منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

الغاز الحيوي

ودوره في تحول الطاقة، وخفض انبعاثات الميثان

Biogas and Its Role in Energy Transition and Reducing Methane Emissions

إعداد

المهندس / وائل حامد عبد المعطي

خبير صناعات غازية

إدارة الشؤون الفنية

دولة الكويت- مارس 2026

جميع حقوق الطبع محفوظة، ولا يجوز إعادة النشر أو الاقتباس دون إذن خطي مسبق من المنظمة، 2026

منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

ص.ب 20501 الصفاة الكويت 13066
هاتف 24959000 (965) - فاكسميلي 24959755 (965)
الموقع على الإنترنت: www.oapecorg.org
البريد الإلكتروني: oapec@oapecorg.org

مقدمة

يمثل الغاز الحيوي أحد الركائز المتنامية في دعم الجهود الدولية الرامية إلى بناء منظومة طاقة منخفضة الكربون، لما يتمتع به من دور مزدوج يجمع بين الإدارة المستدامة للمخلفات العضوية الزراعية والصناعية والبلدية من جهة، وتوفير مصدر محلي للطاقة منخفضة الانبعاثات من جهة أخرى. فضلاً عن مساهمته الفاعلة في الحد من انبعاثات غاز الميثان الناتجة عن تحلل المخلفات في غياب نظم لإدارة المخلفات.

من هذا المنطلق، تأتي أهمية هذه الدراسة التي تهدف إلى استعراض الإطار المعرفي والتقني لكيفية إنتاج الغاز الحيوي من المخلفات العضوية، وطرق ترقيته إلى الميثان الحيوي أو الغاز الطبيعي المتجدد، لسهولة دمجه في شبكات نقل وتوزيع الغاز الطبيعي. وتتطرق الدراسة إلى تطبيقات استخدام الغاز الحيوي في توليد الكهرباء والحرارة، وكذلك خيارات استغلال الميثان الحيوي كوقود مضغوط أو مسال في قطاع النقل البري والبحري، مع تسليط الضوء على دور الغازات الحيوية في دعم التحول الطاقي وخفض البصمة الكربونية.

كما تتناول الدراسة التطور العالمي لقطاع الغاز الحيوي من حيث التوزيع الجغرافي للمشاريع القائمة، ومزيج المواد العضوية المستخدمة في الإنتاج حسب المناطق، والأطر التنظيمية والسياسات الداعمة. إضافة إلى استعراض المشاريع التجارية المنفذة وسعاتها الإنتاجية، وتحليل أثر التوسع المتسارع في عدد المحطات على نمو إنتاج الغاز الحيوي والميثان الحيوي عالمياً.

ومن بين ما **خلصت إليه الدراسة** أن القيمة الحقيقية لمشاريع الغاز الحيوي لا تقتصر على العائد المباشر من بيع الطاقة (سواء كهرباء مولدة باستخدام الغاز الحيوي في وحدات التوليد المشترك أو الميثان الحيوي عبر استخدامه كوقود في النقل)، بل

تمتد إلى ما يمكن تسميته بـــ"العائد البيئي والاقتصادي والاجتماعي المركب". وهو الأمر الذي شجع العديد من الدول للاستثمار في هذا القطاع. كما جذب اهتمام شركات الطاقة العالمية التي قامت بعشرات عمليات الاستحواذ على مشاريع للغاز الحيوي، الأمر الذي يشير إلى حدوث تحول هيكلي في قطاع الغاز الحيوي من مرحلة كانت تقوم على شركات محلية أو مطورين محليين إلى مرحلة تكتل مؤسسي تقوده شركات الطاقة العالمية.

كما توصلت الدراسة إلى أن هناك إمكانات واعدة لتطوير قطاع الغاز الحيوي في الدول العربية، بفضل ما تمتلكه من مقومات أساسية تشمل وفرة المخلفات الزراعية والبلدية، والشراكات الاستراتيجية مع الشركات العالمية الرائدة في المجال. ولا شك أن وجود مصادر المخلفات بالقرب من مراكز الطلب، وتوافر البنية التحتية للغاز الطبيعي في العديد من الدول العربية، يشكلان معاً نقطة انطلاق لتطوير مشاريع الغاز الحيوي والميثان الحيوي على أسس اقتصادية وبيئية مستدامة.

تصدر الأمانة العامة هذه الدراسة المتخصصة في إطار سعيها إلى رصد أبرز التطورات الدولية في قطاع الغاز الحيوي، وتحليل فرص الاستفادة منها إقليميًا، بما يسهم في دعم متخذي القرار والخبراء والمهتمين بملفات الطاقة والتحول الطاقي. وتأمل أن تشكل هذه الدراسة إضافة معرفية تسهم في تعزيز النقاش حول دور الغاز الحيوي كأحد مسارات الطاقة منخفضة الكربون في الدول العربية.

