEA, 2025)[55] إلى أن صناعة الطاقة هي المسبب لنحو 41% من انبعاثات الميثان. وتوضح العودة إلى البيانات التفصيلية أن هذا الرقم لا يعبر عن الصناعة البترولية فقط، بل يتضمن كذلك الانبعاثات من الفحم المستخدم في صناعة الفولاذ (فحم الكوك)، علاوة على

الفحم المستخدم في توليد الكهرباء، إضافة إلى الانبعاثات الصادرة عن الوقود الحيوي كما هو مبين في الجدول 5. أما لو اقتصر الرقم على صناعة النفط والغاز، فيلاحظ أن انبعاثات الميثان من الصناعة البترولية تمثل نحو **23%** فقط من إجمالي انبعاثات الميثان في العالم، وهو رقم يقل بكثير عن 41% الذي تحاول بعض الجهات تسويقه على أنه يمثل انبعاثات الصناعة البترولية.

الجدول 5: مصادر انبعاثات غاز الميثان حتى شهر مايو 2025

المصدر العام	المصدر التفصيلي	السبب	الكمية (ألف طن)
الزراعة	كل المصادر	كل الأسباب	137270.61
الطاقة	المنشآت المهجورة	كل الأسباب	7676.88
الطاقة	الطاقة الحيوية	كل الأسباب	20177.36
الطاقة	فحم الكوك	كل الأسباب	9703.03
الطاقة	خطوط أنابيب الغاز ومنشآت الغاز الطبيعي المسال	تسرب	3817.23
الطاقة	الغاز البحري	تنفيس	5435.68
الطاقة	النفط البحري	تسرب	1233.92
الطاقة	الغاز البري	تنفيس	2782.59
الطاقة	النفط البحري	حرق على الشعلة	1469.98
الطاقة	النفط البحري	تسرب	1624.01
الطاقة	النفط البحري	تنفيس	6496.02
الطاقة	الغاز البري	تسرب	5146.84
الطاقة	الغاز البري	تنفيس	11606.54
الطاقة	النفط البري	حرق على الشعلة	8128.47
الطاقة	النفط البري	تسرب	4795.21
الطاقة	النفط البري	تنفيس	19180.82
الطاقة	مصادر أخرى من الفحم	كل الأسباب	1306.52
الطاقة	مصادر أخرى من النفط والغاز	كل الأسباب	3488.33
الطاقة	انبعاثات النفط والغاز المكتشفة بالأقمار الصناعية	كل الأسباب	4588.8
الطاقة	الفحم لتوليد الكهرباء	كل الأسباب	25904.25
الطاقة	إجمالي	كل الأسباب	144562.48
مصادر أخرى	إجمالي	كل الأسباب	8433.72
نفايات	إجمالي	كل الأسباب	64156.86
المصدر: (IEA, 2025). الخلايا المظللة تمثل الانبعاثات من الصناعة البترولية			

من الأهمية بمكان هنا توضيح أن بيانات وكالة الطاقة الدولية للانبعاثات من قطاع الزراعة، هي تقديرات تستند إلى بيانات بين عامي 2019- 2021. ومثلها بيانات المصادر الأخرى*، وبيانات انبعاثات النفايات.

يلاحظ من الجدول أن الانبعاثات من قطاع الزراعة بلغت 137.3 مليون طن تقريباً تمثل 39% من

* لا توضح الوكالة بدقة هذه المصادر، وربما تكون بعض العمليات الصناعية، والانبعاثات غير المتعلقة بالطاقة، أو المصادر الصغيرة التي لا تستدعي تصنيفاً منفصلاً.

إجمالي انبعاثات الميثان في عام 2024. بينما كانت الوكالة قد قدرت انبعاثات الميثان من قطاع الزراعة في عام 2022 بنحو141.4 مليون طن عام 2022، و142.3 مليون طن عام 2023. هذا يعني أن تقديرات الوكالة لانبعاثات الميثان من قطاع الزراعة تراجعت بنسبة تقارب 3.5% بين عامي 2023 و2024، رغم أنه لا يوجد أي حدث عالمي يبرر هذا التراجع، كما أن إجمالي انبعاثات الميثان بحسب تقديرات الوكالة تراجعت بنسبة ضئيلة جداً (0.8%) فقط (356.9 مليون طن عام 2022، و357.4 مليون طن في عام 2023). في المقابل، رفعت الوكالة تقديرات لإجمالي الانبعاثات من قطاع الطاقة بأكثر من 11 مليون طن في عام 2024 مقارنة بعام 2023، بينما خفضت تقديراتها للانبعاثات من المخلفات ومن المصادر الأخرى. وهو أمر ربما يثير العديد من التساؤلات عن مدى دقة التقديرات، وإن كان ذلك خارج نطاق هذه الدراسة.

عموماً، يلاحظ من تفاصيل الجدول أن هناك انبعاثات من غاز الميثان خلال الحرق على الشعلة، تمثل 2.7% فقط من إجمالي انبعاثات العالم، وسببها غالباً هو عدم الاحتراق الكامل للغاز على الشعلة. كما يلاحظ أن الانبعاثات الناتجة عن التسربات بلغت 4.7% من الإجمالي. أما الانبعاثات الناتجة عن تنفيس الغاز، فمثلت 11% من الإجمالي.

وهنا لابد من التنويه إلى وجود العديد من الأسباب الفنية والاقتصادية لحرق أو تنفيس الغاز، ومنها:

1. عند حفر أي بئر استكشافية أو تنقيبية، يتطلب الأمر تشغيل البئر لفترة محددة تسمى "اختبار البئر" (Well test)، وذلك لتقييم قدرتها الإنتاجية وأخذ عينات من السوائل والغازات المنتجة. تجرى خلال هذه الفترة تحليلات لتحديد الخصائص الرئيسية التي تؤثر على اختيار المعدات السطحية المناسبة مثل رأس البئر، الصمامات، وأجهزة الفصل وغيرها. في هذه المرحلة، عادة ما يوجّه الغاز المصاحب للنفط (أو الغاز الحر المنتج من آبار الغاز) إلى خط تدفق خاص مع عمود شعلة لإحراقه، وذلك كإجراء أمني مهم يتخذه مهندس الإنتاج أو المسؤول عن الاختبار، نظراً لعدم توفر إمكانية تخزين الغاز أو الاستفادة منه حالياً، ويحرق الغاز لتجنب أخطار الانفجارات.
2. أثناء مراحل تطوير الحقل واستقرار الإنتاج، قد ترتفع تكلفة المعدات اللازمة لاسترداد الغاز بشكل كبير، بالإضافة إلى التكاليف المرتبطة بعمليات حقن الغاز.
3. بعض الحقول قد تحتوي على كميات صغيرة من الغاز المنحل في النفط، أو تكون آبار الحقل متباعدة على مسافات كبيرة، أو يقع الحقل بعيداً عن شبكات نقل الغاز، مما يجعل إنشاء شبكة أنابيب لنقل الغاز المنتج غير مجدٍ اقتصادياً.

4. قد يتسرب الغاز بسبب الحوادث التي قد تحدث خلال مراحل الحفر، الإنتاج، المعالجة، أو النقل.
5. بعد الانتهاء من عمليات الحفر أو الإكمال أو الإصلاح، يجب التخلص بصورة آمنة من الغاز المنحل الموجود في سائل الحفر، أو سائل التشقيق، أو ضمن الحمض المستخدم في عمليات التحميض.
6. عند إعادة حقن الغاز أو نقله عبر شبكات الأنابيب، يجب حرق كميات قليلة من الغاز لأسباب تتعلق بالأمان والسلامة. فمعدات تخزين ومعالجة النفط والغاز غالباً ما تعمل تحت ضغوط مرتفعة ودرجات حرارة عالية، وفي حال حدوث زيادة مفاجئة في الضغط، فإن صمامات الطوارئ تعمل تلقائياً على توجيه الغاز الزائد إلى شعلة الاحتراق لحماية المنشأة والعاملين بها من أخطار الحريق. كما يتم حرق كميات متبقية من الغاز خلال هجر خطوط الأنابيب قبل إزالتها.

وهناك أيضاً حالات خاصة تستوجب التخلص الآمن للغاز المحتوي على نسب عالية من الغازات السامة، مثل الغاز المصاحب الذي يحتوي على تركيز كبير من كبريتيد الهيدروجين، خصوصاً إذا لم يكن من المتاح معالجته.

أما التنفيس Venting فيحدث في عدة مراحل من الصناعة البترولية، مثل إكمال و/أو صيانة الآبار، أو صيانة الأنابيب والخزانات. ويمكن لكميات الغاز أن تكون كبيرة في بعض الأحيان، فخلال عملية إكمال البئر على سبيل المثال، وبعد إجراء عملية التشقيق، لابد من تنظيف البئر وسحب سائل التشقيق منه مع ما يرافقه من ملوثات قادمة من الطبقات. يوجّه السائل الخارج من البئر عادة نحو حفرة البئر بينما تنطلق الغازات إلى الجو حرّة أو يتم حرقها. وهناك حالات لابد من تنفيس الغاز فيها، مثل حالة حفر آبار غاز طبقات الفحم، والتي يتم تشقيقها مباشرة بعد الحفر باستخدام غاز النيتروجين، وعند وضعها على الاختبار، فإن غاز النيتروجين المنتج مع الميثان يعيق عملية الحرق، لذلك يتم تحريره إلى الجو ريثما تصل نسبة الميثان مقابل النيتروجين في المزيج الغازي إلى النسبة التي تسمح ببدء عملية الاحتراق. (حمش، 2016)[56]. وبطبيعة الحال إذا تم حرق الميثان، يتحول إلى ثاني أكسيد الكربون، بينما إذا تم تنفيس الميثان مباشرة إلى الغلاف الجوي، سيكون تأثيره أكبر بكثير. ورغم ذلك يلاحظ أن وسائل الإعلام غير المتخصصة تركز على عملية الحرق بدلاً من عملية التنفيس.

2-3- 1 دور صناعة الغاز المسال

يمثل الغاز الطبيعي المسال (LNG) حالياً حوالي 13% من إنتاج الغاز العالمي، لذلك فإن دوره في كل من خفض الانبعاثات (من خلال دعم التحول من الفحم إلى الغاز وتوفير الدعم لنشر الطاقة المتجددة) وأمن

الطاقة يزداد أهمية بشكل كبير. ومع ذلك، فإن ديناميكيات الغاز الطبيعي المسال العالمية تتغير سريعاً، حيث تدفع العديد من المشاريع الجديدة السوق نحو فائض محتمل في العرض، مما يمنح المشترين خيارات أوسع. وستتضمن تلك الاختيارات، بشكل متزايد، تقييمات لانبعاثات سلسلة التوريد (من الإنتاج، مروراً بالنقل والإسالة، وصولاً إلى إعادة التغويز). واعتباراً من عام 2030، سيتطلب معيار أداء الميثان في الاتحاد الأوروبي تقارير دقيقةً، وقد يفرض عقوبات على الواردات ذات الانبعاثات العالية. لذلك، أصبح موضوع الانبعاثات بالنسبة للمنتجين عاملاً تنافسياً جوهرياً سيساعد في تعزيز المصداقية المناخية للغاز الطبيعي المسال مقابل المصادر الأخرى.

يرى (Ostridge and Davis, 2025)[57] أن محطات إسالة الغاز الطبيعي أحرقت في السنوات الأخيرة 1.5- 2 مليار متر مكعب من الغاز سنوياً، وهو ما يتماشى بشكل عام مع حجم تجارة وقدرة الغاز الطبيعي المسال العالمية. ومع ذلك، انخفض حرق الغاز في هذه المحطات عام 2024 بنسبة 26% ليصل إلى 1.5 مليار متر مكعب، وهو أدنى مستوى في السجلات الأخيرة. وحتى ذلك الحين، كانت كثافة الحرق مستقرة نسبياً عند حوالي 0.4% من الاستخدام (أو 0.3% من القدرة الإنتاجية لهذه المحطات). لكن التراجع الذي حدث في عام 2024 لم يكن نتيجة لتحسن شامل على مستوى العالم، بل كان أساساً بسبب الأداء الأفضل في إحدى المنشآت التي كانت تعاني تاريخياً من ارتفاع معدلات حرق الغاز، إلى جانب مكاسب متواضعة في عدد قليل من المحطات الأخرى.

ينتج حرق الغاز في محطات الغاز الطبيعي المسال عادة عن مزيج من الاضطرابات التشغيلية، وأعطال المعدات، ومشاكل في البنية التحتية. ومن المحتم كذلك أن تمتلك معظم المرافق شعلة صغيرة يمكنها إشعال الغاز في حالة حدوث حالة طوارئ، وعادة ما تحرق هذه الشعلات نحو 14 متر مكعب في اليوم فقط.

غالباً ما يعود الحرق الروتيني في محطات إسالة الغاز الطبيعي إلى تحديات تتعلق باسترداد الغاز المتبخر (BOG)* أثناء التخزين وينتج هذا الغاز عن الفوارق الكبيرة بين درجة الحرارة المحيطة ونقطة غليان الغاز الطبيعي المسال التي تقل عن -160° مئوية تقريباً. يعد الغاز المتبخر أمراً لا مفر منه حتى مع استخدام أكثر أنظمة العزل تقدماً، حيث تبلغ نسبته حوالي 0.5% من الحجم يومياً. ويتم التعامل معه إما بإعادة إسالته، أو استخدامه كوقود، أو حرقه أو تصريفه. ويوضح (Ostridge and Davis) أن القيود المفروضة

* Boil-Off Gas

على بنية مناولة الغاز التحتية -مثل خطوط الأنابيب المحدودة أو القدرة غير الكافية على استرداد وإعادة حقن الغاز المتبخر- قد تجبر المشغلين على حرق الغاز عندما لا يتوفر خيار بديل. ويمكن أن تختلف وتيرة وحجم الحرق بشكل واسع، ليس فقط بناءً على تصميم المحطة والممارسات التشغيلية، ولكن أيضاً على مدى تطبيق اللوائح التنظيمية ووجود/ غياب الحوافز التجارية لالتقاط واستغلال الغاز الذي كان سيحرق لولا ذلك.

يمكن بالتالي القول إنه رغم الأهمية المتزايدة لضبط انبعاثات سلسلة توريد الغاز الطبيعي المسال، فلا بد من وضع هذه الانبعاثات في سياقها الصحيح، إذ لا تمثل صناعة الغاز المسال إلا جزءاً صغيراً من إجمالي انبعاثات الغاز العالمية (0.9- 1.2%). ومع ذلك، فإن التحسينات النوعية تظل ضرورية لتعزيز الميزة التنافسية لهذا القطاع. وربما يكون التركيز على معالجة قضايا مثل الغاز المتبخر وتطوير البنية التحتية مساهماً مهماً في دعم جهود أمن الطاقة العالمي مع الحفاظ على أقل بصمة كربونية ممكنة.

2- 4 انبعاثات غاز الميثان في الدول العربية

استكمالاً للصورة، لابد من توضيح الانبعاثات في الدول العربية كونها تمثل حجر الزاوية في الصناعة البترولية في العالم.

استناداً إلى نفس قاعدة بيانات وكالة الطاقة الدولية، يقدر أن انبعاثات الميثان في الدول العربية مجتمعة بلغت نحو 34.5 مليون طن في عام 2024، أي أقل من 10% مما يصدره العالم. يبين الجدول 6 تفاصيل تقديرات وكالة الطاقة الدولية لانبعاثات الميثان من الدول العربية والعالم في عام 2024.

الجدول 6: انبعاثات الميثان من الدول العربية والعالم عام 2024

	العالم	الدول العربية	نسبة الدول العربية/العالم
إجمالي الانبعاثات (مليون طن)	354.4	34.5	%9.7
الزراعة	137.3	2	%1.5
الطاقة	144.6	27.7	%19.2
مصادر أخرى	8.4	0.082	%1
النفايات	64	4.7	%7.3
المصدر: مستخلص من IEA Methane Tracker, 2025			

يقدم الجدول نظرة قد تكون إيجابية أو سلبية حسب المنظور والنهج المتبع في قراءة البيانات، وحسب مساهمة الدول العربية في انبعاثات الميثان العالمية، خاصة عند مقارنتها بمركزها كمنتج رئيسي للطاقة،

حيث أنتجت حوالي ربع النفط العالمي و15% من الغاز الطبيعي في عام 2024، فإن إجمالي انبعاثات الميثان لديها تمثل **9.7%** فقط من الانبعاثات العالمية.

كما تظهر البيانات أن مساهمة الدول العربية في انبعاثات الميثان من قطاع الزراعة منخفضة بشكل ملحوظ، ولا تزيد عن 1.5% فقط من الانبعاثات العالمية لهذا القطاع، وهو ما يعكس الطبيعة غير الكثيفة للزراعة في العديد من الدول العربية.

وتبقى انبعاثات الميثان من النفايات في الدول العربية منخفضة نسبياً حيث تمثل 7.3% من انبعاثات النفايات العالمية، مع الأخذ بعين الاعتبار أن عدد سكان الدول العربية مجتمعين يمثل نحو 6% من عدد سكان العالم (493 مليون نسمة) حسب تقديرات البنك الدولي عن عام 2024 (World Bank, 2024)[58]، وهو عدد يقارب عدد سكان الولايات المتحدة وروسيا مجتمعتين، واللتين بلغت انبعاثات الميثان من قطاع النفايات فيه أكثر من 9 مليون طن عام 2024 مثلت ما يفوق 14% من انبعاثات الميثان من النفايات في العالم.

ولإيضاح الصورة أكثر، يتضمن الجدول 7 تفاصيل مصادر هذه الانبعاثات في الدول الأعضاء في أوابك وباقي الدول العربية، إذ يبين الجدول أن إجمالي انبعاثات الميثان من الصناعة البترولية في الدول العربية بلغ نحو 13.7 مليون طن في عام 2024، تمثل حوالي 17% فقط من إجمالي انبعاثات الميثان من قطاع النفط والغاز في العالم والتي قدرت بنحو 80 مليون طن.

أما الدول الأعضاء في أوابك فبلغت انبعاثاتها 12.9 مليون طن من الميثان تعادل 16% من إجمالي انبعاثات الميثان في العالم من الصناعة البترولية لعام 2024.

الجدول 7: انبعاثات الميثان من الصناعة البترولية في الدول العربية عام 2024

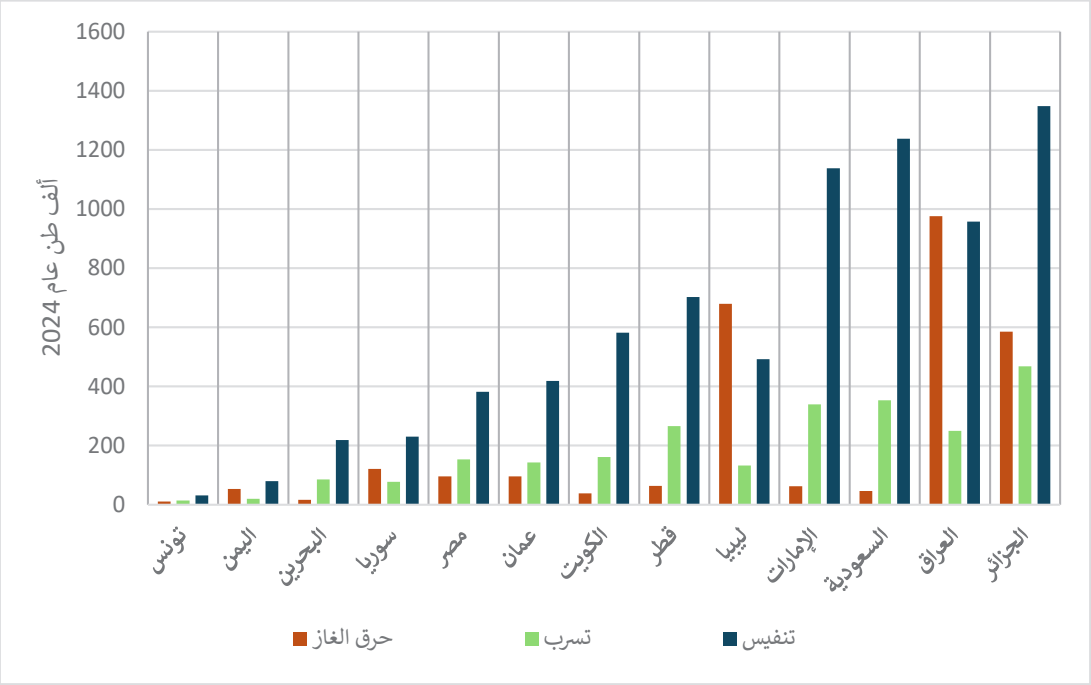
مصدر الانبعاثات	المرافق المهجورة	خطوط أنابيب الغاز ومرافق الغاز الطبيعي المسال	الغاز البري	النفط البري	مصادر أخرى مرتبطة بالنفط والغاز	انبعاثات النفط والغاز الكبيرة المكتشفة عبر الأقمار الصناعية	الغاز البحري	النفط البحري	المجموع ألف طن
الجزائر	47.1	183.8	614.96	1602.9	24.5	87.7	-	-	**2560.8**
العراق	26.2	26.1	28.5	2128.5	22.7	10.8	-	-	**2242.8**
السعودية	35.77	79.09	100.95	784.72	55.49	14.8	68.5	604.4	**1743.8**
الإمارات	13.35	100.9	125.7	552.2	19.1	-	84.0	677.8	**1573.0**
ليبيا	22.1	20.26	22.5	1215.7	13.05	8.8	12.6	34.8	**1349.7**

مصدر الانبعاثات	المرافق المهجورة	خطوط أنابيب الغاز ومرافق الغاز الطبيعي المسال	الغاز البري	النفط البري	مصادر أخرى مرتبطة بالنفط والغاز	انبعاثات النفط والغاز الكبيرة المكتشفة عبر الأقمار الصناعية	الغاز البحري	النفط البحري	المجموع ألف طن
قطر	3.37	60.38	7.7	118.62	5.72	-	542.6	302.4	**1040.7**
الكويت	29.1	33.4	51.7	669.8	9.2	0.7	-	25.9	**819.9**
مصر	4.7	128.0	31.8	219.3	26.1	-	150.3	101.7	**661.8**
سوريا	24.28	46.04	61.5	321.9	14.68	51.4	-	-	**519.8**
البحرين	6.0	46.9	139.6	133.9	4.2	-	-	-	**330.5**
تونس	1.22	17.84	6.08	19.82	3.8	-	3.8	8.1	**60.6**
إجمالي الدول الأعضاء	**213.2**	**742.67**	**1191**	**7767**	**198.45**	**174.2**	**861.7**	**1755.1**	**12903.36**
عمان	6.78	54.66	180.6	421.6	8.38	-	0.3	1.3	**673.6**
اليمن	23.95	0.4	151.8	0.03	4.94	9	-	-	**190.1**
المغرب	0.06	1.94	0.18	0.04	8.83	-	-	-	**11.1**
الأردن	0.03	5.89	0.33	1.49	2.88	-	-	-	**10.6**
لبنان	-	-	-	-	3.42	-	-	-	**3.4**
إجمالي الدول غير الأعضاء	**30.82**	**62.89**	**332.9**	**423.1**	**28.45**	**9**	**0.28**	**1.34**	**888.81**
إجمالي الدول العربية	244.02	805.56	1524	8190	226.9	183.2	862	1756.5	**13792.17**

المصدر: من إعداد الباحث. مستخلص من (IEA Methane Tracker, 2025). الدول مرتبة حسب حجم الانبعاثات

وبالعودة إلى التفاصيل في قاعدة بيانات وكالة الطاقة الدولية، يتبين أن المصدر الأساسي لانبعاثات الميثان من معظم الدول العربية هو تنفيس الغاز، باستثناء العراق وليبيا حيث يمثل حرق الغاز المصدر الرئيسي لانبعاثات الميثان، كما هو موضح في الشكل 7، وذلك ما يشير إلى وجود فرص لتطبيق تقنيات للتحكم في التنفيس وتحسين كفاءة استخدام الغاز. كما يتبين أنه مقارنة بالعديد من الدول الأخرى، فإن الدول العربية تمتلك نسبة انبعاثات متوسطة إلى منخفضة من الميثان رغم حجم النشاط الصناعي الكبير، مما يعكس تحكماً نسبياً في الانبعاثات ضمن الإطار العام.