والله ولي التوفيق،،،

الأمين العام

خالد العتيبي

قائمة المحتويات

مقدمة 3

قائمة المحتويات 5

قائمة الأشكال 7

قائمة الجداول 8

الفصل الأول: مصادر الغاز الحيوي وتطبيقاته 9

1-1: حقائق أساسية عن الغاز الحيوي 10

1-1-1: ما هو الغاز الحيوي؟ 10

1-1-2: الميثان الحيوي (Bio-Methane) أو الغاز الطبيعي المتجدد 13

1-1-3: القيمة الحرارية للغاز الحيوي والميثان الحيوي 15

1-1-4: القدرة على إنتاج الميثان 16

1-2: السلسلة الكاملة للغاز الحيوي من الإنتاج إلى الاستهلاك 19

1-3: سير العمليات داخل منشأة إنتاج الغاز الحيوي 23

1-3-1: عملية استقبال وتحضير المخلفات العضوية 24

1-3-2: عملية الهضم اللاهوائي (Anaerobic Digestion) 25

1-3-3: استرجاع ومعالجة الغاز الحيوي 30

1-3-4: فصل وتخزين ومعالجة البقايا المهضومة 32

1-4: العوامل المؤثرة على عملية الهضم اللاهوائي 33

1-4-1: معدل تحميل المادة العضوية (Organic Loading Rate, OLR) 34

1-4-2: حرارة التشغيل 35

1-4-3: زمن الاحتجاز الهيدروليكي (Hydraulic Retention Time, HRT) 38

الفصل الثاني: ترقية الغاز الحيوي إلى الميثان الحيوي 39

2-1: ترقية الغاز الحيوي إلى الميثان الحيوي 40

2-1-1: فصل ثاني أكسيد الكربون 41

2-1-2: فصل المكونات العضوية المتطايرة VOCs 43

2-1-3: فصل النيتروجين 44

2-1-4: فصل الأكسجين 44

2-2: خيارات الاستخدام النهائي للميثان الحيوي 44

2-2-1: حقن الميثان الحيوي في شبكات الغاز القائمة 46

2-2-2: تطبيقات الاستخدام في موقع الإنتاج (Onsite Applications) 47

2-2-3: نقل الميثان الحيوي عبر خط الأنابيب الافتراضي (Virtual Pipeline) 49

2-3: الاتجاهات الحالية للسوق العالمي للغازات الحيوية 50
2-3-1: إنتاج الغازات الحيوية 50
2-3-2: استهلاك الغاز الحيوي 53
2-4: الميثان الحيوي ومحطات إنتاجه عالمياً 54
2-4-1: تطور إنتاج الميثان الحيوي 54
2-4-2: الانتشار الجغرافي لمحطات إنتاج الميثان الحيوي 58
2-4-3: استخدامات الميثان الحيوي 63
الفصل الثالث: الجوانب البيئية والاقتصادية للغاز الحيوي وفرص الاستثمار في الدول العربية 67
3-1: الجوانب البيئية والاقتصادية لإنتاج الغاز الحيوي 68
3-1-1: الغاز الحيوي كوسيلة فعالة لإدارة النفايات 68
3-1-2: الغاز الحيوي كأداة للحد من انبعاثات الميثان ودعم المبادرات الدولية 70
3-1-3: الغاز الحيوي كمساهم في تقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري 73
3-1-4: الجانب الاقتصادي من الاستثمار في الغاز الحيوي 75
3-2: الأهداف والسياسات الدولية الداعمة للغاز الحيوي والميثان الحيوي 79
3-2-1: الحوافز والأهداف الداعمة للغاز الحيوي في أوروبا 79
3-2-2: الحوافز والأهداف الداعمة للغاز الحيوي في أمريكا الشمالية 80
3-2-3: الحوافز والأهداف الداعمة للغاز الحيوي في آسيا 82
3-2-4: الحوافز والأهداف الداعمة للغاز الحيوي في أمريكا الجنوبية 83
3-2-5: المقارنة بين مناطق العالم المختلفة 84
3-3: شركات الطاقة العالمية تدخل سباق الغاز الحيوي 85
3-3-1: الامتثال وتحقيق أهداف نزع الكربون 86
3-3-2: الاستفادة من الحوافز والدعم الحكومي 87
3-4: آفاق إنتاج الميثان الحيوي 90
3-5: الدول العربية والغاز الحيوي 92
3-5-1: المشاريع القائمة للغاز الحيوي في الدول العربية 92
3-5-2: مقومات ودوافع الاستثمار في مشاريع الغاز الحيوي والميثان الحيوي 97
الخاتمة والاستنتاجات 100
التوصيات والإجراءات المقترحة 105
المراجع 107

قائمة الأشكال

الشكل 1-1: مصادر المواد العضوية المستخدمة في إنتاج الغاز الحيوي 11

الشكل 1-2: طرق إنتاج الميثان الحيوي (Bio-Methane) 14

الشكل 1-3: مقارنة القيمة الحرارية (الدُنيا) للغازات الطبيعية والحيوية* 16

الشكل 1-4: أهمية عامل "القدرة على إنتاج الميثان" في منظومة مشروع الغاز الحيوي 17

الشكل 1-5: السلسلة الكاملة للغاز الحيوي من الإنتاج إلى الاستهلاك 19

الشكل 1-6: أمثلة من مخلفات البلدية الصلبة المستخدمة في إنتاج الغاز الحيوي 21

الشكل 1-7: وحدة توليد مشتركة للكهرباء والحرارة باستخدام الغاز الحيوي 23

الشكل 1-8: تسلسل عمليات إنتاج الغاز الحيوي داخل منشأة الهضم اللاهوائي للمادة العضوية 24

الشكل 1-9: مكونات جهاز الهضم 26

الشكل 1-10: مكونات محطة إنتاج الغاز الحيوي 31

الشكل 1-11: استخدام البقايا/ المخلفات المهضومة (Digestate) كسماد للأراضي الزراعية 33

الشكل 1-12: العوامل المؤثرة على عملية الهضم اللاهوائي للمادة العضوية 34

الشكل 1-13: تذبذب تحرر الغاز الحيوي لعدم انتظام تحميل المواد الداخلة إلى الهاضم 35

الشكل 1-14: أنواع البكتيريا والميكروبات التي تقوم بعملية الهضم اللاهوائي للمادة العضوية حسب درجة حرارة الوسط 36

الشكل 2-1: عمليات المعالجة المطلوبة لترقية الغاز الحيوي إلى الميثان الحيوي 41

الشكل 2-2: طرق توصيل الميثان الحيوي إلى تطبيقات الاستخدام النهائي 45

الشكل 2-3: وحدة لإعادة تعبئة المركبات بالغاز الحيوي المضغوط (Bio CNG) 47

الشكل 2-4: مخطط سير العمليات في محطة إسالة الغاز الحيوي 48

الشكل 2-5: مقطورة أنابيب (Tube Trailer) لنقل الميثان الحيوي 50

الشكل 2-6: تطور إنتاج الغاز الحيوي خلال الفترة 2000-2023 51

الشكل 2-7: أكبر منتجي الغاز الحيوي عالمياً عام 2023 53

الشكل 2-8: توزيع استهلاك الغاز الحيوي حسب الاستخدام 54

الشكل 2-9: نمو الإنتاج العالمي من الميثان الحيوي خلال الفترة 2010-2024 55

الشكل 2-10: مصادر إنتاج الميثان الحيوي في أوروبا حسب نوع المادة العضوية المستخدمة 56

الشكل 2-11: مصادر إنتاج الميثان الحيوي في الولايات المتحدة حسب نوع المادة العضوية المستخدمة 57

الشكل 2-12: توزيع إنتاج الميثان الحيوي عالمياً وفق المنطقة، عام 2024 58

الشكل 2-13: توزيع محطات إنتاج الميثان الحيوي بين مناطق العالم، مطلع عام 2025 59

الشكل 2-14: تطور محطات الميثان الحيوي في أوروبا خلال الفترة 2010-2024 61

الشكل 2-15: توزيع محطات الميثان الحيوي قيد التشغيل والإنشاء في أمريكا الشمالية مطلع عام 2026 62

الشكل 2-16: أبرز مؤشرات قطاع النقل العامل بالغاز في الولايات المتحدة 65
الشكل 2-17: أبرز مؤشرات قطاع النقل العامل بالغاز في أوروبا 66
الشكل 3-1: آفاق نمو النفايات البلدية الصلبة (MSW) في العالم 69
الشكل 3-2: تقديرات انبعاثات الميثان عالمياً وفق عدة مصادر وتاريخ الإصدار، والقطاعات الرئيسية المسببة لها... 71
الشكل 3-3: مصادر انبعاثات الميثان الناتجة عن النشاط البشري 72
الشكل 3-4: كثافة انبعاثات مصادر الوقود المختلفة في قطاع النقل 74
الشكل 3-5: توزيع هيكل التكاليف الرأسمالية لمشروع إنتاج الميثان الحيوي 76
الشكل 3-6: توزيع هيكل التكاليف لمشروع إنتاج الميثان الحيوي بين التكاليف الرأسمالية والتشغيلية والمخلفات العضوية 77
الشكل 3-7: دوافع قيام شركات الطاقة الكبرى بعمليات الاستحواذ على مشاريع الغاز الحيوي 86
الشكل 3-8: آفاق نمو إنتاج الميثان الحيوي وفق الأهداف المعلنة بحلول عام 2030 91
الشكل 3-9: أهداف إنتاج الميثان الحيوي في بعض الدول والتكتلات الدولية بحلول عام 2030، مقارنة بإنتاجها عام 2024 92
الشكل 3-10: المخطط العام لمشروع الروابي للغاز الحيوي في دولة الإمارات 94
الشكل 3-11: التوزيع الجغرافي لقدرات إنتاج الغاز الحيوي (متر مكعب لكل 100 كم مربع) عالمياً 98