الشكل 7: أهم مصادر انبعاثات الميثان في الدول العربية عام 2024



مصدر البيانات: مستخلص من (IEA Methane Tracker, 2025).
لم يتم تضمين المغرب والأردن في الشكل لأن انبعاثات الميثان فيهما منخفضة جداً مقارنة بباقي الدول.

2- 5 أمثلة عن انبعاثات الميثان

2- 5-1 حادثة Nord Stream

لا يمكن إنكار وجود انبعاثات من غاز الميثان مصدرها النشاطات البشرية، لكن المؤسف أن بعض هذه النشاطات تقع خارج نطاق البناء لتقع ضمن نطاق التخريب المتعمد، ومنها على سبيل المثال عملية تفجير خط أنابيب الشمال Nord Stream، وهو عبارة عن شبكة خطوط أنابيب لنقل الغاز الطبيعي تحت بحر البلطيق من روسيا إلى ألمانيا، لتوفير الغاز الطبيعي لأوروبا الغربية. يتألف هذا المشروع من خطي أنابيب متوازيين، "Nord Stream 1" (NS1) و "Nord Stream 2" (NS2)، يربطان روسيا مباشرة بألمانيا دون المرور عبر أوكرانيا أو بولندا. يعد Nord Stream واحداً من أطول خطوط الأنابيب تحت البحر في العالم.

في 26 سبتمبر 2022، تعرض كل من NS1 و NS2 لأضرار نتيجة سلسلة من الانفجارات تحت الماء، ما أدى إلى تسرب الغاز الطبيعي. وقع الانفجار الأول جنوب شرق جزيرة Bornholm الدنماركية مما أدى إلى تمزق خط أنابيب A من نظام أنابيب NS2 التوأم (NS2A) على عمق يقارب 70 متراً، ودمر هذا الانفجار حوالي 10 أمتار من خط الأنابيب. بعدها وقعت عدة انفجارات شمال شرق Bornholm أدت إلى تمزق كل من خطي

أنابيب NS1A وNS1B على أعماق تبلغ حوالي 75 متراً، وتسببت كذلك في تمزق جزئي أصغر في خط أنابيب NS2A شمال موقع التسرب الأول. أدت هذه الانفجارات مجتمعة إلى تدمير ما بين 200 و300 متر من خطي أنابيب NS1A وNS1B، بينما بقي خط أنابيب NS2B سليماً لم يتضرر.

وعلى الرغم من أن خطوط الأنابيب لم تكن قيد التشغيل في ذلك الوقت، فإن نظامي خطوط NS1 وNS2 كانا ممتلئين بالغاز الطبيعي المضغوط الذي يتكون بشكل أساسي من الميثان مع كميات قليلة من الإيثان والنيتروجين وهيدروكربونات أخرى. وقد شوهد الغاز المنبعث يتصاعد على شكل فقاعات عبر سطح البحر فوق مواقع التمزق الأربعة، مكوّناً نتوءات من مياه البحر الرغوية بقطر يصل إلى عدة مئات من الأمتار، واستمر ذلك لمدة تقارب أسبوعاً كاملاً. ونظراً لحجم الانبعاث واستمراريته ووضوحه للعيان، برزت الحاجة إلى تقدير كمية الميثان المنبعثة إلى الغلاف الجوي لفهم التأثير البيئي والمناخي المحتمل، وهو ما بحثته دراسة (Harris et al و2025)[59]. بينت الدراسة أنه تم استخدام مجموعة واسعة من الأساليب من الأصغر إلى الأكبر (على حساب كمية الميثان الموجودة في (أو المنبعثة من) خطوط الأنابيب قبل (أو بعد) التمزق، وتم الحصول عليها عبر حسابات حجمية ومحاكاة مستندة إلى المعطيات الفيزيائية لخطوط الأنابيب ومعلومات من مشغلي الأنابيب) ومن الأكبر إلى الأصغر (كمية الميثان المنبعث من خطوط الأنابيب إلى بحر البلطيق والغلاف الجوي، تم الحصول عليها من قياسات بحرية وعلى متن سفن وقياسات جوية مباشرة وقياسات عبر الأقمار الصناعية وقياسات الميثان في الجو الملتقطة بواسطة محطات رصد شاهقة تابعة للنظام الأوروبي المتكامل لمراقبة الكربون). تراوحت التقديرات حسب تقنيات الأصغر إلى الأكبر والمبلّغ عنها عبر خطوط الأنابيب الثلاثة المتضررة ما بين 230 و509 ألف طن من الميثان. في حين وجد تقرير مبدئي صدر في فبراير 2023 يستند إلى تقديرات الأكبر إلى الأصغر أن كمية الميثان المنبعثة إلى الغلاف الجوي تراوحت بين 75 و230 ألف طن.

بينما توصلت الدراسة إلى أن إجمالي الانبعاثات في الغلاف الجوي من التسربات بلغ 465 ± 20 ألف طن من غاز الميثان. وهو يصنف كأضخم كمية مسجلة من الميثان يتم إطلاقها من حدث واحد. وقد بينت الدراسة كذلك أن كمية صغيرة من الميثان (بين 9- 15 ألف طن) ذابت في مياه بحر البلطيق، وتأكسد حوالي 6 آلاف طن منها بفعل الميكروبات، بينما انطلق ما بين 8- 13 ألف طن من الميثان المذاب إلى الغلاف الجوي.

2- 5- 2 حادثة Aliso Canyon

حدث التسرب من بئر Aliso Canyon الواقعة في منشأة تخزين للغاز الطبيعي في ولاية كاليفورنيا، كانت

تعتبر أكبر منشأة لتخزين الغاز في الولاية. اكتشف التسرب في 23 أكتوبر 2015 بواسطة فرق شركة SoCalGas أثناء جولة تفقدية روتينية، وتبيّن أن مصدره البئر SS-25 التي تعرضت لتمزق في الغلاف الخارجي على عمق يقارب 122 متراً تحت سطح الأرض نتيجة تآكل ميكروبي ناجم عن تماس المياه الجوفية مع المعدن، إضافة إلى غياب صمامات أمان أساسية وإجراءات صيانة مسبقة. استمر التسرب قرابة 112 يوماً، من تاريخ اكتشافه وحتى السيطرة عليه في 11 فبراير 2016، ثم جرى إغلاق البئر بشكل نهائي وهجرها في 18 فبراير من العام نفسه. حاولت الشركة السيطرة على التسرب بعدة طرق، شملت الحقن بالحمأة والملح Top Kill، إلا أن النجاح الفعلي تحقق عبر حفر بئر جانبية على مقربة من البئر المتضررة، وحقن مواد إغلاق لعزل مصدر التسرب (CARB, 2016)[60].

قدرت كمية الغاز المتسرب بأكثر من 97 ألف طن من الميثان، بالإضافة إلى حوالي 7,300 طن من الإيثان وكميات صغيرة من هيدروكربونات أخرى. هذا الحجم من الميثان جعل الحادث أكبر تسرب من نوعه في تاريخ الولايات المتحدة، حيث ضاعف تقريباً مستويات انبعاثات الميثان في منطقة لوس أنجلوس أثناء فترة التسرب. تسبب الحادث من الناحية البيئية في زيادة مؤقتة لتركيزات الميثان ومركبات هيدروكربونية أخرى في الغلاف الجوي فوق المنطقة، وأدى هذا إلى ارتفاع مؤقت في مستويات الأوزون الأرضي ومركبات مثل الفورمالديهايد وأول أكسيد الكربون، لكن هذه الزيادة انخفضت سريعاً بعد السيطرة على البئر، وعادت المستويات إلى حالتها الطبيعية.

الأثر المناخي للحادث كان قصير الأجل مقارنة بالانبعاثات العالمية المستمرة حسبما أكدته كل من هيئة مصادر الهواء في الولاية (CARB, 2016)، ووزارة الطاقة الأمريكية (DOE, 2016)[61]. ولم تسجل وفيات أو أضرار صحية مباشرة، وإن كان بعض السكان المحليين قد اشتكوا من الصداع والنزيف الأنفي وتهيج العيون والجهاز التنفسي. من ناحية أخرى، قدرت القيمة الاقتصادية للغاز المتسرب بنحو 50 مليون دولار وفق أسعار الغاز في كاليفورنيا آنذاك، ووصل إجمالي التسويات والتعويضات لاحقاً إلى نحو 1.8 مليار دولار، بالإضافة إلى غرامات تنظيمية بقيمة 71 مليون دولار. وقد شملت التعويضات إخلاء أكثر من 8 آلاف أسرة من المنطقة، إضافة إلى تسوية دعاوى قانونية متعلقة بالصحة والممتلكات (CPUC, 2023)[62].

يلاحظ من مقارنة الحادثتين السابقتين أن كميات الغاز المتسرب من Nord Stream تزيد بأكثر من أربعة أضعاف عن تسرب Aliso Canyon في كاليفورنيا، كما أنه من اللافت للانتباه أن انبعاثات Nord Stream تجاوزت انبعاثات تسرب Aliso Canyon الذي استمر لأربعة أشهر، في يوم واحد فقط.

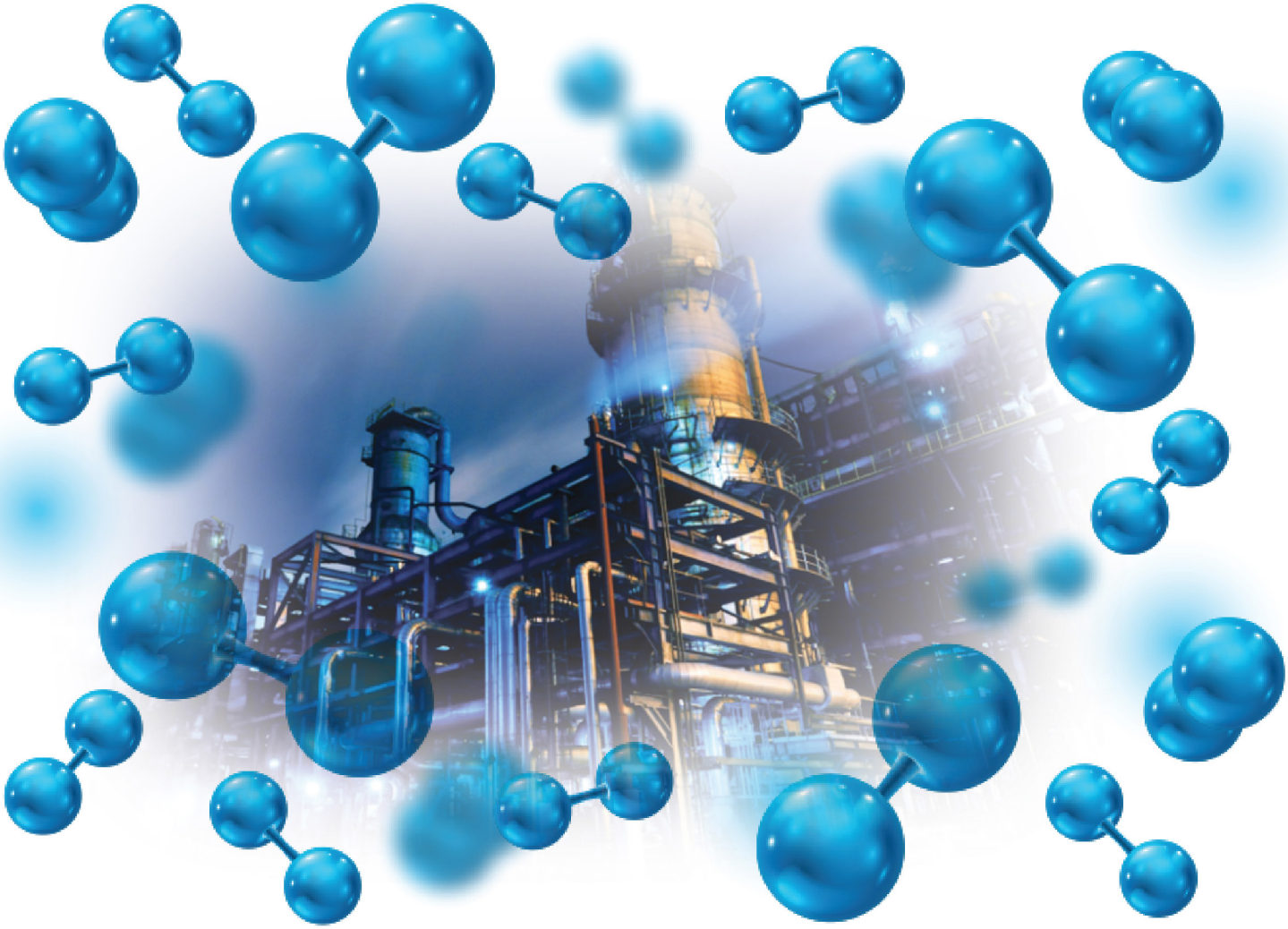
2- 5- 3 انبعاثات الميثان من الزراعة

سبقت الإشارة إلى الزراعة كمصدر رئيسي لانبعاثات غاز الميثان، وهو ما يبرر تسليط بعض الضوء عليها، خاصة أن بعض الأبحاث الحديثة أشارت إلى أن النباتات الأرضية في الظروف الهوائية قد ينبعث منها الميثان مباشرة (EurekAlert, 2025)[63]، وهي نتيجة تتحدى الافتراضات السابقة حول كون إنتاج الميثان مجرد عملية لاهوائية، غير أن المساهمة الإجمالية لهذا المصدر في الميزانية العالمية للميثان لا تزال قيد التحقيق والمناقشة.

ينتج الميثان في ظل ظروف لاهوائية بواسطة مجموعة متنوعة من الكائنات الحية الدقيقة التي تستخدم الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون كمواد أولية. تحدد كمية العلف المستهلكة من قبل الحيوان المجتر إلى حد كبير كمية الميثان المنبعثة، كما يؤثر نوع وجودة العلف أيضاً على هذه الانبعاثات، يمكن أن تؤثر فصيلة الحيوان المجتر، وآلية الهضم وتركيبة الكائنات الميكروبية المقيمة في جهازه الهضمي على كمية الميثان التي ينتجها. من ناحية أخرى، يعد إنتاج الميثان من مخلفات الحيوانات أيضاً عملية ميكروبية لاهوائية، ويحدث في الغالب عندما يتم تخزين هذه المخلفات أو عند استخدامها كسماد، لذلك يؤثر نوع الروث (على سبيل المثال، الرطب مقابل الجاف)، وطريقة التخزين، ومدة التخزين، وتركيبته الكيميائية، ودرجة الحرارة على كمية الميثان المنتجة (Smith, 2021)[64].

أما في الحالة العامة، فربما تكون زراعة الأرز أوضح مثال على انبعاثات الميثان من الزراعة، إذ يلعب الأرز دوراً رئيسيا في الأمن الغذائي العالمي كونه ثاني أكثر المواد الغذائية استهلاكاً في العالم وأكثر المحاصيل المزروعة في آسيا، حيث يمثل الإنتاج الآسيوي نحو 91% من الإنتاج العالمي. في هذا المجال، توضح دراسة (Sujeevan et al, 2024)[65]، أن انبعاثات الميثان العالمية المقدرة من حقول الأرز على مدى العقد الماضي تبلغ 27± 6 مليون طن سنوياً، وهي كمية مرشحة للزيادة بسبب النمو في الطلب العالمي على الغذاء. هذا الرقم لوحده يعادل كل انبعاثات الميثان من قطاع الطاقة في الدول العربية*.

* يمكن للمقارنة الرجوع إلى الجدول 6 من هذه الدراسة.



الفصل الثالث

الجهود الدولية والإقليمية للحد من انبعاثات الميثان

3- 1 الإطار الدولي: تعهد الميثان العالمي

لا شك أن انبعاثات الميثان في أي مكان في العالم تؤثر على الغلاف الجوي بأكمله، فالمناخ لا يعترف بالحدود الوطنية، خاصة أن نسبة معتبرة من انبعاثات الميثان تأتي من حرق الغاز. لذلك فإن الجهود الفردية لأي دولة، مهما كانت كبيرة، لن تكون كافية ما لم تترافق بجهود عالمية منسقة. كما أن وضع أهداف مشتركة يفترض أن يخلق التزاماً جماعياً يمنح زخماً للعمل المناخي ويجعل الدول تتحمل مسؤولية مشتركة ضمن إطار دولي عادل يوفر آليات للتعاون وتبادل المعرفة والتقنيات.

ويمكن للدول المتقدمة من خلال هذه التحالفات، أن تقدم الدعم المالي والتقني للدول النامية لمساعدتها على تنفيذ استراتيجيات للحد من الانبعاثات، وهذا أمر حاسم نظراً للتكاليف الكبيرة المرتبطة بتغيير الممارسات الصناعية والزراعية. كما أن الاتفاقيات الدولية تكن غالباً بمثابة حافز أو إطار مرجعي للسياسات المحلية. فعندما توقع دولة ما على تعهد دولي، فإنها تصبح ملزمة بوضع تشريعات وخطط وطنية لتحقيق هذا التعهد، مما يسرع من وتيرة العمل على المستوى الداخلي.

ضمن هذا المجال يعد تعهد الميثان العالمي Global Methane Pledge مبادرة دولية طموحة أطلقتها الولايات المتحدة والاتحاد الأوروبي خلال مؤتمر الأطراف السادس والعشرين COP26 في عام 2021 (GMB، بدون تاريخ)[66].

يهدف التعهد إلى حشد الجهود الدولية لخفض الانبعاثات العالمية من غاز الميثان بنسبة 30% على الأقل بحلول عام 2030، مقارنة بمستويات عام 2020. وهو هدف جماعي وليس لكل دولة على حدة، حيث يلتزم المشاركون في التعهد بالعمل طوعاً لتحقيق هذا الهدف من خلال تطبيق سياسات وإجراءات وطنية، وتحسين شفافية ودقة تقارير الانبعاثات الوطنية.

بلغ عدد الدول المشاركة في التعهد 160 دولة حتى منتصف عام 2025، ومن أبرزها:

- الولايات المتحدة والاتحاد الأوروبي: هما المؤسسان الرئيسيان للتعهد.
- كندا واليابان ونيجيريا و ميكرونيزيا: انضمت هذه الدول إلى مجموعة تدعى "أبطال التعهد*" لتسريع العمل المناخي (Global Methane Pledge, 2023)[67]. وهي مجموعة يفترض أن يقوم أعضاؤها بالاتحاد للدفاع عن تسريع إجراءات الحد من انبعاثات الميثان وتحفيز المزيد من التقدم من قبل

* Pledge Champions

الدول المشاركة والداعمين للتعهد.