قائمة الجداول

الجدول 1-1: مكونات الغاز الحيوي المنتج في مواقع مختارة 12
الجدول 2-1: عائد الميثان (Methane Yield) لأنواع مختارة من المادة العضوية المستخدمة عملية في الهضم اللاهوائي 18
الجدول 3-1: المعايير المستخدمة في تصنيف عملية الهضم اللاهوائي 27
الجدول 4-1: مقارنة بين أنواع أجهزة الهضم المختلفة 29
الجدول 5-1: مقارنة بين أنواع البكتيريا التي تقوم بعملية الهضم اللاهوائي للمادة العضوية 37
الجدول 1-2: مقارنة بين الطرق المستخدمة في فصل ثاني أكسيد الكربون من الغاز الحيوي 43
الجدول 2-2: اشتراطات مشغلي شبكات نقل الغاز لمواصفات الميثان الحيوي 46
الجدول 3-2: أكبر محطات إنتاج الميثان المسال الحيوي (Bio-LNG) من حيث الطاقة الإنتاجية 49
الجدول 4-2: توزيع محطات إنتاج الغاز الحيوي بين مناطق العالم والطاقة الإنتاجية، عام 2025 60
الجدول 1-3: أهداف إنتاج الميثان الحيوي الموضحة في الخطط الوطنية لدول الاتحاد الأوروبي 80
الجدول 2-3: مقارنة بين الحوافز والأهداف لإنتاج الغاز الحيوي في مناطق مختارة 85
الجدول 3-3: عمليات الاستحواذ والشراكة التي قامت بها شركات الطاقة العالمية خلال 2020-2025 88

الفصل الأول

مصادر الغاز الحيوي وتطبيقاته

1-1	حقائق أساسية عن الغاز الحيوي
2-1	السلسلة الكاملة للغاز الحيوي من الإنتاج إلى الاستهلاك
3-1	مكونات منشأة إنتاج الغاز الحيوي
4-1	العوامل المؤثرة على عملية الهضم اللاهوائي

مقدمة

يعد الغاز الحيوي أحد الأدوات المرنة القادرة على الجمع بين إدارة النفايات، وخفض الانبعاثات، وتوفير طاقة نظيفة منخفضة الكربون في آن واحد. فهو ينتج عن التحلل/الهضم اللاهوائي للمخلفات العضوية بمختلف أنواعها، وهي مواد أولية محلية متاحة بكثرة في معظم الدول. ويتسبب عدم معالجة هذه المخلفات في إطلاق غاز الميثان الذي يعد الأكثر تأثيراً على الاحتباس الحراري بعد ثاني أكسيد الكربون بسبب قدرته المرتفعة على حبس الحرارة (Global Warming Potential, GWP). ومع تزايد الاهتمام العالمي بخفض انبعاثات الميثان وتبني مبادرات للحد منه، برز إنتاج الغاز الحيوي كحل فعّال قادر على تحويل هذه الانبعاثات الضارة إلى طاقة مفيدة. وبذلك يساهم الغاز الحيوي في الحفاظ على البيئة، وتحقيق أهداف الحياد الكربوني التي تبنتها عدة دول.

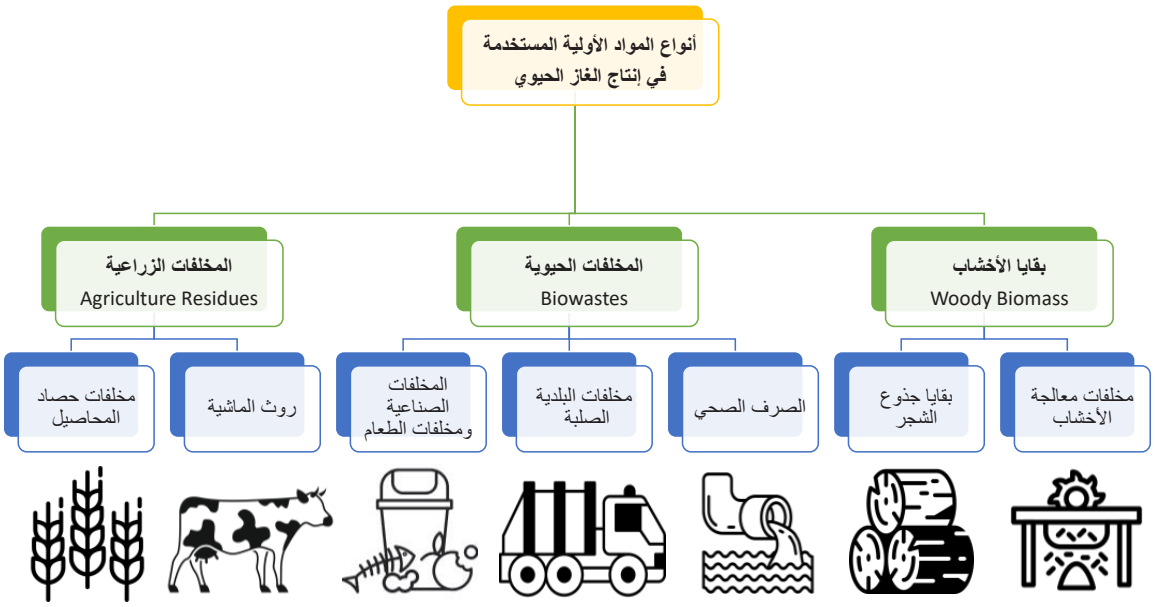
1-1: حقائق أساسية عن الغاز الحيوي

1-1-1: ما هو الغاز الحيوي؟

الغاز الحيوي هو مصدر طاقة يتكون بشكل أساسي من غاز الميثان وثاني أكسيد الكربون، بالإضافة إلى نسبة أقل من مركبات غازية أخرى. وينتج الغاز الحيوي من تحلل المخلفات العضوية عبر تهيئة الظروف اللازمة لتحللها بواسطة بكتيريا في وسط خال من الأكسجين، وهي العملية التي تعرف باسم عملية الهضم اللاهوائي (Anaerobic Digestion, AD) للمخلفات العضوية. وقد جاءت تسمية الغاز الحيوي في إشارة إلى طبيعة العملية البيولوجية التي تتغذى فيها البكتيريا على المادة العضوية وتؤدي بالنهاية إلى تحرره، وكذلك إلى المخلفات العضوية كونها متجددة.

تحدث عملية الهضم اللاهوائي في الطبيعة للمادة العضوية المترسبة أسفل البحيرات والمسطحات الصغيرة، وكذلك للنفايات العضوية السطحية عندما تتراكم فوق بعضها لفترة، مما يؤدي إلى خلق وسط خال من الهواء. ومع نمو النشاط البكتيري يبدأ تحلل المخلفات ويتحرر الغاز الحيوي. وقد تمت الاستفادة من هذا الظاهرة الطبيعية وتطبيقها صناعياً لإنتاج الغاز الحيوي، عبر تهيئة الظروف اللازمة لتحفيز النشاط البكتيري داخل أوعية مُحكمة الغلق تعرف باسم أجهزة الهضم أو الهواضم (Digesters). ويمكن الحصول على المخلفات العضوية المستخدمة في إنتاج الغاز الحيوي من عدة مصادر وأبرزها المخلفات الزراعية (سواء نباتية أو حيوانية) ومن أمثلتها مخلفات حصاد المحاصيل بأنواعها المختلفة والروث الحيواني (Manure). كما تعد المخلفات البلدية الصلبة (Municipal Solid Wastes, MSW) من المصادر الشائعة في إنتاج الغاز الحيوي، وتشمل بقايا الطعام من المنازل والمحلات التجارية، وبقايا القصاصات الورقية والكرتون، وحمأة الصرف الصحي (Sewage Sludge). أما المصدر الرئيسي الثالث فيضم المخلفات الناتجة عن العمليات الصناعية المختلفة مثل صناعة المشروبات والعصائر، والألبان، وحمأة مياه الصرف الصناعي كما هو مبين بالشكل 1-1.