- البرازيل وإندونيسيا والمكسيك: وهي من بين أكبر 10 دول مصدرة لانبعاثات الميثان على مستوى العالم، ويفترض أن تساهم مشاركتها في إحراز تقدم كبير (Germanwatch, 2022)[68].
- دول أخرى من مختلف القارات: تشمل القائمة دولاً مثل أستراليا، والمملكة المتحدة، وكوريا الجنوبية، علاوة على ثماني دول عربية، هي الإمارات العربية المتحدة، والمملكة العربية السعودية، وجمهورية العراق، ودولة قطر، ودولة الكويت، والجمهورية اللبنانية، وسلطنة عمان، والجمهورية اليمنية، مما يعكس التنوع الجغرافي للمشاركين، ويعكس اهتمام الدول العربية وخاصة تلك المنتجة للنفط والغاز في الحد من انبعاثات الميثان.

وتجدر الإشارة إلى أن بعض أكبر مصدرين للميثان في العالم، مثل الصين وروسيا والهند وإيران، لم ينضموا إلى التعهد بعد*. ويتضمن الملحق 1 أسماء الدول الموقعة على التعهد حتى منتصف عام 2025.

لمتابعة آخر التطورات فيما يخص تعهد الميثان الدولي، تمت العودة إلى الموقع الرسمي للمبادرة على الشبكة الدولية (الإنترنت) في أواخر عام 2025، للبحث عن آخر التعهدات التي وضعتها الدول لنفسها ضمن الاستراتيجيات وخطط العمل الوطنية للميثان، وتبين أن هناك بيانات عن 19 جهة فقط من أصل 160 دولة وقعت على التعهد، وهي: البرازيل، كمبوديا، كندا، الصين (رغم أنها لم توقع التعهد)، كوستاريكا، الاتحاد الأوروبي، فنلندا، آيسلندا، ليبيريا، هولندا، نيوزيلندا (مخطط معلومات بياني)، النرويج، بنما، جمهورية كوريا، السويد، أوكرانيا، المملكة المتحدة، الولايات المتحدة الأمريكية، فيتنام.

وكان من الصعب تتبع خطط هذه الدول من الموقع الرسمي، إذ كان عبارة عن روابط لمواقع أخرى استعرضت فيها بعض هذه الدول خططها، وفي توقيت سابق عن عام 2025، أي أن هذه الخطط ليست محدّثة النتائج على موقع التعهد كما قد يتوقع المتابع، وأغلب الروابط الخاصة بالدول الأوربية تؤدي إلى موقع وكالة الطاقة الدولية، التي تضع بعض البيانات من عام 2022 عن خطة العمل الوطنية للميثان، فعلى سبيل المثال، يبين رابط النرويج أنه ليس لديها أهداف محددة لخفض غاز الميثان، ولكن تم إدراج الغاز ضمن الهدف الشامل لخفض انبعاثات الغازات الدفيئة بنسبة 55% بحلول عام 2030 و90- 95% بحلول عام 2050 مقارنةً بمستويات عام 1990 (IEA, 2022)[69].

* حتى شهر أغسطس 2025

3- 2 الشراكة العالمية للحد من حرق الغاز والميثان

أطلقت الشراكة العالمية للحد من حرق الغاز في عام 2002 خلال مؤتمر القمة العالمي للتنمية المستدامة بجوهانسبرغ، . تضم هذه الشراكة ممثلين عن حكومات وشركات نفط وطنية وعالمية، وتهدف إلى مواجهة مشكلة حرق الغاز من خلال:

- تبادل الخبرات وتشجيع الدول الأعضاء على مشاركة تجاربها الناجحة في الحد من حرق الغاز.
- تصميم برامج تتناسب مع ظروف كل دولة على مدار أربع سنوات لتجاوز التحديات المتعلقة بحرق الغاز.
- تسهيل الاستفادة من الغاز المحروق ودعم الجهود الوطنية لتحويل الغاز المحروق إلى مصدر طاقة مفيد، وذلك عبر تشجيع الأطر التنظيمية الفعالة وتذليل العقبات مثل ضعف البنية التحتية وصعوبة نقل الغاز إلى الأسواق المحلية والعالمية، خاصة في الدول النامية.

كما تتبنى الشراكة رؤية شاملة تتجاوز الجانب البيئي لتشمل البعد الاجتماعي، حيث تولي اهتماماً خاصاً لموضوع الفقر. فقد عملت على تطوير برامج تتيح للمجتمعات المحلية القريبة من حقول النفط الاستفادة من الغاز المحروق وغاز البترول المسال، مما خلق فرصاً للاستخدام على نطاق ضيق في عدة دول، لكنها ذات تأثير ملموس على حياة سكان تلك المناطق (حمش، 2016).

قامت المبادرة التي أطلقها البنك الدولي على مبدأ واضح: حرق الغاز المصاحب لإنتاج النفط أو إطلاقه في الجو هو إجراء غير مستدام على الصعيدين الفني والاقتصادي. ولهذا السبب، اجتمع ممثلون عن شركات النفط الكبرى مع مسؤولين حكوميين من عدة دول منتجة للبترول، وفي السابع عشر من أبريل 2015، أعلنوا عن اتفاق تاريخي لإيقاف عملية الحرق الروتيني للغاز بشكل نهائي في جميع مواقع إنتاج النفط بحلول عام 2030. وقد أطلق على هذه المبادرة اسم "القضاء على الحرق الروتيني بحلول عام 2030".

وفي أواخر عام 2023، تم تعديل اسم الاتفاقية ليصبح "الشراكة العالمية للحد من حرق الغاز والميثان" GFMR*، وهي بحسب تعريف البنك الدولي (World Bank, 70)[70] صندوق مدعوم من قبل الحكومات والشركات والمنظمات متعددة الأطراف، الملتزمة بإنهاء حرق الغاز الروتيني والحد من انبعاثات الميثان من قطاع النفط والغاز. حيث تذكر الاتفاقية أن غاز الميثان هو أحد الغازات الدفيئة القوية، وتصل قدرته على

* Global Flaring & Methane Reduction Partnership

إحداث الاحترار العالمي إلى 80 ضعف قدرة ثاني أكسيد الكربون على مدى 20 عاماً، لكنه لا يبقى في الغلاف الجوي سوى لعقد من الزمان تقريباً، مقارنة بمئات السنين لثاني أكسيد الكربون. لذا، فإن خفض انبعاثاته بسرعة يعد من أهم الإجراءات المناخية التي يمكننا اتخاذها على المدى القصير. وتوضح الاتفاقية أن عمليات النفط والغاز تطلق غاز الميثان من خلال الحرق والتنفيس، بالإضافة إلى الانبعاثات غير المقصودة (التسربات). وتوضح الاتفاقية كذلك أن صناعة النفط والغاز مسؤولة عن ما يقرب من ربع انبعاثات الميثان الناتجة عن الأنشطة البشرية عالمياً*، ويحدث حوالي نصف هذه الانبعاثات في البلدان النامية. وترى اتفاقية الشراكة أن الاستفادة الكاملة من حلول الحد من الميثان في قطاع النفط والغاز يمكن أن تمنع ارتفاع درجة الحرارة بحوالي **0.1** درجة مئوية بحلول عام 2050. ومع ذلك، لا يتلقى التخفيف من انبعاثات الميثان سوى جزء ضئيل من التمويل المخصص للمناخ. وتدعم "الشراكة العالمية للحد من حرق الغاز والميثان" البلدان التي تفتقر إلى القدرات والموارد اللازمة لمعالجة هذه الانبعاثات، بينما تعمل أيضاً على جذب مليارات الدولارات من التمويل من القطاعين الخاص والعام.

رغم هذه الاتفاقيات الطموحة في سبيل الحد من حرق الغاز ومن انبعاثات الميثان، يلاحظ أن حرق الغاز بلغ 151 مليار متر مكعب في عام 2024، مقارنة بنحو 148 مليار متر مكعب في عام 2021. ويشير البنك الدولي هنا إلى أن هذا الغاز المهدور كان بالإمكان الاستفادة منه في توليد الطاقة خاصة في البلدان الفقيرة بمصادر الطاقة. ويتابع البنك الدولي بأن ثمن هذه الكميات المهدورة من الغاز يتراوح بين 19- 63 مليار دولار حسب أسعار الغاز في عام 2024 (World Bank, 2025). في الواقع، سبق لمنظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول أن لاحظت هذه النقطة تحديداً قبل عشر سنوات في دراسة عن حرق الغاز، ورد فيها: "يستثمر العاملون في الصناعة البترولية رؤوس أموال هائلة ومن البديهي أن هذه الاستثمارات يفترض أن تعود بالربح على الشركات. مما يقود دوماً لسؤال بديهي: لماذا يتم حرق الغاز بدل استثماره والاستفادة منه؟ وعادة ما يترجم هذا السؤال من قبل العديد من الجهات إلى دولارات ضائعة محروقة بلا مبرر"(حمش، 2016).

وقد بينت الدراسة في حينه أن عملية حرق الغاز أو تنفيسه هي نتيجة لمجموعة من الأسباب الفنية والاقتصادية المتشابكة. ففي المراحل الأولى من التنقيب والاستكشاف، لا بد من إجراء اختبار للآبار لتحديد قدرتها الإنتاجية وأخذ عينات منها، وخلال هذه المرحلة يحرق الغاز المصاحب للنفط كإجراء أمان أساسي

* وهو رقم يتوافق مع ما ذكر في الجدول 5 من هذه الدراسة التي بينت أن قطاع النفط والغاز يصدر 23% فقط من إجمالي انبعاثات الميثان في العالم.

لتجنب مخاطر الانفجارات، نظراً لعدم توفر البنية التحتية اللازمة لتخزينه أو الاستفادة منه.

وحتى في مراحل التطوير والإنتاج المستقر، قد تظل عملية الحرق ضرورية لأسباب اقتصادية. ففي بعض الأحيان، تكون تكلفة المعدات اللازمة لاسترجاع الغاز مرتفعة للغاية، أو أن كميات الغاز المذابة في النفط صغيرة جداً، أو أن الحقول متباعدة جغرافياً، مما يجعل إنشاء شبكات أنابيب خاصة لنقل الغاز غير مجدٍ اقتصادياً.

وتضاف إلى ذلك حالات الطوارئ والحوادث العرضية أثناء عمليات الحفر أو الإنتاج أو المعالجة أو النقل، حيث يمكن أن تؤدي هذه الحوادث إلى تسرب الغاز. كما أن هناك حاجة للتخلص من الغاز المذاب في سوائل الحفر أو المعالجة بعد الانتهاء من هذه العمليات.

وحتى عندما يتم استرجاع الغاز وحقنه أو نقله، لا يمكن الاستغناء عن حرق كميات صغيرة منه لأسباب تتعلق بالسلامة. فالمنشآت النفطية تعمل تحت ضغوط ودرجات حرارة عالية، وفي حالات الارتفاع المفاجئ للضغط، تقوم صمامات الأمان بتحويل الغاز الزائد إلى الشعلة لحماية المنشأة والعاملين. علاوة على ذلك، تحرق كميات قليلة من الغاز عند التخلص من خطوط الأنابيب المهجورة لضمان خلوها من أي غاز متبقٍ، فوجود غاز الميثان بنسبة 5% في الهواء يشكل مزيجاً انفجارياً خطيراً.

أما عن الجانب الكيميائي، فقد يفرض وجود بعض الغازات السامة في الغاز المصاحب ضرورة حرقه. فعلى سبيل المثال، إذا كان الغاز يحتوي على نسبة عالية من كبريتيد الهيدروجين، يحرق للتخلص منه بأمان، مما يحوله إلى ثاني أكسيد الكبريت وبخار الماء. ورغم أن ثاني أكسيد الكبريت يساهم في ظاهرة الأمطار الحمضية، إلا أن خطره يظل أقل بكثير من خطر كبريتيد الهيدروجين السام. ويلاحظ أن وجود كبريتيد الهيدروجين مع غاز الميثان يمكن أن يقلل من كفاءة الحرق، مما يؤدي إلى إطلاق جزء من هذين الغازين في الجو دون حرقهما.

تعتبر روسيا الجهة الأكبر في العالم في مجال حرق الغاز، حيث مثلت كميات الغاز المحروق فيها عام 2024 أكثر من 19% من إجمالي ما أحرقه العالم، تلتها إيران بأكثر من 15%. ويبين الجدول 8 الدول العشر التي تتصدر مشهد حرق الغاز في العالم بحسب بيانات البنك الدولي (World Bank, 2025)[71]، ويلاحظ منه أن السعودية رغم أنها أكبر مصدر للنفط في العالم، إلا أنها تحل في المرتبة العاشرة بين الدول التي تحرق الغاز في العالم، وبنسبة تقل عن 2% مما إجمالي المحروق. وبطبيعة الحال يرتبط حرق الغاز بشكل أساسي مع النفط كغاز مصاحب، وهو ما يمكن تبينه من الشكل 8 الذي يوضح أن عدم وجود صلة وثيقة مع الغاز

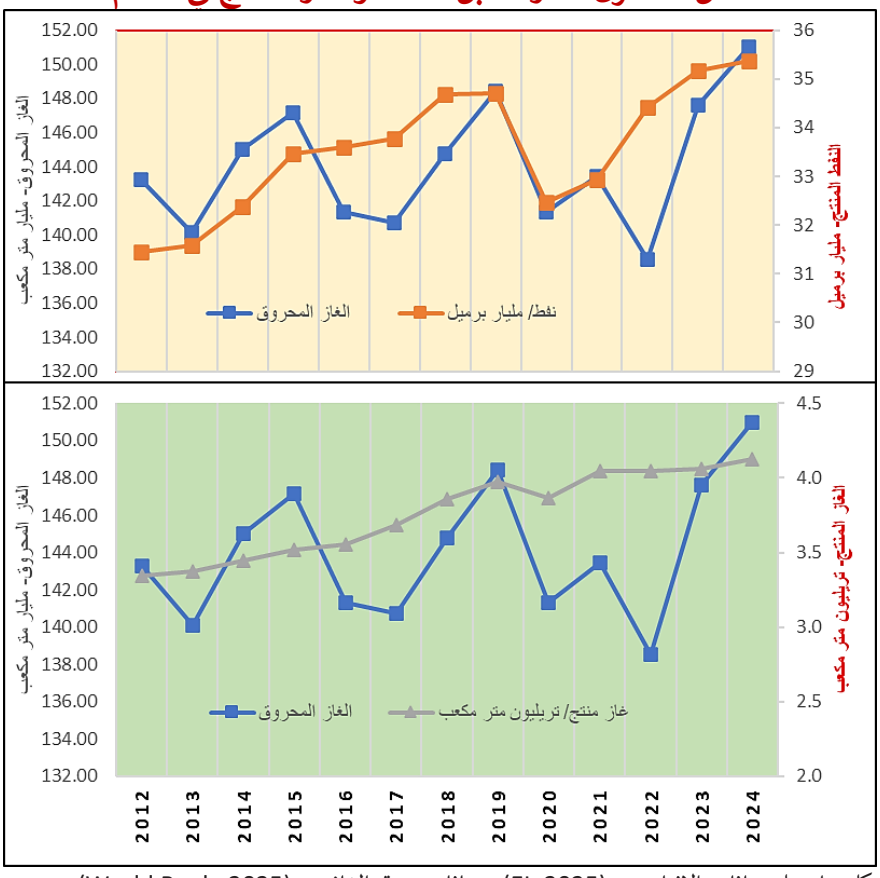
الطبيعي المنتج.

الجدول 8: الدول العشر الأولى في حرق الغاز عام 2024

الدولة	مليار متر مكعب	النسبة من إجمالي العالم
روسيا	28.85	%19.1
إيران	22.81	%15.1
العراق	18.18	%12.0
الولايات المتحدة	10.20	%6.8
فنزويلا	8.31	%5.5
الجزائر	7.88	%5.2
نيجيريا	6.48	%4.3
ليبيا	6.28	%4.2
المكسيك	5.72	%3.8
السعودية	2.46	%1.6

المصدر: تم تلخيص النتائج واستخراج النسب المئوية بناء على بيانات (World Bank, 2025)

الشكل 8: حرق الغاز مقابل النفط والغاز المنتج في العالم



المصدر: تم إعداد الشكل بناء على بيانات الإنتاج من (EI, 2025) و بيانات حرق الغاز من (World Bank, 2025)

خلال مساعي مختلف الدول للحد من انبعاثات الميثان، يلاحظ أن التوجه العام هو نحو الحد من هذه

الانبعاثات في الصناعة البترولية أكثر من غيرها، ربما لأن القطاع الزراعي لا يحتمل تخفيض الإنتاج.

رغم ذلك -ومن بين التوجهات في هذا المضمار- هناك محاولات مختلفة للحد من انبعاثات الميثان في القطاع الزراعي، ومنها حقول الأرز على سبيل المثال. تتعلق أساليب التخفيف من انبعاثات الميثان من حقول الأرز في الغالب بإدارة المياه والأسمدة، بالإضافة إلى اختيار أصناف الأرز. ومع ذلك، غالباً ما تعتمد فعالية تقنيات إدارة المياه والأسمدة على جدواها الاقتصادية (Gupta et al, 2015)[72].

وقد أظهرت بعض المحاولات مثل تصريف المياه في منتصف الموسم، والتصريف المتقطع، والتجفيف والري بالتناوب، تخفيضات كبيرة في انبعاثات الميثان (Malyan et al, 2016). ومع ذلك، قد لا تكون هذه الطرق مناسبة للأرز المزروع في المياه العميقة أو للأصناف التي تعتمد بشكل كبير على المياه لتحقيق الأداء الأمثل خلال جميع مراحل النمو . وظهرت محاولات أخرى لزراعة الأرز من البذور مباشرة بدل استخدام الشتلات، ولوحظ أن بإمكانها خفض انبعاثات الميثان، إلا أن الأرز المزروع عبر الشتلات يعطي إنتاجية وعائدات صافية أفضل بشكل عام (Weerakoon, 2011)[73]. كما أسفرت إدارة الأسمدة عن نتائج واعدة في الحد من انبعاثات الميثان في حقول الأرز، حيث أظهرت الأسمدة النيتروجينية مثل الأسمدة القائمة على الأمونيوم إمكانية تقليل انبعاثات الميثان بنسبة تصل إلى 50%، وبينت بعض التجارب السابقة أن استخدام الأسمدة الكبريتية يعزز أكسدة الميثان في الظروف الهوائية، بينما يؤدي استخدام البوتاسيوم إلى انخفاض بنسبة 49% في انبعاثات الميثان (Jagadeesh Babu et al, 2006)[74]. كما أثبتت الأسمدة الحيوية قدرتها على الحد من انبعاثات الميثان في العديد من الدراسات. ومع ذلك، لا تزال فعالية الأسمدة الحيوية كاستراتيجية للتحكم في انبعاثات الميثان قيد التقييم (Mitter et al, 2021)[75].

ومن الأمثلة على هذه المشاريع، يمكن الإشارة إلى مشروع: المليون هكتار" الذي تبنته الحكومة الفيتنامية وأعلنت عنه في نوفمبر 2023. يركز المشروع على إنتاج مستدام للأرز مع تخفيض انبعاثات الميثان. ويعتمد على الري المتقطع للمحصول، وتخفيض عدد الشتلات، وتخفيض كميات السماد والمبيدات الحشرية (World Bank, 2023)[76]. كما يتضمن استخدام معدات زراعية حديثة ومتطورة.

تبلغ التكلفة الاستثمارية الإجمالية المتوقعة للمشروع حوالي 2.7 مليار دولار بحلول عام 2030 حسبما أوردته وكالة الأنباء الفيتنامية ويعد البنك الدولي شريكاً رئيسياً، إذ يوفر قرضاً بقيمة 330 مليون دولار لدعم البنية التحتية والمكوّنات الفنية.

يهدف المشروع إلى تخفيض انبعاثات غازات الدفيئة، ويتمثل الهدف الرئيسي في تقليل الانبعاثات

بمقدار 10 ملايين طن مكافئ ثاني أكسيد كربون بحلول 2030. ويعد هذا الهدف الطموح جزءاً محورياً من التزام فيتنام بتحقيق صافي انبعاثات صفرية بحلول عام 2050. كما يتوقع أن يتم تسويق الوفورات من الكربون، حيث سيحصل المزارعون على دخل من بيع أرصدة الكربون، مما يوفر لهم حافزاً مالياً مباشراً لاعتماد هذه الممارسات منخفضة الانبعاثات (VNA, 2024)[77].

3- 3 كلفة تخفيض انبعاثات الميثان

تتطلب جهود الحد من حرق الغازات انبعاثات الميثان استثمارات كبيرة عبر سلسلة القيمة العالمية للنفط والغاز. وقدّرت دراسة واسعة أجراها البنك الدولي في عام 2018 أن تكلفة إنهاء حرق الغاز الروتيني وحده ستبلغ حوالي 100مليار دولار.

من جانبها، قدّرت وكالة الطاقة الدولية أن هناك حاجة لإنفاق أولي يبلغ حوالي 70مليار دولار بين عامي 2022 و2023 لتحقيق التخفيضات في حرق الغاز التي يتصورها سيناريو صافي الانبعاثات الصفري بحلول عام 2050، كما يحتاج العالم إلى رصد 100 مليار دولار في قطاع النفط والغاز لإجراءات تخفيف انبعاثات الميثان. وترى الوكالة أن حوالي نصف هذا الإنفاق يجب أن يوظّف في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل، حيث تكون مصادر التمويل محدودة (GFMR, 2025).