الشكل 1-1: مصادر المواد العضوية المستخدمة في إنتاج الغاز الحيوي



المصدر: الباحث

يختلف تركيب الغاز الحيوي حسب نوع المخلفات العضوية التي استخدمت كمادة أولية في عملية إنتاجه، لكن في جميع الحالات يعد الميثان المكون الرئيسي له بنسبة قد تتراوح بين 45 و 70% [1]، وقد تصل النسبة في بعض الحالات إلى 75%. بينما يعد غاز ثاني أكسيد الكربون المكون الرئيسي الثاني بنسبة قد تتراوح من 30% إلى 49%، وبذلك يشكل الميثان وثاني أكسيد الكربون معاً أكثر من 90-95% من تركيب الغاز الحيوي. وعادة ما يحتوي الغاز الحيوي في صورته الخام (أي قبل معالجته) على غازات ومكونات أخرى، ولكن بنسب أقل مثل النيتروجين (N_2)، والأمونيا (NH_3)، وغاز كبريتيد الهيدروجين (H_2S). كما قد يحتوي على نسب ضئيلة من الهيدروجين، والأكسجين، وأول أكسيد الكربون (CO). وعادة يكون الغاز الحيوي مشبعاً ببخار الماء. يلخص الجدول 1-1، مكونات الغاز الحيوي المنتج من عدة محطات معالجة في مواقع مختارة.

الجدول 1-1: مكونات الغاز الحيوي المنتج في مواقع مختارة

المكون	باكستان	نيجيريا	أوروبا* (المدى)
الميثان CH_4	%64	%56.2	%69-49
ثاني أكسيد الكربون CO_2	%34	%39.51	%44-29
النيتروجين N_2	%1.05	0	%13-0.6
كبريتيد الهيدروجين H_2S	%0.05	%1.84	ضئيلة جداً (أجزاء في المليون)
أول أكسيد الكربون CO	%0.3	%1.91	-
الهيدروجين H_2	%0.6	0	-
الأكسجين O_2	0	0	%3-0.2
الإجمالي	100%	100%	%100

* بناءً على بيانات أكثر من 27 موقعاً أوروبياً تشمل ألمانيا، سويسرا، إيطاليا، فنلندا، هولندا، ليتوانيا، والمملكة المتحدة

المصدر: الباحث استناداً إلى بيانات الغاز الحيوي من مواقع مختلفة

يتأثر تركيب الغاز الحيوي بعدة عوامل أبرزها مصدر المادة العضوية المستخدمة في إنتاجه، حيث تكون نسبة غاز الميثان أعلى في مخلفات الطعام، وتقل في الروث الحيواني. كما تؤثر عوامل أخرى على تركيب الغاز الحيوي مثل ظروف تشغيل جهاز الهضم من ضغط وحرارة، ونسبة الرطوبة في المخلفات العضوية، وتصميم المفاعل المستخدم في العملية.

2-1-1: الميثان الحيوي (Bio-Methane) أو الغاز الطبيعي المتجدد

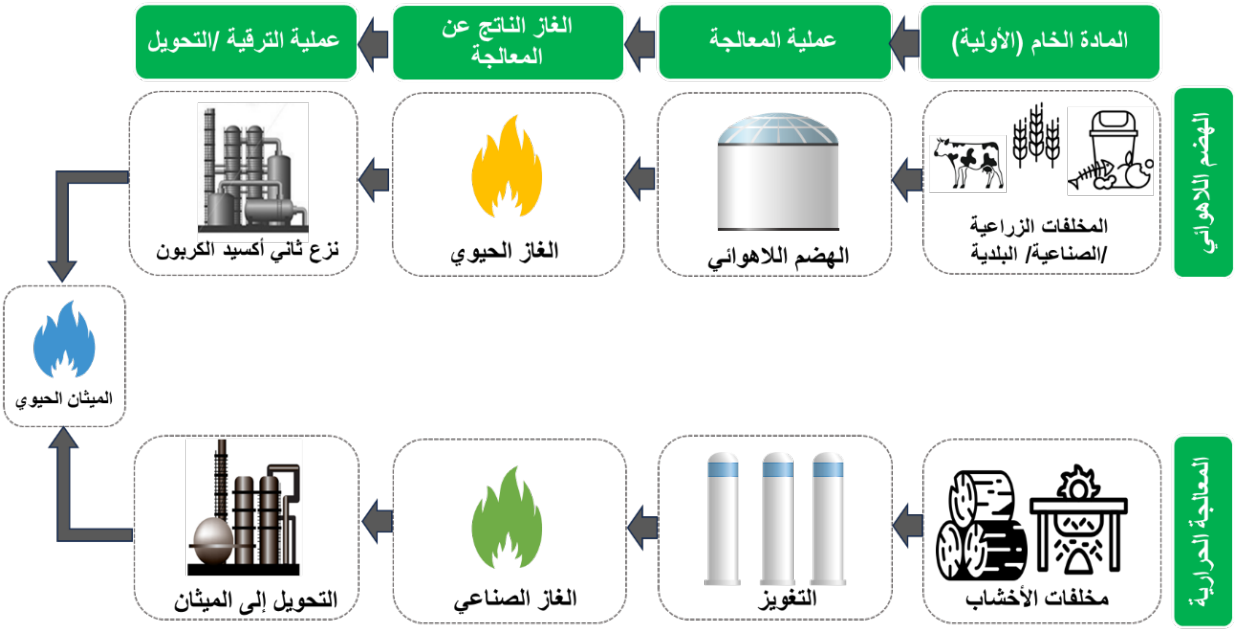
يجب عدم الخلط بين الغاز الحيوي والميثان الحيوي (Bio-Methane) حيث أن الأخير (الميثان الحيوي) يتكون بشكل أساسي من غاز الميثان بأكثر من 90-95% ويتشابه في مكوناته مع الغاز الطبيعي.