من ناحية أخرى، ترى بعض الجهات أن خفض انبعاثات الميثان يمكن أن يكون مجدياً اقتصادياً عند تطبيق الأدوات المناسبة، وهو ما ينعكس في تقارير ومراجعات تحليلية توضح الفوائد المالية والاجتماعية المترتبة على خفض الانبعاثات. فعلى سبيل المثال يرى "المعهد الدولي لتحليل النظم التطبيقية*" في أستراليا أنه يمكن تحقيق أكثر من 80% من إمكانات تخفيض انبعاثات الميثان بحلول عام 2030 بتكلفة نسبية منخفضة تصل إلى أقل من 1000 دولار لكل طن من الميثان، أو حوالي 36 دولار لكل طن من مكافئ ثاني أكسيد الكربون، بالإضافة إلى فوائد صحية ناتجة عن انخفاض تكوّن الأوزون في طبقة التروبوسفير، مما سيمنع أكثر من 180 ألف حالة وفاة مبكرة، فضلاً عن خسائر في المحاصيل الزراعية تقدر بنحو 19 مليون طن سنوياً بحلول عام 2030. وتقدر القيمة الاقتصادية لهذه الفوائد الإضافية بأكثر من 330 مليار دولار أمريكي سنوياً (Isaksson, 2025)[78]. ويتفق هذا مع تقارير أخرى تشير إلى إمكانية تحقيق تخفيضات واسعة

* International Institute for Applied Systems Analysis

لانبعاثات قطاعات النفط والغاز باستخدام خيارات متاحة تقنياً وبتكاليف قليلة، حيث إن جزءاً كبيراً من الميثان المنتج من الوقود الأحفوري يمكن حجزه واستخدامه كمنتج يمكن بيعه، مما يوفر منفعة مالية للشركات بدل أن يهدر (Denis-Ryan et al, 2024)[79].

وعلى الصعيد التنظيمي، فإن المقارنة بين أثار فرض ضرائب على الميثان مقابل تطبيق معايير تقنية إلزامية في قطاع النفط والغاز تظهر أن آليات الضرائب يمكن أن تكون أقل تكلفة وتشجع الابتكار التقني مقارنة بالتنظيمات المباشرة، مما يشير إلى دور السياسات الاقتصادية في تسريع تبني التقنيات المنخفضة الانبعاثات (Long et al, 2023)[80].

ومن الناحية العملية، تبرز تجارب عالمية مثل انخفاض انبعاثات الميثان في حوض بيرميان بنسبة تتجاوز 50% نتيجة تطبيق تقنيات مراقبة متقدمة، بما في ذلك استخدام كاشفات ذكية وأجهزة استشعار أرضية، ما يعكس كيف أن الاستثمار في التقنيات الحديثة لا يحسن فقط الأداء البيئي بل يقلل من خسائر الموارد (McEwen, 2025)[81].

والواقع أنه من خلال مساعي مختلف الدول للحد من انبعاثات الميثان، يلاحظ أن التوجه العام هو نحو الحد من هذه الانبعاثات في الصناعة البترولية أكثر من غيرها، ربما لأن القطاع الزراعي لا يحتمل تخفيض الإنتاج، بل هناك محاولات في كل مكان لرفع الإنتاج الزراعي لمواجهة الطلب المتنامي على الغذاء في العالم.

رغم ذلك -ومن بين التوجهات في هذا المضمار- هناك محاولات مختلفة للحد من انبعاثات الميثان في القطاع الزراعي، ومنها حقول الأرز على سبيل المثال. تتعلق أساليب التخفيف من انبعاثات الميثان من حقول الأرز في الغالب بإدارة المياه والأسمدة، بالإضافة إلى اختيار أصناف الأرز. وغالباً ما تعتمد فعالية تقنيات إدارة المياه والأسمدة على جدواها الاقتصادية (Gupta et al, 2015)[82].

وقد أظهرت بعض المحاولات مثل تصريف المياه في منتصف الموسم، والتصريف المتقطع، والتجفيف والري بالتناوب، تخفيضات كبيرة في انبعاثات الميثان (Malyan et al, 2016). إلا أن هذه الطرق قد لا تكون مناسبة للأرز المزروع في المياه العميقة أو للأصناف التي تعتمد بشكل كبير على المياه لتحقيق الأداء الأمثل خلال جميع مراحل النمو .

وأسفرت إدارة الأسمدة عن نتائج واعدة في الحد من انبعاثات الميثان في حقول الأرز، حيث أظهرت الأسمدة النيتروجينية مثل الأسمدة القائمة على الأمونيوم إمكانية تقليل انبعاثات الميثان بنسبة تصل إلى 50%، وبينت بعض التجارب السابقة أن استخدام الأسمدة الكبريتية يعزز أكسدة الميثان في الظروف الهوائية، بينما يؤدي

استخدام البوتاسيوم إلى انخفاض بنسبة 49% في انبعاثات الميثان (Jagadeesh Babu et al, 2006)[83]. كما أثبتت الأسمدة الحيوية قدرتها على الحد من انبعاثات الميثان في العديد من الدراسات. ومع ذلك، لا تزال فعالية الأسمدة الحيوية كاستراتيجية للتحكم في انبعاثات الميثان قيد التقييم (Mitter et al, 2021)[84].

ومن الأمثلة على هذه المشاريع، يمكن الإشارة إلى مشروع: المليون هكتار الذي تبنته الحكومة الفيتنامية وأعلنت عنه في نوفمبر 2023.

يبرز هذا المشروع كمبادرة رائدة تهدف إلى إحداث نقلة نوعية في قطاع إنتاج الأرز المستدام، حيث يرتكز على منهجية علمية متطورة تعتمد تقنيات الري المتقطع المبتكرة، وتعزز كفاءة الإنتاج عبر تقنين أعداد الشتلات، وتقليص الاعتماد على الأسمدة والمبيدات الحشرية بشكل جذري، بما يضمن توازناً بيئياً دقيقاً (World Bank, 2023)[85]. كما يتضمن استخدام معدات زراعية حديثة ومتطورة.

تتجلى ضخامة هذا التوجه في الكتلة الاستثمارية الهائلة المرصودة له، والتي تقدر بنحو 2.7 مليار دولار بحلول عام 2030 وفقاً لتقارير وكالة الأنباء الفيتنامية. وفي هذا السياق، يبرز البنك الدولي بصفته شريكاً استراتيجياً فاعلاً، حيث قدم قرضاً بقيمة 330 مليون دولار لدفع عجلة تطوير البنية التحتية والمكونات الفنية للمشروع (Stankova, 2024)[86].

يهدف المشروع عموماً إلى تخفيض انبعاثات الميثان، وتبرز الغاية الرئيسية منه في تقليل الانبعاثات بمقدار 10 ملايين طن مكافئ ثاني أكسيد كربون بحلول 2030. ويعد هذا الهدف الطموح جزءاً محورياً من التزام فيتنام بتحقيق صافي انبعاثات صفرية بحلول عام 2050. كما يتوقع أن يتم تسويق الوفورات من الكربون، حيث سيحصل المزارعون على دخل من بيع أرصدة الكربون، مما يوفر لهم حافزاً مالياً مباشراً لاعتماد هذه الممارسات منخفضة الانبعاثات (VNA, 2024)[87].

يلاحظ من بيانات هذا المشروع، أن الاستثمارات المقدرة بنحو 2.7 مليار دولار، يتوقع لها أن تخفض انبعاثات الميثان بمقدار 10 ملايين طن مكافئ ثاني أكسيد كربون بحلول عام 2030 أي خلال 7 سنوات من عمر المشروع، وبالتالي ستبلغ كلفة تخفيض الطن الواحد من الانبعاثات نحو 270 دولار، كما يتوقع أن يدر المشروع أرصدة كربون بقيمة 10دولارات لكل طن مكافئ من ثاني أكسيد الكربون.

ولما كانت دراسة الجدوى والتكاليف التفصيلية لتخفيض انبعاثات الميثان، تتجاوز أهداف هذه الدراسة، فربما يلخص الجدول 9 تحليلاً مقارناً لهياكل التكلفة والجدوى الاقتصادية لتقنيات خفض انبعاثات الميثان عالمياً:

الجدول 9: المؤشرات المرجعية لتكاليف خفض الميثان: الجدوى المالية والوفورات الاقتصادية في بعض القطاعات الاستراتيجية

فئة التكلفة/ النطاق	التفسير	أمثلة على القطاعات/ ملاحظات	المصدر
من تكلفة سالبة إلى تكلفة إيجابية متواضعة	أكثر من 50% من الإجراءات المستهدفة قد تسترد تكاليفها (تكلفة سالبة) عبر قيمة الميثان المحتجز، معظم الخيارات أقل من ~600 دولار لكل طن ميثان.	قطاعات النفط والغاز، الفحم، والنفايات لديها فرص كبيرة منخفضة التكلفة أو ذات تكلفة سالبة.	برنامج الأمم المتحدة للبيئة/ تحالف تقييم الميثان العالمي GMA
~30-40% من خفض ميثان الوقود الأحفوري بدون تكلفة صافية، العديد من الإجراءات بتكلفة متوسطة.	الإجراءات تحتجز كمية غاز كافية لتغطية التكاليف، الخيارات منخفضة التكلفة تهيمن على إمكانات الخفض.	بناءً على متوسط أسعار الطاقة لعام 2024، تشمل التحديثات، كشف التسربات وإصلاحها، وتحسين عمليات الحرق.	متتبع الميثان العالمي (IEA)
80% من إمكانات التخفيف أقل من 1000 دولار لكل طن ميثان (≈ 36 دولاراً/طن مكافئ CO_2)	معظم عمليات الخفض الممكنة تقنياً ذات تكلفة منخفضة نسبياً، الإجمالي حوالي 127 مليار دولار سنوياً عالمياً.	تغطي قطاعات الطاقة، والزراعة، والنفايات حتى عام 2030.	المعهد الدولي لتحليل النظم التطبيقية IIASA
العديد من خيارات خفض قطاع النفط والغاز ≥ ~10 دولارات لكل طن مكافئ CO_2 (صافي التكلفة الحالية)	تشير إلى أن حوالي 74% من انبعاثات قطاع النفط والغاز يمكن خفضها بتكلفة منخفضة جداً.	تأخذ في الاعتبار الإيرادات الناتجة عن بيع الميثان المحتجز في أسواق الغاز.	مركز Belfer للعلوم والشؤون الدولية/ ملخص تكاليف (IEA)
التكاليف تتباين بشكل كبير، لكن العديد من الخيارات تتمحور حول أقل من بضع مئات الدولارات لكل طن مكافئ CO_2	تظهر تحليلات أخرى أن تكاليف الخفض الحدي للميثان أقل بكثير من تقديرات التكاليف الاجتماعية (~150- 300+ دولار).	تشير إلى القيمة الكبيرة للفوائد المصاحبة (الصحة، المناخ، والإنتاجية).	مصادر وأدبيات أخرى

المصدر: من إعداد الباحث بناء على المصادر التالية:
UNEP (2021), Global Methane Tracker (2024) , IIASA policy assessment (2025), World Bank (2023), Global Methane Science Report (2025)[88]

يعكس هذا الجدول فعلياً خلاصة الأبحاث الاقتصادية والمناخية الحديثة حول اقتصاديات الميثان، ويوضح أن خفض الميثان ليس مجرد التزام بيئي، بل ربما يكون فرصة اقتصادية تختلف جذرياً عن مشاريع خفض ثاني أكسيد الكربون، حيث يبين ما يلي:

1. **مفهوم التكلفة السالبة:** تشير بيانات برنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP) ووكالة الطاقة الدولية (IEA) إلى أن جزءاً كبيراً من إجراءات خفض الميثان يتسم بتكلفة صافية سالبة. علمياً، هذا يعني أن القيمة السوقية للميثان الذي يتم احتجازه (باعتباره غازاً طبيعياً يمكن بيعه) تتجاوز تكلفة المعدات والتشغيل اللازمة لمنع

تسربه. وهذا ينطبق بشكل خاص على قطاع النفط والغاز، حيث يعتبر إصلاح التسريبات استثماراً مربحاً بحد ذاته.

2. **التكلفة الحدية للخفض:** يوضح الجدول أن الغالبية العظمى من إمكانات التخفيف (حوالي 80% وفقاً لمعهد IIASA) تقع ضمن نطاق سعري يقل عن 1000دولار لكل طن من الميثان. إذا تم تحويل هذا الرقم إلى مكافئ ثاني أكسيد الكربون، سيلاحظ أن التكلفة منخفضة جداً (حوالي 36 دولاراً للطن). وهذا الرقم يقل كثيراً عن تكلفة إزالة ثاني أكسيد الكربون من الجو، مما يجعل الميثان أكثر جاذبية للاستثمار في سياسات التغير المناخي.

3. **التباين القطاعي في الجدوى:** يظهر الجدول تمايزاً واضحاً بين القطاعات، فقطاع الطاقة (النفط والغاز) هو الأكثر كفاءة اقتصادياً، حيث يمكن خفض نحو ثلاثة أرباع انبعاثاته بتكاليف زهيدة جداً أو أرباح صافية. يليه قطاع النفايات والزراعة، والذي قد تكون تكاليفه أعلى مقارنة بقطاع الطاقة، إلا أنها تظل ضمن النطاق الاقتصادي، وتعتمد بشكل كبير على تحسين كفاءة الموارد (مثل تحويل النفايات إلى طاقة أو تحسين كفاءة التغذية الحيوانية).

4. **التكلفة الاجتماعية مقابل تكلفة التخفيف:** تشير العديد من الدراسات إلى وجود فجوة بين تكلفة منع الانبعاث وتكلفة الضرر الناتج عنها. فبينما قد يكلف منع طن من الميثان بضع مئات من الدولارات، فإن الفائدة الاجتماعية المكتسبة من منعه (تحسن الصحة العامة، زيادة إنتاجية المحاصيل، وتقليل الكوارث المناخية) تقدر بآلاف الدولارات.

3- 3- 1: الميثان وصناعة الطعام في العالم

يندرج ضمن مفهوم كلفة تخفيض انبعاثات الميثان موضوع في غاية الأهمية، وهو تأثيره على صناعة الطعام في العالم، فقد وصل ما يمكن تسميته بالتطرف المناخي إلى حدود غير مسبوقة، حيث تجاوزت الأجندات البيئية مجرد خفض الانبعاثات لتصل إلى محاولة هندسة السلوك البشري، هذا الاندفاع نحو بدائل مخبرية لمصادر الغذاء واقتراح فرضها كواقع حتمي، أثار ردود فعل تشريعية وشعبية مختلفة في عدة دول. وقد سبق لمؤسس شركة مايكروسوفت بيل غيتس، أن حث دول العالم الغنية على التحول إلى أكل اللحم الاصطناعي synthetic beef، على أن تتبعهم الدول الفقيرة لاحقاً، معتبراً أن الأبقار والسماد من الأسباب الخفية لتغير المناخ (Temple, 2021)[89]. ورأى الكثيرون في تلك الدعوة اختزالاً للبشر إلى مجرد وحدات استهلاك يمكن إعادة برمجة أذواقها وثقافتها وأنماط حياتها بضغطة زر.

لابد في كل الأحوال من التنويه إلى دراسة هامة تضمنت تحليلاً شاملاً لكيفية تأثير النظام الغذائي العالمي على أهداف المناخ الدولية (Clark et al, 2020)[90]، إذ أكد الباحثون في جامعة أكسفورد أن الجهود العالمية المبذولة لتقليل انبعاثات الوقود الأحفوري في قطاعات الطاقة والنقل والصناعة، رغم ضرورتها، لن تكون كافية وحدها لتحقيق أهداف اتفاقية باريس للمناخ (حصر الاحترار عند 1.5° أو 2° مئوية). إذ يساهم النظام الغذائي العالمي حالياً بنحو 30% من إجمالي انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، وهي نسبة ناتجة عن إزالة الغابات، واستخدام الأسمدة الكيماوية، وعمليات التخمير المعوي للمواشي (الميثان)، وهدر الطعام. وأشار الباحثون إلى أنه في حال استمرار نمط الإنتاج والاستهلاك الغذائي الحالي، فإن انبعاثات النظام الغذائي وحده ستتجاوز الميزانية الكربونية المسموح بها للوصول إلى هدف 1.5° مئوية في غضون عقود قليلة (بين عامي 2051 و2063)، حتى لو توقفت جميع الانبعاثات الناتجة عن الوقود الأحفوري فوراً. كما أن هذا المسار يهدد بشكل مباشر إمكانية تحقيق هدف 2° مئوية بحلول نهاية القرن. ووضع الباحثون خمس استراتيجيات لتفادي هذه الأزمة، يجب أن يتم تبنيها بشكل متزامن وشامل:

1. التحول إلى أنظمة غذائية نباتية: من خلال تقليل الاعتماد على اللحوم والمنتجات الحيوانية لصالح أغذية تعتمد على النباتات.
2. الالتزام بالسعرات الحرارية الصحية عبر ضبط استهلاك الفرد العالمي ليكون ضمن الحدود الصحية، مما يقلل الضغط على الإنتاج.
3. تحسين إنتاجية المحاصيل وسد فجوات الغلة الزراعية من خلال الابتكار الجيني والممارسات الزراعية المتقدمة.
4. تقليل هدر الطعام وخفض الفقد والنفايات الغذائية بنسبة 50% على طول سلسلة الإمداد.
5. رفع كفاءة الإنتاج لتقليل كثافة الانبعاثات لكل وحدة غذاء من خلال تقنيات زراعية أكثر استدامة وتطوراً.

وفي المجمل خلصت الدراسة إلى أن تحقيق هدف 1.5° مئوية يتطلب تغييراً سريعاً وطموحاً في جميع هذه المسارات مجتمعة، إذ لا تكفي أي استراتيجية منها بمفردها. وحذر الباحثون من أن أي تأخير في تنفيذ هذه التغييرات سيجعل من المستحيل تقريباً البقاء ضمن الحدود الآمنة لدرجات الحرارة العالمية. وبجانب الفوائد المناخية، رأى الباحثون أن هذا التحول سيحقق مكاسب إضافية كبيرة تتعلق بالصحة العامة، والتنوع البيولوجي، واستدامة الموارد المائية.

إن النظر بعمق إلى هذه الدراسة (ومثيلاتها) التي تعتمد على النمذجة الرياضية يبين أنها غالباً ما تميل إلى تبسيط الواقع الإنساني المعقد لتحويله إلى أرقام ومعادلات قابلة للقياس، لكن عند الانتقال من مختبر الحسابات إلى الواقع، تظهر فجوات كبيرة. فهذه الدراسة تتبنى باستعلاء منظوراً مركزياً غربياً يسعى لفرض نظام غذائي موحد يتجاهل أن الغذاء ليس مجرد سعرات حرارية، بل هو ضربٌ من التنوع الثقافي حيث يعتبر استهلاك اللحوم جزءاً أصيلاً من الطقوس الاجتماعية والدينية في العديد من دول العالم، كما أن فرض أنماط غذائية معينة، يتجاهل حق الناس في تحديد أنظمتها الغذائية والزراعية بما يتناسب مع بيئتها المحلية.

علاوة على ذلك، تتعامل الدراسة مع الأبقار والأغنام على أنها عبء بيئي فقط، متجاهلة أدوارها الحيوية الأخرى حيث يعتمد مئات الملايين من صغار المزارعين في أفريقيا وآسيا على الماشية كوسيلة وحيدة للعيش، كما تعتبر المنتجات الحيوانية المصدر الوحيد المتاح للبروتين في المناطق الفقيرة. وتفترض الدراسة أن التحول للنظام النباتي أو خفض السعرات هو مجرد خيار سهل متاح للجميع، وهذا أبعد ما يكون عن الواقع، فبينما تتحدث الدراسة عن ضوابط السعرات، يعاني جزء كبير من البشر من نقص حاد في السعرات أصلاً. وتعتمد الدراسة كذلك على فرضية تحسين إنتاجية المحاصيل كحل سحري، متناسية أن براءات اختراع البذور المحسنة تمتلكها شركات كبرى، مما يزيد من أعباء المزارعين بدل أن يزيحها.

3- 4 أمثلة عن جهود الدول العربية في الحد من انبعاثات الميثان

تدرك الدول العربية، بصفتها لاعباً أساسياً في سوق الطاقة العالمي، أن الريادة في إنتاج النفط والغاز تفرض مسؤولية بيئية توازي أهميتها الاقتصادية. ولم يكن التعامل مع انبعاثات الميثان في الدول العربية مجرد استجابة لضغوط مناخية دولية، بل هو توجه استراتيجي يهدف إلى رفع كفاءة استغلال الموارد الطبيعية وتقليل الهدر الطاقي. تتفاوت المنهجيات العربية بين سن تشريعات قانونية، والاستثمار الضخم في تكنولوجيا التقاط الغاز، وتبني حلول مراقبة متطورة عبر الأقمار الصناعية. هذا الحراك الجماعي يعكس التزاماً واضحاً بأهداف التعهد العالمي للميثان وسعي المنطقة نحو تحقيق توازن دقيق بين استمرارية الإمدادات العالمية والوصول إلى الحياد الكربوني.