عملياً يتم الحصول على الميثان الحيوي عبر معالجة الغاز الحيوي نفسه وتنقيته من الشوائب الضارة وأبرزها غاز ثاني أكسيد الكربون، والمركبات الكبريتية مثل كبريتيد الهيدروجين، وهي العملية التي تعرف باسم الترقية (Upgrading). ويعود الهدف الرئيسي من هذه العملية إلى تحسين مواصفات الغاز الحيوي لجعله مطابقاً لمواصفات الاستخدام في التطبيقات النهائية مثل قطاع النقل، وقطاع الكهرباء، والقطاع الصناعي.

في سياق آخر، تختلف تسمية الميثان الحيوي من منطقة إلى أخرى، ففي أمريكا الشمالية يعرف باسم الغاز الطبيعي المتجدد (Renewable Natural Gas, RNG)، وفي الدانمارك يعرف باسم الغاز الأخضر (Green Gas). بينما يعرف في الصين باسم الغاز الطبيعي الحيوي (Bio Natural Gas). أما في الهند، فيعرف الميثان الحيوي باسم الغاز الطبيعي المضغوط الحيوي (Bio-CNG)، حيث ينحصر استخدام الغاز الحيوي بعد معالجته وضغطه كوقود في قطاع النقل.

لا ينحصـــر إنتاج الميثان الحيوي على ترقية الغاز الحيوي المنتج عبر الهضـــم اللاهوائي للمخلفات العضوية، بل هناك طرق أخرى تستخدم في إنتاجه بشكل مباشر. ومن أبرز تلك الطرق، المعالجة الحرارية للمخلفات والبقايا الناتجة عن عمليات معالجة الأخشـــاب (Wood Processing)، وكذلك معالجة بقايا ومخلفات جذوع الأشـــجار (Log Residues). حيث يتم خلال هذه العملية تغويز هذه المخلفات للحصول على الغاز الاصطناعي الحيوي (Bio-syngas) والذي يتكون من غاز أول أكسيد الكربون وغاز الهيدروجين ($CO+H_2$)، ثم يتم تحويل الغاز الاصطناعي لاحقاً إلى الميثان من خلال عملية تكوين الميثان أو الميثنة (Methanation) والتي تتم في وجود عامل حفاز مثل النيكل لتحفيز التفاعل[2]، كما هو موضـح بالشـكل 1-2. وبشـكل عام يمكن استخدام مصطلح الغازات الحيوية (Bio Gases) للتعبير عن كل من الغاز الحيوي في صـــورته الخام الناتج من عملية الهضـــم اللاهوائي، وكذلك الميثان الحيوي باعتبار أن منشأ كل منهما ذو أصل متجدد.

الشكل 1-2: طرق إنتاج الميثان الحيوي (Bio-Methane)