3- 4- 1: دولة الإمارات العربية المتحدة

غطى القانون الذي ينظم الحفاظ على الثروة البترولية في إمارة أبوظبي، والصادر تحت رقم 8 لعام 1978، جميع عمليات البترول في المرحلة الإنتاجية، ويتطلب من الصناعة استخدام أكثر الأساليب التكنولوجية موثوقية، بالإضافة إلى المعدات والمواد التي تلتزم بالمعايير الدولية، سواء من حيث السلامة أو

الكفاءة. كما يشترط الحصول على موافقة مسبقة قبل إنشاء أي منشآت، بما في ذلك تقديم دراسات شاملة وتقييمات فنية واقتصادية. كذلك، تتطلب جميع أنشطة الاستكشاف الحصول على ترخيص مسبق. أما الغاز المصاحب، فيجب إما استخدامه في الموقع، أو تسليمه إلى السلطات المحلية، أو إعادة حقنه. ويسمح بحرقه فقط إذا كان من غير الممكن إعادة حقنه، وذلك بعد الحصول على موافقة خطية مسبقة من الحكومة. عملياً، تعتبر دولة الإمارات رائدة في جهود خفض الميثان في المنطقة، مع تركيز كبير على قطاع النفط والغاز. وتلعب شركة أدنوك ADNOC الوطنية للنفط دوراً محورياً في هذه الجهود، حيث تدعم التعهد العالمي للميثان وهي من الموقعين على مبادرة البنك الدولي "إنهاء الحرق الروتيني للغاز بحلول عام 2030". وتهدف الدولة إلى أن تكون كثافة انبعاثات الميثان أقل من 0.15% بحلول عام 2025. وقد ذكرت "الرابطة الدولية لصناعة البترول للحفاظ على البيئة" IPIECA* أن شركة بترول أبوظبي الوطنية (أدنوك) قررت في عام 2023 تقديم موعد تحقيق هدفها للوصول إلى صافي انبعاثات صفرية من عملياتها إلى عام 2045، متقدمة بخمس سنوات عن الموعد الأصلي (Ipieca, 2023)[91]. كما حددت أدنوك هدفاً يتمثل بخفض انبعاثات غاز الميثان إلى ما يقارب الصفر بحلول عام 2030 كأولوية في استراتيجيتها (ADNOC، بدون تاريخ)[92]. وإذ يشكل هدف الحياد المناخي جزءاً أساسياً من إطار عمل أدنوك لانتقال الطاقة، فقد وضعت أربعة محاور رئيسية لذلك:

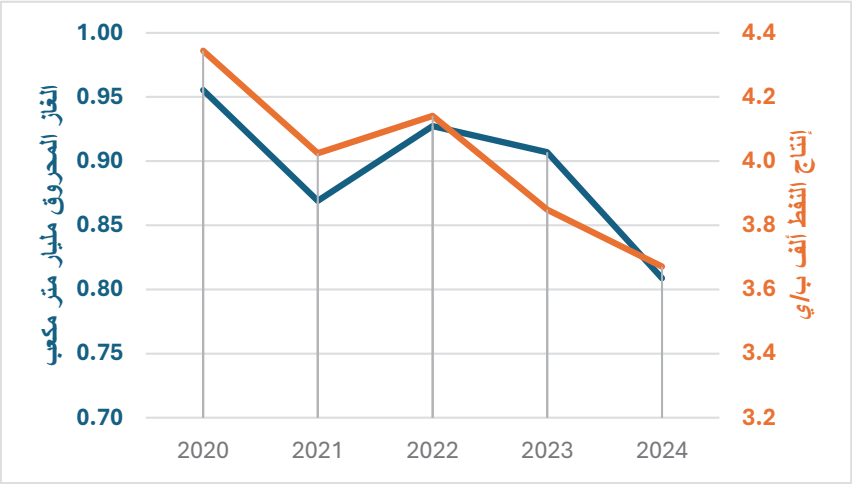
1- إزالة الكربون من عملياتها التشغيلية
2- تنمية حلول منخفضة الكربون
3- الاستفادة من التكنولوجيا والشراكات
4- تعزيز التنوع البيولوجي والحلول المعتمدة على الطبيعة

ولدعم هذه المحاور، تستثمر أدنوك بشكل أولي حوالي 15 مليار دولار في حلول منخفضة الكربون مثل الكهرباء، والتقاط الكربون، وإنتاج الهيدروجين، إضافة إلى استثمارات عبر شركة "مصدر"، المختصة في الطاقة المتجددة والهيدروجين الأخضر و مقرها أبوظبي، لتوسيع قدرات الطاقة المتجددة العالمية. وقد حققت أدنوك في 2022 خفضاً في انبعاثات غازات الاحتباس الحراري بحوالي 4 ملايين طن متري، وذلك من خلال استخدام 100% من احتياجات عملياتها البرية من الطاقة الشمسية والنووية، إلى جانب مشاريع رفع كفاءة الطاقة والحد من حرق الغاز المصاحب (Ipieca, 2023). يذكر أن حرق الغاز في الإمارات كان نحو 0.5%

* International Petroleum Industry Environmental Conservation Association

فقط مما أحرقه العالم عام 2024، وقدره البنك الدولي ضمن بيانات الشراكة الدولية للحد من حرق الغاز الميثان بنحو 809 مليون متر مكعب (World Bank, 2025). يبين الشكل 9، كميات الغاز المحروق في الإمارات بالعلاقة مع كميات النفط المنتج خلال خمس سنوات. وتراجعت كثافة حرق الغاز* في الإمارات من 0.95 م^3/البرميل عام 2020 إلى 0.76 م^3/البرميل عام 2024.

الشكل 9: الغاز المحروق في الإمارات بالعلاقة مع كمية النفط المنتج



مصدر البيانات: World Bank, 2025[93] -OPEC ASB, 2024 -أوابك، تقرير الأمين العام السنوي 2025[94]

يذكر أن دولة الإمارات العربية المتحدة هي عضو مؤسس في الشراكة العالمية للحد من حرق الغاز والميثان، وهي أكبر مساهم في الشراكة بتعهد يبلغ 100 مليون دولار (UAE Ministry of Foreign Affairs, 2025)[95].

3- 4- 2: الجمهورية الجزائرية

يشير البنك الدولي إلى أن التزامات الجزائر للحد من الميثان تندرج ضمن استراتيجيتها الوطنية الشاملة حول المناخ. حيث تبين المساهمة الوطنية المقررة التي قدمتها الجزائر لاتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ تعهداً بتخفيض إجمالي انبعاثات غازات الدفيئة بنسبة 7% بحلول عام 2030، مع هدف أكثر طموحاً يصل إلى 22% إذا توفر الدعم الدولي. ضمن هذا الإطار، أولت الجزائر اهتماماً خاصاً بغاز الميثان، إذ تشمل استراتيجيتها المناخية قطاعات رئيسية مثل الطاقة، الصناعة، النقل، والنفايات. ويتمثل أحد الأهداف الرئيسية في تخفيض كمية حرق الغاز الناتج من عمليات النفط والغاز إلى أقل من 1%من إجمالي الغاز المصاحب المنتج بحلول عام 2030. وضمن الإطار القانوني: تمتلك الجزائر تاريخاً طويلاً في تنظيم عمليات

* حجم الغاز المحروق مقارنة بكمية النفط المنتج

الحرق، حيث أصدرت قوانين عام 1966 وتم تحديثها في 2019 (القانون رقم 19-13)، بقانون ينص على حظر عمليات الحرق والتنفيس الروتينية، ويفرض ضرائب على هذه الكميات، مما يضع إطاراً تنظيمياً واضحاً لتحقيق الأهداف المرجوة.

وقد انضمت شركة النفط الوطنية الجزائرية "سوناطراك" إلى مبادرة البنك الدولي وقف الحرق الروتيني للغاز، ونفذت في هذا المجال مشاريع لالتقاط واستخدام الغاز، حيث شملت جهودها العديد من الحقول النفطية مثل حقل "حاسي مسعود" وغيره. كما انخرطت الجزائر في شراكات لتعزيز قدرتها على الحد من الميثان، منها التعاون مع برنامج الأمم المتحدة للبيئة UNEP والمفوضية الإفريقية للطاقة* AFREC. فعلى سبيل المثال، استهدف برنامج تدريبي مع AFREC تزويد الخبراء الجزائريين بالمعرفة والأدوات اللازمة لاكتشاف وقياس والحد من انبعاثات الميثان باستخدام تقنيات الأقمار الصناعية، حيث تستفيد جهود الجزائر بشكل متزايد من أنظمة المراقبة العالمية بالأقمار الصناعية، مثل نظام الاستجابة والتنبيه لانبعاثات الميثان MARS† التابع للأمم المتحدة. وقد ساهمت هذه التقنية في رصد بعض تسربات الميثان الكبيرة، وساعد على بدء تحرك من الجهة الحكومية أو من قبل الشركات لمعالجة هذه التسربات والحدّ منها بشكل ملموس (World Bank, 2023)[96].

وأشار تقرير شركة سوناطراك حول البيئة (Sonatrach, 2024)[97] إلى أن الجزائر خفضت حرق الغاز بنسبة 28% بين عامي 2020- 2023 بفضل دخول وحدات جديدة مخصصة لاسترجاع الغاز المحروق في عدة مناطق إنتاج، لا سيما في حقول حاسي مسعود وأوهنات. يبين الشكل 10 كميات الغاز المحروق في الجزائر خلال خمس سنوات بالعلاقة مع كميات النفط المنتج.

حدثت ثمانية من أكبر الانخفاضات في حرق الغاز في حقول ومنشآت الغاز الطبيعي المسال التي تديرها سوناطراك، مما أدى إلى انخفاض إجمالي في هذه المواقع بمقدار 0.8 مليار متر مكعب، وشمل ذلك انخفاضاً بنسبة 36% في حرق الغاز في حقل "تين فوي تابنكورت"، حيث تم إبرام اتفاق هام في عام 2023 لمعالجة الغاز المصاحب لسوناطراك في محطة معالجة غاز قائمة يملكها مشغل حقل غاز مجاور. مكّن هذا الاتفاق من تصدير الغاز الذي كان يحرق سابقاً عبر البنية التحتية للغاز الحالية. وكانت مشاركة المرافق للاستفادة من الغاز وتقليل الحرق هي الأولى من نوعها في الجزائر. وقد أدى التنفيذ الناجح للعديد من

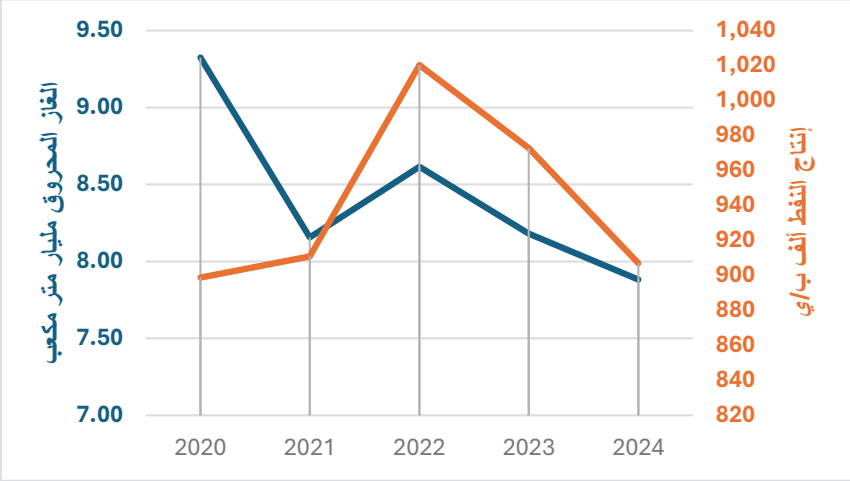
* African Energy Commission

† Methane Alert and Response System

المشاريع الصغيرة في منشآت الغاز الطبيعي المسال إلى نتائج مشجعة (GFMR, 2025)[98].

تعتبر كثافة حرق الغاز في الجزائر من بين الكثافات المرتفعة حيث بلغت 22.8 عام 2020 لكنها تراجعت إلى أقل من 19.3 متر مكعب من الغاز مقابل كل برميل منتج من النفط في عام 2024. وتبقى بالرغم من ذلك أقل من بعض الدول الأخرى مثل فنزويلا التي بلغ وسطي كثافة حرق الغاز فيها حوالي 34.5 م^3/البرميل لنفس الفترة.

الشكل 10: الغاز المحروق في الجزائر بالعلاقة مع كميات النفط المنتجة



مصدر البيانات: World Bank, 2025 -OPEC ASB, 2024 -أوابك، تقرير الأمين العام السنوي 2025

وفيما يخص خطة الجزائر للوصول إلى إيقاف انبعاثات الميثان تماماً في عام 2023، يشير نفس التقرير إلى تقييم وتقليل انبعاثات الميثان الهاربة يشكل تحدياً مناخياً واقتصادياً، ولذلك تم تنفيذ برنامج واسع يهدف إلى الكشف السريع عن التسريبات وإصلاحها ومنع جميع الانبعاثات والتسريبات.

وترى سوناطراك أنه لا يزال هناك الكثير من العمل المطلوب لتحقيق تقييم موثوق لانبعاثات الميثان المتسربة في المنشآت. لذلك يتم التخطيط لرسم خرائط لجميع انبعاثات الميثان الهاربة على امتداد سلسلة الغاز والنفط. لتحقيق ذلك، تستخدم منهجيات من الأعلى إلى الأسفل (من الأكبر إلى الأصغر)، لا سيما عبر تقنيات الأقمار الصناعية وفقاً لاتفاقية تعاون مع وكالة الفضاء الجزائرية ASAL* بالإضافة إلى ذلك، اعتُمدت منهجيات من الأسفل إلى الأعلى (من الأصغر إلى الأكبر) مثل حملات الكشف والإصلاح عن التسريبات والاعتماد على مجموعة من الوسائل التكنولوجية المناسبة، بما في ذلك كاميرات الأشعة تحت الحمراء OGI†.

* Algerian Space Agency

† Optical Gas Infrared

وسوف تجرى عمليات تقليل التنفيس من خلال تطبيق حلول تقنية وتكنولوجية ملائمة على مستوى خزانات الهيدروكربونات، والآبار، وفتحات التنفيس، وعمليات الصيانة، وعمليات التحميل والتفريغ. كما سوف يتم تضمين تقليل انبعاثات الميثان في مرحلة التصميم للمنشآت الجديدة، مع التركيز على تفضيل الأنظمة والحلول منخفضة الكربون خلال تنفيذ أو تعديل المشاريع الهندسية. كما ترى سوناطراك أن إدارة انبعاثات الميثان تتطور في قطاعي النفط والغاز بسرعة، مع استمرار تطوير واختبار وتنفيذ العديد من الحلول المبتكرة. وهي تعمل على تعزيز التعاون والتشاور بين الأطراف المهتمة بمسائل الميثان من خلال الاتفاقيات والشراكات، حيث تم إبرام عدة اتفاقيات مع الجامعات ومراكز البحث العلمي تركز على التخفيف بشكل عام والحد من انبعاثات الميثان بشكل خاص.

من ناحية أخرى، يتم العمل أيضاً على كفاءة الطاقة في جميع المنشآت الصناعية، ولهذا الغرض تجرى عمليات تدقيق دورية في إطار تنفيذ قانون إدارة الطاقة بالتعاون مع وكالة الترويج وترشيد استعمال الطاقة APRUE* وقد شمل هذا البرنامج بالفعل 90% من المواقع الصناعية. بالإضافة إلى هذا البرنامج، تنفذ سوناطراك سلسلة من التقييمات العميقة لكفاءة الطاقة باستخدام الوسائل الذاتية أو بالتعاون مع الشركاء، مما يسمح لها بتحسين تقييم الاستثمارات اللازمة وتحديد الإجراءات المطلوبة. كما تعمل على تحسين استهلاك وحدات الإنتاج الذاتي للمنشآت الصناعية بشكل كبير، وتعمل كذلك على تشجيع تنفيذ أنظمة إدارة الطاقة وفقاً لمعيار ISO 50001 بغرض إرساء ديناميكية لتحسين مستمر في الأداء الطاقي للمواقع. وقد خضعت العديد من المجمعات والمواقع الصناعية بالفعل لشهادات تصديق من جهات خارجية على أنظمة إدارة الطاقة الخاصة بها.

3- 4- 3: المملكة العربية السعودية

تعتمد المملكة العربية السعودية استراتيجية شاملة وطويلة الأمد للتخفيف من انبعاثات الميثان، مدفوعةً بأهدافها المناخية الوطنية والممارسات التشغيلية لشركة النفط الحكومية "أرامكو السعودية". وتتمثل أهم المحاور الرئيسية لجهود السعودية في التخفيف من انبعاثات الميثان في إنهاء الحرق الروتيني للغاز، حيث تعتبر المملكة رائدة عالمياً في تقليل حرق الغاز لعقود من الزمن. ففي سبعينيات القرن الماضي،

* Agency for the Promotion and Rationalization of Energy Use

طورت المملكة نظام الغاز الرئيسي MGS*، وهو شبكة واسعة صممت لالتقاط الغاز المصاحب الذي كان يحرق سابقاً. وقد أعادت هذه الشبكة استخدام الغاز للاستهلاك المحلي في توليد الطاقة والاستخدامات الصناعية، مما قلل بشكل كبير من انبعاثات الميثان وثاني أكسيد الكربون. كما وقعت أرامكو على مبادرة البنك الدولي للقضاء على الحرق الروتيني بحلول عام 2030 ضمن التزامها بإنهاء هذه الممارسة. وتستخدم الشركة تقنيات متطورة مثل أنظمة استعادة الغاز والمراقبة في الوقت الفعلي في منشآتها لضمان اقتصار الحرق على الحالات الطارئة والضرورية للسلامة، وعدم تحويله إلى ممارسة روتينية. وفي مجال الكشف عن التسربات وإصلاحها، تتبع شركة أرامكو برنامجاً منهجياً للكشف عن تسربات غاز الميثان غير المقصودة، المعروفة بالانبعاثات الهاربة، وإصلاحها. يتضمن برنامج الكشف والإصلاح، الذي أُطلق عام 2018، فحصاً منهجياً لملايين المكونات، مثل الصمامات والوصلات والضواغط، في جميع منشآتها التشغيلية. كما تستخدم أرامكو أحدث التقنيات مثل كاميرات التصوير الغازي البصري، والطائرات المسيرة، وأجهزة الاستشعار عبر الأقمار الصناعية عن طريق شريك أرامكو GHGSAT† لتعزيز الكشف عن تسربات الميثان وتحديد كمياتها. حيث تم إطلاق مجموعة من الأقمار الصناعية الخاصة بمراقبة انبعاثات الغازات لتمكين فرق الهندسة من تتبع انبعاثات الميثان الناجمة عن عمليات الشركة داخل المملكة بسهولة ودقة غير مسبوقة. أطلق هذا البرنامج في 2022 عقب تجربة ناجحة أجريت بين فبراير وديسمبر 2021 شملت سبعة مرافق من قطاعات التنقيب والإنتاج والتكرير والكيميائيات والتسويق. (ARAMCO، بدون تاريخ)[99].

علاوة على ذلك، أضفت السعودية الطابع الرسمي على أهدافها في التخفيف من الميثان من خلال سياسات وطنية مثل مبادرة السعودية الخضراء التي أطلقت في عام 2021. حيث تقدم المبادرة إطاراً استراتيجياً متكاملاً يهدف إلى تعزيز الاستدامة البيئية والتنمية المستدامة في المملكة. تستند هذه الاستراتيجية إلى تحقيق مجموعة من الأهداف الطموحة بحلول عام 2030، والتي تركز على عدة محاور رئيسية منها:

- توليد نصف احتياجات الطاقة في المملكة من مصادر متجددة.
- زراعة عشرة مليارات شجرة لتعزيز الغطاء النباتي.
- استصلاح 40 مليون هكتار من الأراضي المتصحرة.

* Master Gas System

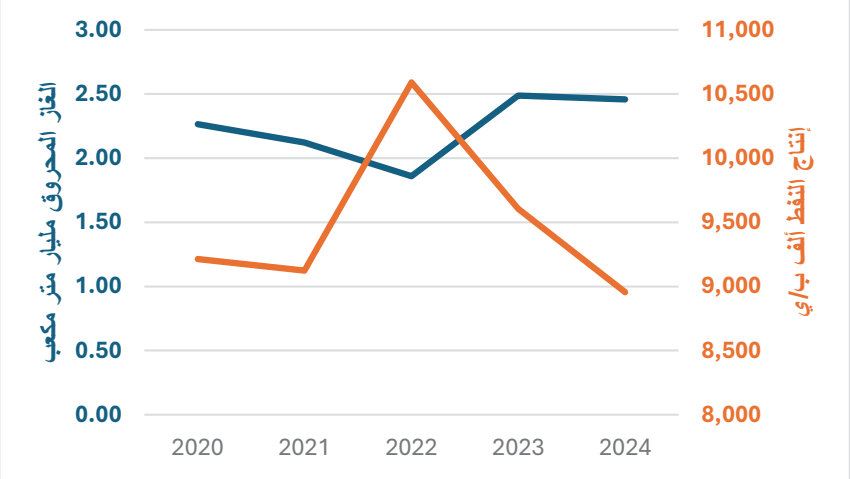
† Green House Gas Satellite

- حماية 30% من المناطق البرية والبحرية في المملكة بحلول عام 2030 لدعم التنوع البيولوجي.

يتم تنفيذ هذه الأهداف عبر مجموعة من 77 مبادرة قيد التنفيذ. كما تتبنى مبادرة السعودية الخضراء مبدأ الاقتصاد الكربوني الدائري CCE* كأحد الركائز الأساسية. وعلى المستويين المحلي والدولي، تعزز المبادرة التعاون وتبادل الخبرات لمواجهة تحديات تغير المناخ (Nagasawa, 2023)[100].

يبين الشكل 11 كميات الغاز المحروق في السعودية خلال خمس سنوات بالعلاقة مع كميات النفط المنتج.

الشكل 11: الغاز المحروق في السعودية بالعلاقة مع كميات النفط المنتجة



مصدر البيانات: World Bank, 2025 -OPEC ASB, 2024 -أوابك، تقرير الأمين العام السنوي 2025

يلاحظ من الشكل أن كميات حرق الغاز ارتفعت وهو ما بينه تقرير الاستدامة الصادر عن شركة أرامكو موضحاً أنه بسبب توسع عمليات الغاز (Aramco, 2025)[101]. والواقع أن السعودية رغم أنها الدولة المصدّرة الأولى للنفط في العالم، إلا أن حرق الغاز فيها يقارب حرق الغاز في الصين مثلاً، كما أن حرق الغاز في فنزويلا يعادل نحو 3.5 مرة حجم الغاز المحروق في المملكة. إنما تبقى كثافة الحرق هي المؤشر الأهم، وقد أدت جهود المملكة إلى تحقيق واحدة من أدنى معدلات كثافة الحرق في العالم، وهو ما يمكن تبيّنه من خلال الجدول 10 الذي يتضمن مقارنة بين كثافة الحرق في السعودية والولايات المتحدة وروسيا على سبيل المثال، ويلاحظ منه أن وسطي كثافة الحرق في الولايات المتحدة يزيد بأكثر من ثلاثة أضعاف عن نظيره في المملكة العربية السعودية، بينما تزيد كثافة الحرق في روسيا بأكثر من 11 ضعفاً عنها في السعودية.

* Circular Carbon Economy

الجدول 10: مقارنة كثافة حرق الغاز بين السعودية والولايات المتحدة وروسيا

العام	كثافة الحرق- م^3/برميل		
	السعودية	الولايات المتحدة	روسيا
2020	0.66	2.86	6.7
2021	0.62	2.13	6.88
2022	0.48	1.84	6.8
2023	0.70	2.04	7.7
2024	0.73	2.12	7.8

المصدر: أنشئ الجدول بناء على بيانات: World Bank, 2025- OPEC ASB, 2024- أوابك، تقرير الأمين العام السنوي 2025

3- 4- 4: جمهورية العراق

في عام 2021، أطلقت مبادرة النفط والغاز للمناخ OGCI حملة مراقبة عبر الأقمار الصناعية لاتخاذ إجراءات عملية تساعد في تقليل انبعاثات الميثان من عمليات النفط والغاز، وإظهار قدرة تكنولوجيا الأقمار الصناعية على كشف وقياس الميثان في العراق، وتوفير معلومات للعمليات المحلية لمساعدتها في خفض الانبعاثات. خلال هذا البرنامج، أجرت شركة GHGSat أكثر من 175 رصداً عالي الدقة لستة مواقع* مختارة على مدار تسعة أشهر، باستخدام أقمارها الصناعية الخاصة وبيانات الأقمار الصناعية العامة. وقد تم اختيار المواقع بناءً على احتمالية وجود منشآت ذات انبعاثات ميثان مرئية استناداً إلى الأدلة الموجودة حول سحب الميثان، وأحجام الحرق، وعمر البنية التحتية، وحجم الحقل وأحجام الإنتاج. أثبتت الحملة وجود تحديات وفرص مرتبطة باستخدام بيانات الأقمار الصناعية والتواصل مع المشغلين المحليين لدعم تخفيف انبعاثات الميثان. بينت نتائج الحملة وجود كميات كبيرة من انبعاثات الميثان ، حيث بلغ متوسط معدل الانبعاث في الأصول الستة ما يقرب من 1500 كغم من الميثان في الساعة. وساهمت اثنتان من السحب المكتشفة بأكثر من 25% من إجمالي الانبعاثات المرصودة، بينما لم يتم رصد أي مصادر انبعاث فوق عتبة الكشف في موقعين آخرين خلال فترة المراقبة (OGCI, 2023)[102]. قام فريق الحملة بمشاركة المعلومات مع المشغلين المعنيين لتسهيل المزيد من التحقيق والتخفيف عند الاقتضاء. وقد ساعد وجود شركات أعضاء في المبادرة وعلاقاتها مع المشغلين المحليين في تسهيل استجابة فعالة وسريعة على الأرض، مما أدى لخفض الانبعاثات.

عملياً، تسعى الحكومة العراقية خلال السنوات القادمة إلى إنهاء عمليات حرق الغاز في الحقول النفطية، مستهدفة تحقيق إنتاج إجمالي يقارب 85 مليون متر مكعب يومياً بحلول عام 2030. وتتضمن

* لم تذكر الورقة أسماء المواقع بشكل صريح.

خططها استثمار الغاز المصاحب وتحويله إلى مصدر طاقة يستخدم في تشغيل محطات الكهرباء ودعم الصناعات المرتبطة، بما ينسجم مع الجهود الوطنية لحماية البيئة والصحة العامة. ويأتي هذا التوجه انسجاماً مع التزامات العراق الدولية، وعلى رأسها اتفاق باريس للمناخ لعام 2016، الذي يهدف إلى الوصول إلى الحياد الكربوني بحلول عام 2030، فيما تضع وزارة النفط هدفاً لتصفير حرق الغاز المصاحب مع نهاية عام 2028.

وكانت وزارة النفط العراقية قد كشفت في عام 2024 عن المشاريع التي تم إنجازها والمشاريع قيد الإنجاز (وزارة النفط، 2024)[103]، ومنها ما هو مبين في الجدول 11:

الجدول 11: بعض المشاريع المنجزة/ قيد الإنجاز في العراق

اسم المشروع	الموقع	الطاقة الإنتاجية (مليون م^3/يوم)	ملاحظات
مشروع غاز أرطاوي	محافظة البصرة	17.0	المشروع الأكبر ضمن الحزمة
مشروع غاز الحلفاية	محافظة ميسان	8.5	تم إنجازه ودخوله الخدمة
مشروع حقل بن عمر	محافظة البصرة	8.5	استثمار الغاز المحروق
مشروع غاز البصرة (BNGL1)	شركة غاز البصرة	5.7	مجمع معالجة السوائل الأول
مشروع غاز البصرة (BNGL2)	شركة غاز البصرة	5.7	مجمع معالجة السوائل الثاني
مشروع حقل الغراف والناصرية	محافظة ذي قار	5.7	قيد التطوير المتسارع
مشروع غاز حقل الفيحاء	محافظة البصرة	3.7	استثمار الغاز المصاحب
مشروع غاز أرطاوي المعجل	محافظة البصرة	1.4	خطة إنتاج معجل
حقل عكاس الغازي	محافظة الأنبار	1.1	جهد وطني تطويري

المصدر: إعداد الباحث استناداً إلى بيانات وزارة النفط العراقية في عام 2024. https://oil.gov.iq/?article=2703

ضمن هذا التوجه- على سبيل المثال- تعمل (وزارة النفط العراقية، 2025)[104] على تسريع تطوير مشروعي غاز الغراف والناصرية، مع توقعات ببدء العمليات الكاملة بحلول أوائل عام 2027، لتصل القدرة الإنتاجية إلى نحو 5.7 مليون متر مكعب يومياً. يتم تقديم هذا الإسراع كخطوة طال انتظارها نحو الاكتفاء الذاتي من الطاقة، لكن الرهانات الحقيقية تكمن فيما هو أبعد من التفاصيل الفنية لاستثمار الغاز المصاحب. ويبدو أن مفتاح زيادة إمدادات الغاز المحلية في العراق يكمن في خفض الكميات الكبيرة من الغاز المحروق، فحتى وقت قريب، كان العراق ثاني أكبر حارق للغاز في العالم بعد روسيا، حيث يحرق أكثر من 17 مليار متر مكعب سنوياً. وإذا تم استثمار هذا الهدر، فإن إمكانات العراق تبدو هائلة، حيث تقدر الاحتياطيات المؤكدة من الغاز في العراق بأكثر من 3.6 تريليون متر مكعب، أي ما يناهز 16% من الاحتياطيات العالمية من الغاز

الطبيعي. يتضمن المشروع نشر نظام معالجة غاز متطور في مجمع الغاز المتكامل بالناصرية لتجفيف وضغط الغاز، وتوليد أكثر من 2.8 مليون متر مكعب في اليوم في المرحلة الأولى، ليتوسع في المرحلة الثانية إلى محطة كاملة لسوائل الغاز الطبيعي . ومن شأن استثمار الغاز في هذين الحقلين وحدهما تزويد الشبكة العراقية بنحو 400ميغاوات.

كما يعمل العراق على المتابعة الحثيثة لمشروع تنمية الغاز المتكامل في حقل أرطاوي، وتم في سبتمبر 2025 الإعلان عن بدء أعمال إنشاء مشروع ماء البحر المشترك (CSSP) والتطوير الكامل للحقل. حيث سيتم بناء مشروع ماء البحر المشترك على الساحل بالقرب من مدينة أم قصر، بهدف معالجة ونقل 5 ملايين برميل من مياه البحر يومياً إلى الحقول النفطية الرئيسية في جنوب العراق. سيتم استخدام مياه البحر المعالجة بدلاً من المياه العذبة التي يتم سحبها حالياً من نهري دجلة والفرات والمياه الجوفية للحفاظ على الضغط في الآبار النفطية. أطلقت عملية إعادة تطوير حقل أرطاوي في سبتمبر 2023. وتهدف المرحلة الأولى إلى زيادة الإنتاج إلى 120 ألف برميل يومياً، ومن المتوقع أن يبدأ الإنتاج في عام 2026. أما إطلاق المرحلة الثانية (التطوير الكامل للحقل) فسيسمح بزيادة الإنتاج إلى 210 آلاف برميل يومياً بدءاً من عام 2028 مع صفر حرق روتيني للغاز، إذ سيتم معالجة كامل كمية الغاز المصاحب المنتجة يومياً، والبالغة حوالي 4.5 مليون متر مكعب بفضل "مشروع غاز الوسط" الذي تبلغ طاقته الإجمالية حوالي 8.5 مليون متر مكعب يومياً، والذي بدأ بناؤه في أوائل عام 2025. وسيقوم هذا المشروع أيضاً بمعالجة الغاز الذي كان يحرق سابقاً في حقلين آخرين بجنوب العراق، وسيوفر الغاز المعالج للشبكة الوطنية حيث سيغذي محطات الطاقة بقدرة إنتاجية تصل إلى حوالي 1.5 غيغاوات، مما يوفر الكهرباء لنحو 1.5 مليون منزل. كما ستبدأ "منشأة الإنتاج المبكر" بمعالجة حوالي 1.4 مليون متر مكعب يومياً من الغاز المصاحب في عام 2026 بالتزامن مع إنتاج النفط من المرحلة الأولى لحقل أرطاوي (Total Energies, 2025)[105].

بدورها، أعلنت شركة Baker Hughes في سبتمبر 2025 عن توقيع اتفاقية مع "شركة حلفاية للغاز" لتعزيز تعاونهما في نظام مبتكر لاستعادة الغاز المحروق في محطة معالجة غاز "بن عمر" في جنوب شرق العراق. سيقلل المشروع بشكل كبير من عمليات الحرق في مراحل الإنتاج ويحول الغاز الضائع إلى منتجات ذات قيمة (Baker Hughes, 2025)[106]. واستندت الاتفاقية على مذكرة تفاهم أُعلنت سابقاً لإنشاء تعاون لمشروع تطوير "بن عمر" وإكمال دراسة التصميم الهندسي الأولي. وتعد هذه خطوة مهمة جداً في مسعى العراق للقضاء على الحرق الروتيني للغاز. ومن المتوقع أن يستعيد المشروع ما يصل إلى 8.5 مليون متر مكعب

والذي يهدف إلى تقليل حرق الغاز المصاحب، ويعد مشروعاً معتمداً ضمن آلية التنمية النظيفة في إطار بروتوكول كيوتو منذ عام 2007. وقد حصل المشروع على موافقة اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ لفترة الاعتماد التي تمتد لسبع سنوات من عام 2014 حتى عام 2021، ويهدف المشروع إلى الحد من انبعاث حوالي 1.2 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً خلال تلك الفترة.

وفي تقرير الاستدامة (قطر للطاقة، 2024)[109]، ذكر أن منشأة استرداد الغاز المتبخر عند أرصفة التحميل تتصل بألف سفينة وتسترد 580 ألف طن من الغاز الطبيعي المسال سنوياً. وقد وفرت المنشأة أكثر من 17 مليون طن من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري خلال سنوات تشغيلها العشر، مما أدى إلى خفض إجمالي بنسبة 60% في عمليات الحرق لدى شركة قطر للطاقة للغاز الطبيعي المسال. وبين التقرير أن إنجازات المشروع تضمنت توفيراً سنوياً لنحو 793مليون متر مكعب من الغاز المحروق. و1.7 مليون طن من غازات الاحتباس الحراري، وقدرت وفورات الغاز المحروق من المنشأة بما يعادل تزويد حوالي 350 ألف منزل بالطاقة لمدة عام، أو إزاحة 420 ألف مركبة تعمل بالبنزين من الطرق لنفس الفترة. وبين التقرير كذلك أن الشركة نجحت في خفض كثافة حرق الغاز بنسبة 70%مقارنة بمستويات عام 2013، وإن كان عام 2024 قد شهد زيادة طفيفة في كثافة الحرق مقارنة بالأعوام السابقة، ويعزى ذلك بشكل رئيسي إلى عمليات الصيانة الدورية المخطط لها، حيث بلغت كثافة الحرق* 0.4%، مقارنة بنحو 1.2% عام 2013.

3- 4- 6: دولة الكويت

تبنّت شركة نفط الكويت هدفاً استراتيجياً يتمثل في تحقيق صافي انبعاثات كربونية صفرية من النطاقين 1 و2 بحلول عام 2050، وذلك عبر توجيه استثماراتها نحو حلول الطاقة البديلة†. وفي إطار تحقيق هذا الهدف، حدّدت شركة نفط الكويت خمس مبادرات استراتيجية أساسية لتعزيز تحوّل الطاقة:

1- إنهاء حرق الغاز الروتيني: التوقف التام عن حرق الغاز المصاحب في العمليات اليومية.
2- رفع كفاءة الطاقة: العمل على تحسين استهلاك الطاقة في جميع عملياتها.
3- استغلال الطاقة المتجددة: استكشاف وتطوير فرص استخدام مصادر الطاقة النظيفة.
4- احتجاز الكربون وتخزينه: تطبيق تقنيات لالتقاط ثاني أكسيد الكربون من المصادر الصناعية

* كثافة الحرق تعبر عن حجم الغاز المحروق مقارنة بحجم الغاز المنتج.

† النطاق 1 و2 هي الانبعاثات المباشرة، وغير المباشرة

وإعادة استخدامه أو تخزينه.

5- موازنة الانبعاثات: العمل على تعويض الانبعاثات الكربونية من خلال برامج ومشاريع مخصصة.

وقد أشار التقرير السنوي لشركة نفط الكويت الصادر في عام 2025 إلى أن الشركة وانطلاقاً من التزامها بإيقاف الحرق الروتيني تماماً بحلول عام 2030، تعمل على تنفيذ حزمة متكاملة من المشاريع لإنهاء ممارسات الحرق الحالية، وتهدف إلى تحقيق ذلك من خلال تطوير منشآت إضافية لمعالجة الغاز الحامض، وإنشاء خطوط أنابيب جديدة، وتحسين البنية التحتية القائمة. كما تركز الشركة على تقليل انبعاثات غاز الميثان المتسرب عبر استخدام تقنيات متقدمة للكشف عن التسريبات وإصلاحها.

ولتعزيز كفاءة الطاقة، أطلقت الشركة مبادرة ثانية تهدف إلى تحقيق خفض يتراوح بين 8% و12% بحلول عام 2045. ومن أبرز مشاريع هذه المبادرة تحويل إمدادات الطاقة للمضخات الغاطسة الكهربائية من مولدات الديزل إلى شبكة الكهرباء الوطنية، مما يساهم في تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون ويعكس التزام الشركة بالاستدامة.

كما بدأت الشركة في دراسة جدوى فنية لإنتاج 17 غيغاوات من الطاقة المتجددة، ضمن مبادرتها الثالثة التي تشمل تخزين 3 غيغاوات من الطاقة. وقد تم وضع خطة تفصيلية لتركيب محطات طاقة متجددة متنوعة لإنتاج 1 غيغاوات لتغطية جزء من احتياجات الشركة من الكهرباء. كما يجري العمل على دراسة الجدوى الفنية لإنتاج الهيدروجين الأخضر من الطاقة المتجددة، كجزء من جهودها لتحقيق صافي انبعاثات صفري بحلول عام 2050.

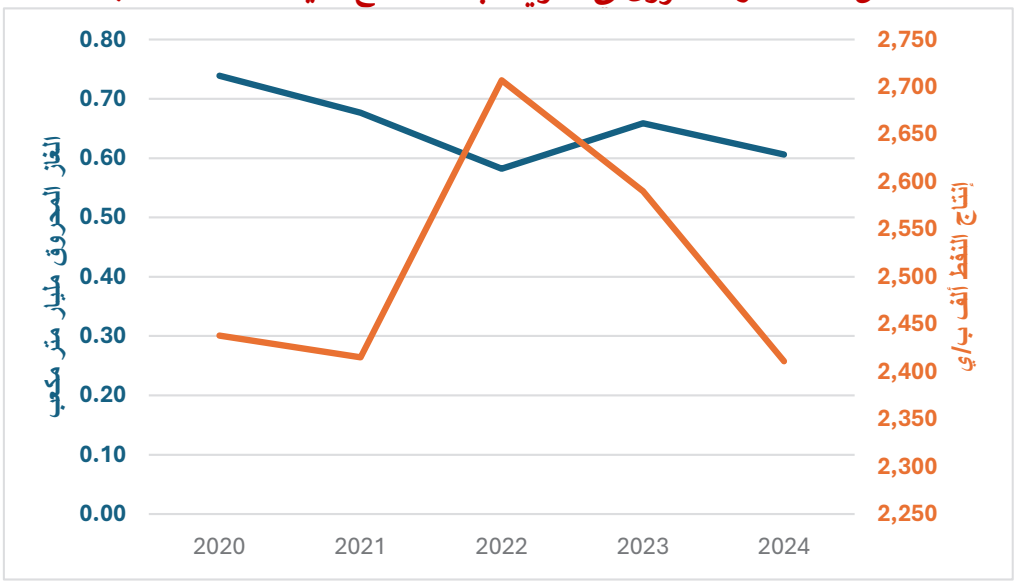
وفي إطار مبادرتها الرابعة، وضعت شركة نفط الكويت خطة تنفيذية للوصول إلى احتجاز 2.6 مليون طن سنوياً من الكربون واستخدامه وتخزينه بحلول عام 2050. وتعمل الشركة على تطوير مركز احتجاز كربون واسع النطاق في غرب الكويت، يتضمن استخدام تقنية الغاز المتناوب مع الماء لتحسين استخلاص النفط، بالإضافة إلى احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون. وتجرى حالياً دراسة شاملة لتقييم جدوى تخزين ثاني أكسيد الكربون في الخزانات الجوفية.

وأخيراً، تساهم الشركة في تعويض الكربون ودعم التنوع البيولوجي المحلي من خلال مبادرتها الخامسة، حيث تنفذ مشاريع زراعية تعمل كخزانات طبيعية للكربون بالتعاون مع شركات نفطية وجهات محلية مثل الهيئة العامة للبيئة، وتهدف إلى زراعة أشجار المانغروف والنباتات الشائعة كالغاف والأكاسيا في

مختلف أنحاء الكويت (KPC, 2025)[110].

من جهتها، تشير مؤسسة البترول الكويتية على موقعها الرسمي (KPC, 2025) إلى أن التزامها بتحقيق صافي الصفر الكربوني بحلول عام 2050 من خلال الخفض الفعال لانبعاثات غازات الاحتباس الحراري من النطاقين 1 و2 من عملياتها العالمية، لتبقى من بين أقل منتجي النفط والغاز كثافةً في الانبعاثات. وترسم استراتيجية المؤسسة خارطة طريق لتحول الطاقة بحلول عام 2050 من خلال العديد من المشاريع الجديدة مما سوف يدعم دولة الكويت في تحقيق هدفها المتمثل في صافي الصفر الكربوني بحلول عام 2060 (KPC, 2023)[111]. وذكر تقرير الاستدامة الصادر عن المؤسسة (KOC, 2024)[112]، أنها تمكنت خلال العام المالي 2023- 2024 من خفض حرق الغاز إلى 0.69%، وهو رقم يتفوق على الهدف الذي كانت المؤسسة قد وضعته (0.98%). وتشير بيانات البنك الدولي إلى أن الكويت أحرقت نحو 600 مليون متر مكعب من الغاز في عام 2024، منها 33 مليون متر مكعب في مناطق العمليات المشتركة: الوفرة، والخفجي (World Bank, 2025). يبين الشكل 12 كميات الغاز المحروقة في الكويت بالعلاقة مع كميات النفط المنتجة خلال 5 سنوات.

الشكل 12: الغاز المحروق في الكويت بالعلاقة مع كميات النفط المنتجة



مصدر البيانات: World Bank, 2025- OPEC ASB, 2024 - أوابك، تقرير الأمين العام السنوي 2025

ويقارن الجدول 12 بين كثافة حرق الغاز في الكويت وإيران، التي تقارب الكويت في متوسط إنتاج النفط خلال خمس سنوات، ويلاحظ أن متوسط كثافة حرق الغاز في إيران يزيد بأكثر من 20 ضعفاً عن نظيره في الكويت.

الجدول 12: كثافة حرق الغاز في الكويت

العام	كثافة الحرق م³/البرميل	
	الكويت	إيران
2020	0.80	13.74
2021	0.73	13.74
2022	0.56	13.74
2023	0.67	13.74
2024	0.64	13.74

المصدر: أنشئ الجدول بناء على بيانات World Bank, 2025- OPEC ASB, 2024 - أوابك، تقرير الأمين العام السنوي 2025

3- 4- 7: دولة ليبيا

اعتمدت المؤسسة الوطنية للنفط حزمة من المشاريع الهندسية المتكاملة لتقليص عمليات حرق الغاز وتحويله إلى قيمة اقتصادية مضافة، بهدف خفض الانبعاثات، ورفع الكفاءة التشغيلية للمكامن، وتوفير مصادر طاقة نظيفة للشبكات المحلية (المؤسسة الوطنية للنفط، 2026)[113]. وتوزعت الجهود الهندسية على عدة محاور تقنية وفقاً لطبيعة المكامن والبنية التحتية لكل شركة وفق الآتي:

- شركة سرت لإنتاج وتصنيع النفط والغاز

- من خلال تطوير خطوط النقل تم تحويل مسار متكثفات حقل "الحطيبة" إلى خط بقطر 16بوصة بدلاً من الخط السابق بقطر 30 بوصة ذي الضغط المنخفض، مما حدّ من ظاهرة التبخر وفقدان المتكثفات وتحولها إلى الحالة الغازية، والتي كانت تحرق سابقاً.
- جرت استعادة الغاز (حقول اللهيب والراقوبة) حيث يتم ضخ 1.7مليون متر مكعب يومياً تتوزع بين 1.07 مليون متر مكعب من حقل اللهيب و 0.62 مليون متر مكعب من حقل الراقوبة إلى الشبكة الساحلية عبر تحويرات تقنية في الخط الرئيسي.
- تشغيل منظومة فصل الغاز بضغط عالٍ في حقل اللهيب بطاقة استيعابية تبلغ 0.34 مليون متر مكعب يومياً، لاستخدامها في عمليات الرفع الغازي.

- شركة السرير للعمليات النفطية

- أسفرت التعديلات في معمل معالجة الغاز وتشغيل ضاغط المنطقة (91) عن معالجة 0.71 مليون متر مكعب يومياً من الغاز، مع استخلاص 1800برميل يومياً من المتكثفات النفطية.

- شركة الواحة للنفط

- تمت صيانة وتشغيل ضواغط حقل "الدفة الشمالية"، مما أدى إلى تقليص حرق 0.56 مليون متر مكعب يومياً.

يلخص الجدول 13 حجم تخفيض الغاز المحروق، والخطط المستقبلية في هذا المجال للمؤسسة الوطنية للنفط في ليبيا.

الجدول13 : المنفذ والمخطط لخفض حرق الغاز في ليبيا

البيان	متر مكعب/يوم	السنة
إجمالي تخفيض الغاز المحروق	2.83 مليون	2025
المستهدف الاستراتيجي للخفض	3.4 مليون	2026
النسبة المستهدفة لخفض الحرق	%60	2026
الهدف النهائي (الحرق شبه الصفري)		2030
المصدر: بناء على بيانات مذكورة على الصفحة الرسمية للمؤسسة الوطنية للنفط، 2026		

3- 4- 8: جمهورية مصر العربية

وقعت الهيئة العامة المصرية للبترول في أواخر عام 2024 على منحة مساعدة فنية من وكالة التجارة والتنمية الأمريكية USTDA* لدعم جهود مصر في خفض انبعاثات الميثان. تهدف هذه المنحة إلى تحسين جودة الهواء والصحة العامة من خلال تحديد المصادر الرئيسية لانبعاثات الميثان في قطاع النفط والغاز المصري. كما ستساعد في وضع خارطة طريق لنشر التقنيات الأمريكية المبتكرة، مما سيساهم في الحد من هذه الانبعاثات على مستوى القطاع (USTDA, 2024)[114]. وأتت تلك الخطوة لإعداد خارطة طريق تفصيلية لخفض انبعاثات الميثان من قطاع البترول في مصر.

بالمقارنة مع الدول الأخرى، تحرق مصر كمية معتدلة من الغاز، حيث بلغت 1.9 مليار متر مكعب في عام 2023، وانخفضت إلى 1.63 مليار متر مكعب عام 2024، مما يضعها في المرتبة السابعة عشر عالمياً والسادسة عربياً. ومع ذلك، لا تزال كثافة الحرق في مصر مرتفعة نسبياً حيث بلغت 8.3 متر مكعب لكل برميل نفط ومتكثفات يتم إنتاجه، أي أن كثافة الحرق فيها قريبة أو تزيد قليلاً على كثافة الحرق في روسيا. كما أن انبعاثات الميثان في مصر الناتجة عن التفريغ، والتسرب، والاحتراق غير الكامل للغاز في عمليات إنتاج النفط والغاز كبيرة بدورها، وتضيف نحو 1 مليار متر مكعب سنوياً (IEA, 2025)[115].

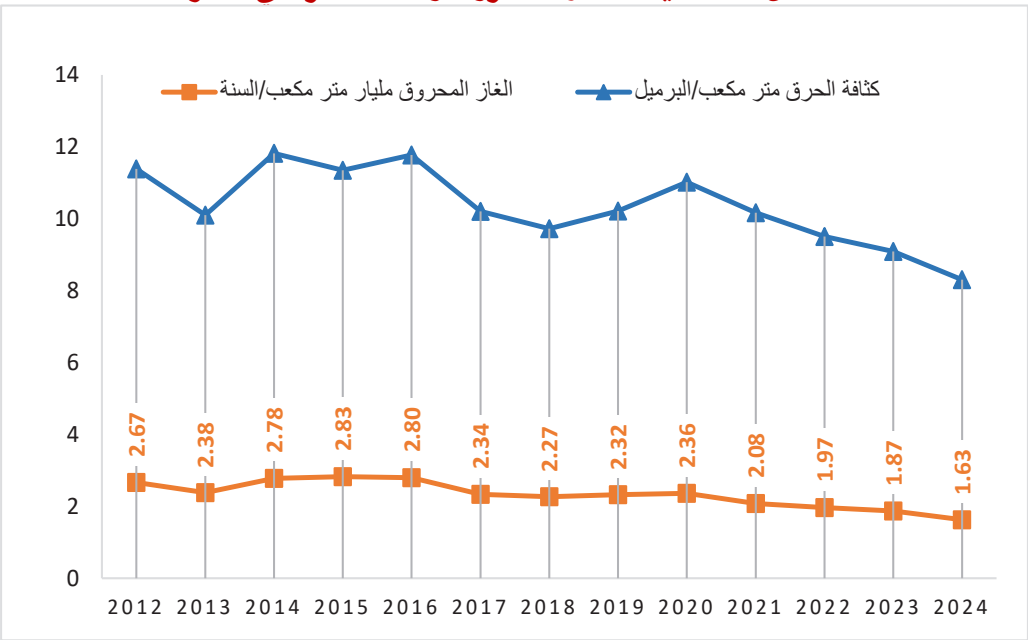
* U.S. Trade and Development Agency

لطالما كانت سياسة مصر المعلنة لسنوات عديدة هي خفض الحرق والتنفيس، وقد وقعت في عام 2017 على مبادرة البنك الدولي "صفر حرق روتيني بحلول عام 2030"، كما وقعت عام 2022 على "التعهد العالمي بشأن الميثان". وأعلنت عن أهداف طموحة لالتقاط الغاز المصاحب في استراتيجيتها الوطنية لكفاءة الطاقة. واستضافت مصر مؤتمر الأطراف COP27 في عام 2022، وحصلت على دعم الإدارة الأمريكية آنذاك والاتحاد الأوروبي لخفض الانبعاثات الناتجة عن الحرق والتنفيس والتسرب.

وقد تم تنفيذ العديد من مشاريع الحد من حرق الغاز في مصر خلال السنوات الأخيرة، ومنها على سبيل المثال مشروع في امتياز "مليحة" في الصحراء الغربية في عام 2015 قامت به شركة Naftogaz وتم تصميمه لالتقاط واستعادة حوالي 425 ألف متر مكعب من الغاز يومياً، يعاد حقنها في شبكة خطوط الأنابيب، مما أدى إلى تقليل الحرق بشكل كبير. ومنها كذلك مشروع في عام 2020 قامت به شركة United Oil and Gas ضمن امتياز أبو سنان في الصحراء الغربية، وتضمن المشروع بناء خط أنابيب جديد بطول 20 كيلومتر في وقت قياسي (13 شهراً) لنقل الغاز من حقل ASH. وقد نجح هذا المشروع في القضاء على الحرق الروتيني في الموقع لنحو 142 ألف متر مكعب من الغاز (Davis, 2022)[116].

يوضح الشكل 13 كميات الغاز المحروق في مصر وكثافة الحرق، ويلاحظ تراجع هذه الكثافة بحوالي 25% بين عامي 2020 و2024.

الشكل 13: كميات الغاز المحروق وكثافة الحرق في مصر



مصدر البيانات: (GFMR, 2025)

المناقشة والنتائج:

1- تبيّن الدراسة أن تقديرات انبعاثات الميثان العالمية تختلف بصورة ملحوظة بين المؤسسات الدولية وقواعد البيانات المختلفة، نتيجة لاختلاف المنهجيات، ومستوى دقة البيانات، واعتماد بعض التقديرات على نماذج غير محدثة. ويؤدي هذا التفاوت إلى تضارب في الأرقام المعلنة، وإلى صعوبة تحديد المسؤوليات الحقيقية بين القطاعات والدول، بما يضعف مصداقية الخطاب المناخي في بعض الأحيان. كما تشير الدراسة إلى أن بعض التقديرات، خاصة في قطاعات الزراعة والنفايات، تعتمد على بيانات قديمة نسبياً، في حين تُحدَّث بيانات قطاع الطاقة بوتيرة أسرع، مما يخلق انطباعاً مضللاً بارتفاع مساهمة هذا القطاع مقارنة بغيره.

2- إجمالي انبعاثات الميثان العالمية يتجاوز 350 مليون طن سنوياً، موزعة على عدة قطاعات رئيسية. وعند تحليل هذه الانبعاثات تفصيلياً، يتضح أن:

- الزراعة تمثل المصدر الأكبر عالمياً، وخاصة تربية الماشية وزراعة الأرز.
- يليها قطاع الطاقة بمكوناته المختلفة، بما في ذلك الفحم والوقود الحيوي.
- بعض المصادر الطبيعية مثل الأراضي الرطبة والتشققات الجيولوجية.
- أما قطاع النفط والغاز منفرداً، فمساهمته أقل من ربع الانبعاثات العالمية.

وبذلك تؤكد الدراسة أن تصوير الصناعة البترولية على أنها المصدر الأول أو الوحيد للميثان لا يستند إلى قراءة دقيقة للبيانات المتاحة، فانبعاثات الميثان ناتجة عن منظومة معقدة من المصادر الطبيعية والبشرية، مما يعني أن معالجة مشكلة الميثان تتطلب سياسات متعددة المسارات، لا تقتصر على قطاع واحد.

3- بينت الدراسة أن مساهمة الدول العربية في انبعاثات الميثان العالمية تبقى محدودة نسبياً مقارنة بثقلها في إنتاج الطاقة، حيث لا تتجاوز مساهمتها نحو 10% من الإجمالي العالمي، رغم إنتاجها نسبة كبيرة من النفط والغاز. ويعكس ذلك مستوى متقدماً من الكفاءة التشغيلية، وتطور البنية التحتية، وتزايد الاستثمارات في تقنيات الحد من الحرق والتسرب. وأبرزت الدراسة عدداً من المبادرات العربية الجادة، من بينها:

- التوسع في استغلال الغاز المصاحب بدلاً من حرقه، وتطبيق برامج الكشف المبكر عن التسربات وإصلاحها.
- تحديث شبكات النقل والتخزين، والاستثمار في الرقمنة والمراقبة بالأقمار الصناعية.
- الانخراط في المبادرات الدولية الطوعية.

وتشير النتائج إلى أن هذه الجهود بدأت تحقق نتائج ملموسة في خفض كثافة الانبعاثات في عدد من الدول.

4- هناك فرص غير مستغلة بعد لخفض انبعاثات الميثان، خاصة في:

- قطاع الزراعة، عبر تحسين إدارة الأعلاف والسماد.
- قطاع النفايات، من خلال جمع الغاز الحيوي واستثماره.
- قطاع الفحم، عبر إغلاق المناجم المهجورة ومعالجة تسرباتها.
- قطاع النفط والغاز، عبر تعميم أفضل الممارسات التقنية.

5- ظهر جلياً خلال إعداد هذه الدراسة أن جزءاً كبيراً من التغطية الإعلامية الدولية يتسم بالانتقائية، حيث يركز بصورة مفرطة على الصناعة البترولية، ويتجاهل المساهمات الكبرى للزراعة والنفايات والفحم. وقد أدى هذا التناول غير المتوازن إلى ترسيخ صورة ذهنية مبسطة ومضلِلة لدى الرأي العام، تربط أزمة الميثان حصرياً بالنفط والغاز، بعيداً عن الواقع العلمي المعقد. كما لاحظت الدراسة أنه ليس الإعلام فحسب، بل تقارير صادرة عن عدة جهات دولية، وعلى رأسها وكالة الطاقة الدولية، تميل في بعض الأحيان إلى إبراز انبعاثات قطاع الطاقة بتفصيل كبير، مقابل عرض أقل تفصيلاً لقطاعات أخرى مثل الزراعة والنفايات. وقد أسهم هذا النهج في تضخيم الانطباع العام بمسؤولية الصناعة البترولية، وتوجيه النقاش السياسي والإعلامي نحو مسار أحادي، أضعف مفهوم العدالة المناخية بين القطاعات والدول.

6- بيّنت الدراسة أن انبعاثات الميثان، خاصة من الحرق والتسرب، تمثل خسارة مالية واضحة تتراوح بين 19 و63 مليار دولار سنوياً عالمياً، وهو ما يحتاج لكثير من التفصيل لتقييم هذا الهدر اقتصادياً وليس مالياً فقط. ففي بعض الأحيان تكون محاولة الحد من الهدر المالي مشكلة اقتصادية.

7- أظهرت النتائج أن تطور تركيز الميثان في الغلاف الجوي لا يعتمد فقط على حجم الانبعاثات، بل يتأثر أيضاً بعوامل كيميائية ومناخية تتحكم في عمر الميثان ومعدلات تفككه. وهذا يعني أن بعض التغيرات في التركيز الجوي لا يمكن تفسيرها حصراً بالأنشطة البشرية، وهذا الجانب غالباً ما يهمل كذلك في النقاش العام.

يمكن تلخيص ما سبق في التالي:

- قضية انبعاثات الميثان أكثر تعقيداً من الصورة السائدة في الخطاب الإعلامي والسياسي.
- الصناعة البترولية ليست المصدر الرئيسي ولا الوحيد للميثان.
- تقديرات الانبعاثات تعاني من تفاوت منهجي واضح.
- الدول العربية تبذل جهوداً حقيقية ومتصاعدة لخفض الانبعاثات.

- الفرص الكبرى لخفض الميثان ما زالت كامنة في عدة قطاعات.
- التناول الإعلامي والمؤسسي غير المتوازن يعيق الوصول إلى حلول عادلة وفعالة.
- من المهم إعادة توجيه النقاش العالمي نحو مقاربة شاملة، قائمة على البيانات الدقيقة، وتقاسم المسؤوليات بين القطاعات، ودعم الجهود الواقعية للدول المنتجة للطاقة، بما يحقق التوازن بين حماية المناخ وأمن الطاقة والتنمية المستدامة.

ملحق 1: الدول المشاركة في تعهد الميثاق العالمي

أستراليا وأوقيانوسيا	أمريكا الشمالية والجنوبية	أوروبا		آسيا	أفريقيا	
أستراليا	الإكوادور	البوسنة والهرسك	الاتحاد الأوروبي	أذربيجان	الرأس الأخضر	ليبيريا
بابوا غينيا الجديدة	الأرجنتين	التشيك	السويد	الأردن	السودان	ليسوتو
بالاو	البرازيل	الجبل الأسود	المملكة المتحدة	الإمارات	الصومال	مالي
توفالو	الدومينيكان	الدنمارك	إسبانيا	إندونيسيا	الغابون	مدغشقر
تونغا	السلفادور	المجر	أوكرانيا	أوزبكستان	الكاميرون	مصر
جزر سليمان	المكسيك	النرويج	تركيا	الباكستان	الكونغو	ملاوي
جزر كوك	الولايات المتحدة	النمسا	سان مارينو	البحرين	الكونغو الديمقراطية	موريتانيا
جزر مارشال	أنتيغوا وباربودا	اليونان	سلوفاكيا	بنغلاديش	المغرب	موزمبيق
ساموا	أوروغواي	إستونيا	سلوفينيا	تايلاند	النيجر	ناميبيا
فانواتو	باربادوس	إيطاليا	سويسرا	تيمور الشرقية	إثيوبيا	نيجيريا
فيجي	بليز	أرمينيا	صربيا	سريلانكا	إسواتيني	
كيريباس	بنما	ألبانيا		السعودية	أفريقيا الوسطى	
ميكرونيزيا	بيرو	ألمانيا		سنغافورة	أنغولا	
ناورو	ترينيداد وتوباغو	أندورا		طاجيكستان	أوغندا	
نيوزيلندا	جامايكا	أيرلندا		العراق	بنين	
نيوي	دومينيكا	أيسلندا		عُمان	بوركينا فاسو	
	سانت كيتس ونيفيس	بلجيكا		الفلبين	بوروندي	
	سانت لوسيا	بلغاريا		فيتنام	تشاد	
	سورينام	بولندا		قطر	توغو	
	شيلي	فرنسا		قيرغيزستان	تونس	
	غرينادا	فنلندا		كازاخستان	جزر القمر	
	غواتيمالا	قبرص		كوريا الجنوبية	جنوب أفريقيا	
	غيانا	كرواتيا		الكويت	جيبوتي	
	كندا	كوسوفو		الكيان الإسرائيلي	رواندا	
	كوبا	لاتفيا		لبنان	زامبيا	
	كوستاريكا	لوكسمبورغ		ماليزيا	ساحل العاج	
	كولومبيا	ليتوانيا		منغوليا	سيراليون	
	هايتي	ليختنشتاين		نيبال	سيشل	
	هندوراس	مالطا		اليابان	غامبيا	
		مقدونيا الشمالية		اليمن	غانا	
		مولدوفا			غينيا	
		موناكو			غينيا الاستوائية	
		هولندا			ليبيا	

المراجع

[1] Riley, P. (2025). *Timeline of Climate Change*. Encyclopedia Britannica. https://www.britannica.com/story/timeline-of-climate-change

[2] NASA. (October, 2024). *Milankovitch (Orbital) Cycles and Their Role in Earth's Climate*. NASA Science. https://science.nasa.gov/science-research/earth-science/milankovitch-orbital-cycles-and-their-role-in-earths-climate/

[3] Sylvia G. Dee (2022). *The Callendar effect: Here's how this man connected humans to global warming in 1938*. World Economic Forum. https://www.weforum.org/stories/2022/02/climate-change-global-warming-carbon-dioxide-fossil-fuels/

[4] American Chemical Society. (n.d.). *Keeling Curve: Study of Atmospheric Carbon Dioxide*. https://www.acs.org/education/whatischemistry/landmarks/keeling-curve.html

[5] U.S. Geological Survey. (2023). *Mauna Loa -History, hazards, and risk of living with the world's largest volcano.* https://www.usgs.gov/volcanoes/mauna-loa/mauna-loa-history-hazards-and-risk-living-worlds-largest-volcano

[6] Weart, S. (2025). *The Discovery of Global Warming*. American Institute of Physics. https://history.aip.org/climate

[7] Ken Braun (2023). *Al Gore's 30 years of climate errors: The scary seas* [Part 3]. Capital Research Center. https://capitalresearch.org/article/al-gores-30-years-of-climate-errors-part-3/

[8] NASA (April 2025). *Sea level.* NASA. https://sealevel.nasa.gov/

[9] International Energy Agency (May 2025). *Global Methane Tracker/ Key Findings.* https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2025/key-findings

[10] International Energy Agency (May 2025). *Global Methane Tracker/ Key Findings.* https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2025/key-findings

[11] Methane possible. *Nat. Clim. Chang.* **13**, 1 (2023). https://doi.org/10.1038/s41558-022-01590-4

[12]John P. Rafferty. (2025) *Methane*. Britannica Academic. https://www.britannica.com/science/methane

[13] Biruh Shimekit and Hilmi Mukhtar (April 2012). *Natural Gas Purification Technologies – Major Advances for CO_2 Separation and Future Directions*. In: Advances in Natural Gas Technology, Editor: Hamid Al-Megren.

[14] Turns, S.R. (2013). *An Introduction to Combustion*, 3rd ed., McGraw-Hill.

[15] Gas Exporting Countries Forum. (January 2023). *Expert commentary: Monetisation of natural gas through the development of value-added petrochemicals*. GECF. https://www.gecf.org/events/expert-commentary-monetisation-of-natural-gas-through-the-development-of-value-added-petrochemicals

[16] US Environmental Protection Agency (2022). Methan Emission. https://www.epa.gov/ghgemissions/methane-emissions

[17] Saunois, M., et al. (2020). *The global methane budget 2000- 2017*. Earth System Science Data, 12(3), 1561- 1623. https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020

[18]Sanderson, M. G. (1996). *Global methane emissions from termites*. Chemosphere, 32(7), 1179- 1198. https://doi.org/10.1016/S0045-6535(96)00338-4

[19] Reeburgh, W. S. (2007). *Oceanic methane biogeochemistry*. Chemical Reviews, 107(2), 486- 513 https://doi.org/10.1021/cr050362v

[20] Schuur, E. A. G., et al. (2015). *Climate change and the permafrost carbon feedback*. Nature, 520(7546), 171- 179. https://doi.org/10.1038/nature14338

[21] Etiope, G., & Sherwood Lollar, B. (2013). *Methane emissions from geological sources: New insights and implications*. Reviews of Geophysics, 51(3), 276 -299. https://doi.org/10.1002/rog.20011

[22] International Energy Agency (May, 2025). *Global Methane Tracker.* DOCUMENTATION 2025 VERSION.

[23] International Energy Agency (March, 2024). Global Methane Tracker 2024. https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2024#overview

[24] Voiland Adam. (March, 2018). *Methane Matters, Scientists Work to Quantify the Effects of a Potent Greenhouse Gas*. NASA Earth Observatory. https://earthobservatory.nasa.gov/features/MethaneMatters

[25] NASA (January, 2025). *Methane*. https://climate.nasa.gov/vital-signs/methane/?intent=121

[26] Pearce, F. (2016, October 27). *The methane riddle: What is causing the rise in emissions?* Yale Environment 360. https://e360.yale.edu/features/methane_riddle_what_is_causing_the_rise_in_emissions

[27] Schwietzke, S., Sherwood, O., Bruhwiler, L. et al. Upward revision of global fossil fuel methane emissions based on isotope database. Nature 538, 88–91 (2016). https://doi.org/10.1038/nature19797

[28] NASA. (March 2025). *Methane | Vital Signs – Climate Change: Vital Signs of the Planet*. NASA. https://climate.nasa.gov/vital-signs/methane/?intent=121

[29] Lan, X., K.W. Thoning, and E.J. Dlugokencky (June, 2025). *Trends in globally- averaged CH4, N2O, and SF6 determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements*. Version 2025-06, https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10

[30] Pison, I., Bousquet, P., & Hauglustaine, D. (2013). *Stable atmospheric methane in the 2000s*. Atmospheric Chemistry and Physics, 13(22), 11609–11623. https://doi.org/10.5194/acp-13-11609-2013

[31] Stig B. Dalsøren, et al (March, 2016*). Atmospheric methane evolution the last 40 years*. Atmospheric Chemistry and Physics. 16, 3099- 3126. www.atmos-chem-phys.net/16/3099/2016/

[32] Maazallahi H., S. M. Assal, & Hamburg, P. S. (2023). *Intercomparison of detection and quantification methods for methane emissions from the natural gas distribution network in Hamburg, Germany*. Atmospheric Measurement Techniques, 16(18), 5051-5076. https://doi.org/10.5194/amt-16-5051-2023

[33] Environmental Defense Fund. (2019). *Measuring methane: A guide to the science*. Retrieved from https://www.edf.org/sites/default/files/EDF-Methane-Science-Brochure.pdf

[34] Kuze, A., Suto, H., Nakajima, M., & Kawashima, T. (2016). "Satellite observations of atmospheric methane and their value for quantifying methane emissions." *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(23), 14371-14392. https://doi.org/10.5194/acp-16-14371-2016

[35] Storm, I. M. L. D., Hellwing, A. L. F., Nielsen, N. I., & Madsen, J. (2012). "Methods for measuring and estimating methane emission from ruminants." *Animals*, 2(2), 160-183. https://doi.org/10.3390/ani2020160

[36] U.S. Environmental Protection Agency. (2016). *Methane Emissions Detection and Measurement Techniques, Equipment and Costs*. Retrieved from https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-04/documents/mon7ccacemissurvey.pdf

[37] U.S. Department of Commerce. (May 2024). *Leak Detection and Repair (LDAR)*. In: *Methane Abatement for Oil and Gas: Handbook for Policymakers*. https://cldp.doc.gov/sites/default/files/2024-05/Chapter%205%20-%20Methane%20Handbook.pdf

[38] World Economic Forum. (November, 2022). *Waste emissions methane cities*. https://www.weforum.org/stories/2022/11/waste-emissions-methane-cities/

[39] U.S. Environmental Protection Agency. (2023). *Understanding Global Warming Potentials*. https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials

[40] Butler, T., Leitao, J., & Lupascu, A. (2020). *Consideration of methane emissions in the modelling of ozone concentrations in chemical transport models: Final report* (TEXTE 67/2020, Project No. 127382, Report No. FB000261/ENG). German Environment Agency. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uba_texte_2020_67_project_127382_final.pdf

[41]CBS News. (2025, July 7). *12 Turkish soldiers die from methane gas in Iraqi cave while searching for remains of comrade killed by militants*. https://www.cbsnews.com/news/turkish-soldiers-die-methane-gas-cave-search-slain-comrade/

[42] Nguyen, L., Quintana, A., Rowland, A., & Vegh-Gaynor, G. (2023). *Mitigating methane: A global health strategy - Overview*. Global Climate and Health Alliance. https://climateandhealthalliance.org/wp-content/uploads/2023/08/MethaneReport-Overview-FINAL.pdf

[43] Malley, C. S., et al. (2017). *Updated global estimates of respiratory mortality in adults ≥30 years of age attributable to long-term ozone exposure*. Environmental Health Perspectives, 125(8), 087021. https://doi.org/10.1289/EHP1390

[44] United Nations Environment Programme & Climate and Clean Air Coalition. (2021). *Global methane assessment: Benefits and costs of mitigating methane emissions*. United Nations Environment Programme. https://www.unep.org/resources/report/global-methane-assessment-benefits-and-costs-mitigating-methane-emissions

[45] Daily Sabah. (2022, December). *Blast at Indonesian coal mine kills 9 workers*. https://www.dailysabah.com/world/asia-pacific/blast-at-indonesian-coal-mine-kills-9-workers

[46] Frank C. Errickson, Klaus Keller, William D. Collins, Vivek Srikrishn and David Anthoff. (2021). *Equity is more important for the social cost of methane than climate uncertainty.* Nature 592, 564–570. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03386-6

[47] *United States Environmental Protection Agency. (2025, March)*. *About coal mine methane. EPA. https://www.epa.gov/cmop/about-coal-mine-methane*

[48] International Energy Agency. (2024). *Strategies to reduce emissions from coal supply.* https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2023/strategies-to-reduce-emissions-from-coal-supply

[49] Global Energy Monitor. (2022). Coal Mine Methane 2022. https://globalenergymonitor.org/wp-content/uploads/2022/03/GEM_CCM2022_final.pdf

[50] Visualizing Energy. (2023). *Coal mine superemitters of methane*. https://visualizingenergy.org/coal-mine-super-emitters-of-methane/

[51] Global Methane Initiative. (2020). *Global methane emissions from coal mining to continue growing*. https://www.globalmethane.org/documents/Global_Methane_Emissions_from_Coal_Mining.pdf

[52] Energy Institute (2025). *2025 Energy Institute Statistical Review of World Energy, Coal Production*. https://www.energyinst.org/statistical-review

[53] Global Energy Monitor (May, 2025). *Global Coal Mine Tracker, Coal Mine Methane Emissions by Region*. C. https://globalenergymonitor.org/projects/global-coal-mine-tracker/

[54] Ember. (January 2024). Coal mine methane adds 27% to steel's climate footprint. https://ember-energy.org/latest-updates/coal-mine-methane-adds-27-to-steels-climate-footprint/

[55]International Energy Agency (May 2025). *Global Methane Tracker,* Methane Emissions Comparison 2024. https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/methane-tracker

[56] تركي حمش. (2016). حرق الغاز على الشعلة. أوابك. https://oapecorg.org/media/883ccd88-0f1c-4c59-83f8-9ad443e92afb/544419081/Derasat%202015/%D9%85%D9%84%D8%AE%D8%B5%20%D8%AF%D8%B1%D8%A7%D8%B3%D8%A9%20%D8%AD%D8%B1%D9%82%20%D8%A7%D9%84%D8%BA%D8%A7%D8%B2%20%D8%B9%D9%84%D9%8A%20%D8%A7%D9%84%D8%B4%D8%B9%D9%84%D8%A9.pdf

[57] Ostridge, A. and Davis, M. (2025) *Global quantification of flaring and operational performance of LNG liquefaction plants through satellite analytics*. SPE-229086-MS. Society of Petroleum Engineers. DOI: 10.2118/229086-MS.

[58] World Bank. (2024). *Population, total*. The World Bank Group. Retrieved August 6, 2025, from https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL?locations=1A

[59] Harris S.J. et al (2025). *Methane emissions from the Nord Stream subsea pipeline leaks*. Nature, Vol 637, 30 January. P: 1124- 1130. https://doi.org/10.1038/s41586-024-08396-8

[60] California Air Resources Board. (2016). *Aliso Canyon natural gas leak: Final report and findings*. Sacramento, CA: CARB. https://ww2.arb.ca.gov

[61] U.S. Department of Energy. (2016). *Aliso Canyon natural gas leak: Technical assessment and analysis*. Washington, DC: DOE.

[62] California Public Utilities Commission. (2023). *Aliso Canyon well failure and actions to date*. CPUC Safety and Enforcement Division. https://www.cpuc.ca.gov

[63] EurekAlert. (May 2025). *The forgotten Source of Methane*. https://www.eurekalert.org/news-releases/548711

[64] Smith P. et al. (September 2021). *Agricultural methane emissions and the potential formitigation*. Phil. Trans. R. Soc. A.37920200451http://doi.org/10.1098/rsta.2020.0451

[65] Sujeevan R. et al. (March 2024). *Methane Emission from Rice Fields: Necessity for Molecular Approach for Mitigation*. Science Direct, Volume 31, Issue 2, Pages 159-178.

[66] Global Methane Pledge. (No date). *Fast action on methane to keep a 1.5°C future within reach.* About the Global

[67] Global Methane Pledge. (2023). *New Global Methane Pledge Champions Call for Accelerated Action on Methane to Keep 1.5°C Within Reach*. Retrieved from https://www.globalmethanepledge.org/news/new-global-methane-pledge-champions-call-

[68] Germanwatch. (2022). *Global Methane Pledge Factsheet*. Retrieved from https://www.germanwatch.org/sites/default/files/germanwatch_gmp_factsheet_g7-

[69] International Energy Agency. (2022). *National Methane Action Plan*. IEA. Retrieved from https://www.iea.org/policies/17032-national-methane-action-plan

[70] World Bank. (July 2025). *Global Flaring and Methane Reduction (GFMR) Partnership*. https://www.worldbank.org/en/programs/gasflaringreduction/about

[71] World Bank. (July 2025). *Dataset: 2012 - 2024 Flare Volume and Flaring Intensity Estimates by Economy.* https://thedocs.worldbank.org/en/doc/bd2432bbb0e514986f382f61b14b2608-0400072025/related/Flare-volume-and-intensity-estimates-2012-2024.xlsx

[72] Gupta D K, et al. (2015). *Global warming potential of rice (Oryza sativa)-wheat (Triticum aestivum) cropping system of the Indo-Gangetic Plains*. Indian J Agric Sci, 85(6): 807- 816.

[73] Weerakoon W et al. (2011). *Direct-seeded rice culture in Sri Lanka: Lessons from farmers.* Field Crops Res, **121**(1): 53- 63.

[74] Jagadeesh Babu Y, Nayak D R, Adhya T K. (2006). *Potassium application reduces methane emission from a flooded field planted to rice*. Biol Fertil Soils, 42(6): 532- 541.

[75] Mitter E K, et al. (2021). Rethinking crop nutrition in times of modern microbiology: Innovative biofertilizer technologies. Front Sustain Food Syst, 5: 606815.

[76] World Bank. (May 2024). *Greening Viet Nam's Rice Bowl: A Mekong Delta Success Story*. Retrieved from https://www.worldbank.org/en/news/feature/2024/05/14/greening-viet-nam-s-rice-bowl-a-mekong-delta-success-story

[77] Vietnam News Agency. (August 2024). *Around 2.7 billion USD needed to carry out 1 million ha high-quality rice project*. Retrieved from https://en.vietnamplus.vn/around-27-billion-usd-needed-to-carry-out-1-million-ha-high-quality-rice-project-post295812.vnp

[78] Lena Isaksson. (2025). *Policy action key to unlocking cost-effective methane reductions*. International Institute for Applied Systems Analysis. https://iiasa.ac.at/news/nov-2025/policy-action-key-to-unlocking-cost-effective-methane-reductions?utm_source=chatgpt.com

[79] Amandine Denis-Ryan, et al. (December 2024). Prioritising methane abatement makes economic sense. Institute for Energy Economics and Financial Analysis. https://ieefa.org/resources/prioritising-methane-abatement-makes-economic-sense?utm_source=chatgpt.com

[80] Mallory Long, et al. (2024). *Economic impacts of reducing methane emissions in British Columbia's oil and natural gas sectors: Taxes vs technology standards*. In: *Resource and Energy Economics*. Science Direct, Volume 76, February 2024, 101421. https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2023.101421

[81] Mella McEwen. (July 2025). Permian Basin methane emissions drop over 50% as new tech takes hold. https://www.mrt.com/business/oil/article/permian-basin-methane-reduction-20785015.php?utm_source=chatgpt.com

[82] Gupta D K, et al. (2015). *Global warming potential of rice (Oryza sativa)-wheat (Triticum aestivum) cropping system of the Indo-Gangetic Plains*. Indian J Agric Sci, 85(6): 807- 816.

[83] Jagadeesh Babu Y, Nayak D R, Adhya T K. (2006). *Potassium application reduces methane emission from a flooded field planted to rice*. Biol Fertil Soils, 42(6): 532- 541.

[84] Mitter E K, et al. (2021). Rethinking crop nutrition in times of modern microbiology: Innovative biofertilizer technologies. Front Sustain Food Syst, 5: 606815.

[85] World Bank. (May 2024). *Greening Viet Nam's Rice Bowl: A Mekong Delta Success Story*. Retrieved from https://www.worldbank.org/en/news/feature/2024/05/14/greening-viet-nam-s-rice-bowl-a-mekong-delta-success-story

[86] Theodora Stankova (2024). *Vietnam Farmers To Receive $40M In Carbon Credit Payments Through Low-Emission Rice Project*. Carbon Herald, https://carbonherald.com/vietnam-farmers-to-receive-40m-in-carbon-credit-payments-through-low-emission-rice-project/#:~:text=Earlier%20in%20September%2C%20the%20World,the%20first%20expected%20in%202025.

[87] Vietnam News Agency. (August 2024). *Around 2.7 billion USD needed to carry out 1 million ha high-quality rice project*. Retrieved from https://en.vietnamplus.vn/around-27-billion-usd-needed-to-carry-out-1-million-ha-high-quality-rice-project-post295812.vnp

[88] UNEP. (November, 2025). Global Methane Science Report 2025. https://www.unep.org/resources/report/global-methane-status-report-2025

[89] James Temple. (February 2021). *Bill Gates: Rich nations should shift entirely to synthetic beef.* MIT Technology Review. https://www.technologyreview.com/2021/02/14/1018296/bill-gates-climate-change-beef-trees-microsoft/

[90]Michael A. Clark et al. (2020). *Global food system emissions could preclude achieving the 1.5° and 2°C climate change targets*.Science370,705-708(2020). https://doi.org/10.1126/science.aba7357

[91] International Petroleum Industry Environmental Conservation Association. (August 2023). *Ipieca member ADNOC plans to achieve net-zero emissions by 2045 and zero methane emissions by 2030.* https://www.ipieca.org/news/adnoc-brings-net-zero-target-forward

[92] ADNOC. (no date). *Decarbonizing Our Operations*. https://www.adnoc.ae/en/towards-net-zero/decarbonizing-our-operations/

[93] OPEC. (2024). *Annual Statistical Bulletin*.

[94] منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول/أوابك. (2025) تقرير الأمين العام السنوي 51. https://oapecorg.org/media/a9748b2c-94b6-4b3e-b9d4-cd2c2371baef/-315496675/Secretary%20General%20Report/2024/%D8%AA%D9%82%D8%B1%D9%8A%D8%B1%20%D8%A7%D9%84%D8%A7%D9%85%D9%8A%D9%86%20%D8%A7%D9%84%D8%B9%D8%A7%D9%85%2051.pdf

[95] UAE Ministry of Foreign Affairs. (May 2025). *UAE Hosts World Bank's Global Flaring and Methane Reduction Steering Committee Meeting in Abu Dhabi*. https://www.mofa.gov.ae/en/MediaHub/News/2025/5/2/2-5-2025-UAE-abu-dhabi

[96] World Bank. (December 2023). *Global Methane and Flaring Regulations, Algeria Policy and Targets.* https://flaringventingregulations.worldbank.org/algeria#:~:text=The%20NDC%20has%20an%20unconditional,reduction%20target%20of%2022%20percent.

[97] Sonatrach. (2024). *Climate, a Linchpin of Our Strategy*. https://sonatrach.com/wp-content/uploads/2025/06/Brochure_HSE_ENG_2024.pdf

[98] Global Flaring and Methane Reduction Partnership. (July 2025). *Global Gas Flaring Tracker Report*. https://www.worldbank.org/en/programs/gasflaringreduction/publication/2025-global-gas-flaring-tracker-report

[99] ARAMCO. (no date). *GHG Emissions Management Program*. https://www.aramco.com/en/sustainability/climate-and-energy/managing-our-footprint/ghg-emissions-management-program

[100] Nagasawa A, and Abdelraouf M. (October 2023). *Saudi Green Initiatives and their Role in Achieving Environmental Goals in the Middle East*. Gulf Research Center. https://www.grc.net/single-commentary/116#:~:text=As%20a%20testament%20to%20its,15

[101] ARAMCO. (2025). *Sustainability Report 2024*. https://www.aramco.com/-/media/publications/corporate-reports/sustainability-reports/report-2024/english/2024-saudi-aramco-sustainability-report-full-en.pdf

[102] OGCI (January 2023). White Paper. *Results of OGCI Satellite Monitoring Campaign in Iraq.* https://www.ogci.com/wp-content/uploads/2023/04/OGCI_Iraq_Whitepaper_jan23.pdf

[103] وزارة النفط العراقية (يونيو 2024). *ضمن البرنامج والدعم الحكومي لقطاع الغاز .. وزارة النفط تحقق انجازات كبيرة ومشاريع واعدة لإيقاف حرق الغاز وتحقيق الاكتفاء الذاتي.* https://oil.gov.iq/?article=2703

[104] وزارة النفط العراقية (يناير 2025). *وكيل وزارة النفط لشؤون الغاز : تشغيل مشروع غاز الناصرية والغراف في الربع الاول من عام 2027.* https://oil.gov.iq/?article=3003

[105] TotalEnergies. (2025, September 15). *Iraq: TotalEnergies launches the construction of the final two major projects of the GGIP*. https://totalenergies.com/news/press-releases/iraq-totalenergies-launches-construction-final-two-major-projects-ggip

[106] Baker Hughes. (2025, September 22). *Baker Hughes signs agreement with Halfaya Gas Company to advance flare reduction project in Iraq*. https://www.bakerhughes.com/company/news/baker-hughes-signs-agreement-halfaya-gas-company-advance-flare-reduction-project-iraq

[107] وزارة النفط العراقية (يوليو 2025). *برعاية نائب رئيس مجلس الوزراء لشؤون الطاقة وزير النفط .. توقيع عقد مع شركة شلمبرجر لتطوير الانتاج في حقل عكاس الغازي.* https://oil.gov.iq/?article=2770

[108] Qatar Petroleum (2015). Annual Review & Sustainability Report. https://www.qatarenergy.qa/ar/MediaCenter/Publications/QP%20Annual%20Review%202015%20-%20English.pdf.

[109] Qatar Energy LNG (2024). Sustainability Report. https://www.qatarenergylng.qa/Portals/0/DNNGalleryPro/uploads/2025/11/12/QatarEnergyLNGSustainabilityReport2024-EN.pdf

[110] Kuwait Oil Company. (2025). Towards a sustainable future. Annual Report 24-25. https://www.kockw.com/sites/EN/Annual%20Reports/2024-2025%20Arabic.pdf#search=%D8%A7%D9%84%D9%85%D9%8A%D8%AB%D8%A7%D9%86

[111] Kuwait Petroleum Corporation. (2023). *Sustainability for a Promising Future*. Sustainability Report 2022- 2023. https://www.kpc.com.kw/ShowPdf?title=Sustainablility%20Report&pdfUrl=https://corporateblob.kpc.com.kw/publications/883d6185-1b31-4ded-b2db-f25f583ebc68.pdf

[112] Kuwait Petroleum Corporation. (2024). *Annual Report 2023- 2024*. https://www.kpc.com.kw/ShowPdf?title=Annual%20Report&pdfUrl=https://corporateblob.kpc.com.kw/publications/296b06d0-eb25-47de-95e0-14995a741658.pdf

[113] المؤسسة الوطنية للنفط (يناير، 2026). *المؤسسة الوطنية للنفط تنجح في خفض حرق أكثر من 100 مليون قدم مكعب من الغاز يومياً*. https://noc.ly/%d8%a7%d9%84%d9%85%d8%a4%d8%b3%d8%b3%d8%a9-%d8%a7%d9%84%d9%88%d8%b7%d9%86%d9%8a%d8%a9-%d9%84%d9%84%d9%86%d9%81%d8%b7-/%d8%aa%d9%86%d8%ac%d8%ad-%d9%81%d9%8a-%d8%ae%d9%81%d8%b6-%d8%ad%d8%b1%d9%82-%d8%a3

[114] U.S. Trade and Development Agency. (December 2024). *USTDA Partners with Egyptian National Oil Company to Reduce Methane Emissions*. https://www.ustda.gov/ustda-partners-with-egyptian-national-oil-company-to-reduce-methane-emissions/

[115] International Energy Agency (May 2025), *Global Methane Tracker 2025* https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2025.

[116] Davis M. et al. (2022). *Leadership on flaring in Egypt: Recent successes and future opportunities in the lead-up to COP27*. https://flareintel.com/wp-content/uploads/2022/10/20220927-Leadership-on-flaring-in-Egypt-successes-and-future-opportunities-in-the-lead-up-to-COP27.pdf

منظمة الأقطار
العربية المصدرة
للبترول (أوابك)