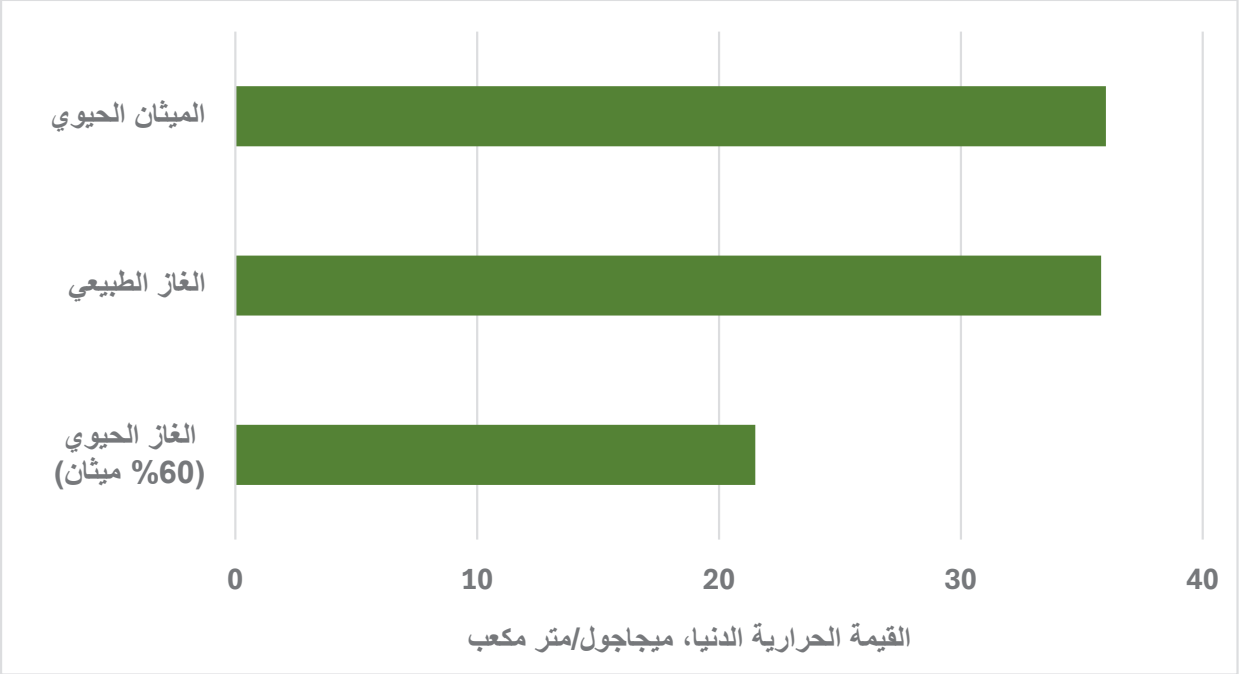
المصدر: الباحث

3-1-1: القيمة الحرارية للغاز الحيوي والميثان الحيوي

يتسم الغاز الحيوي بانخفاض قيمته الحرارية بشكل كبير إذا ما قورن بالغاز الطبيعي، ويعود ذلك إلى احتوائه على نسبة كبيرة من غاز ثاني أكسيد الكربون. ونظراً لأن نسبة الميثان في تركيب الغاز الحيوي ليست ثابتة (تتراوح بين 45% و75%)، حيث تختلف حسب نوع المواد الأولية المستخدمة وظروف التشغيل، فإن القيمة الحرارية الدنيا (Lower Heating Value, LHV) قد تتراوح بين 16 ميجا جول لكل متر مكعب كحد أدنى، وحتى 28 ميجاجول لكل متر مكعب كحد أقصى [3]. وعلى سبيل المثال، إذا كانت نسبة الميثان حوالي 60%، فإن القيمة الحرارية للغاز الحيوي الجاف (بعد تجفيفه من بخار الماء) ستصل إلى 21.5 ميجا جول/متر مكعب. ونظراً لتدني القيمة الحرارية للغاز الحيوي، فإن تطبيقات استخدامه في صورته الخام تعد محدودة، حيث تقتصر على استخدامه كوقود للطهي أو التسخين في المناطق الريفية أو النائية. ولذلك تعد عملية ترقية الغاز الحيوي إلى ميثان حيوي أمراً ضرورياً لتوسيع نطاق استخدامه. فبعد عملية الترقية، ترتفع القيمة الحرارية إلى 36 ميجا جول/متر مكعب. وعلى سبيل المقارنة، فإن القيمة الحرارية للغاز الطبيعي القابل للاستخدام في شبكات نقل وتوزيع الغاز، تصل قيمته الحرارية إلى 35.8 ميجا جول/متر مكعب في الظروف العادية. ومن ثم يصبح الميثان الحيوي صالحاً للاستخدام في نفس التطبيقات التي يستخدم فيها الغاز الطبيعي مثل توليد الكهرباء والتوليد المشترك للكهرباء والحرارة أو كوقود للنقل أو كمادة خام للقطاع الصناعي.

يوضح الشكل 1-3، مقارنة بين القيم الحرارية الدُنيا للغاز الحيوي والميثان الحيوي، والغاز الطبيعي.

الشكل 1-3: مقارنة القيمة الحرارية (الدُنيا) للغازات الطبيعية والحيوية*



*الغازات الحيوية تشمل الغاز الحيوي والميثان الحيوي، أما الغازات الطبيعية فتشمل الغاز الطبيعي سواء مصاحب أو غير مصاحب للنفط الخام

المصدر: الباحث

1-1-4: القدرة على إنتاج الميثان

تُعد القدرة على إنتاج الميثان (Methane Potential) من العناصر الأساسية عند تقييم وتنفيذ مشاريع إنتاج الغاز الحيوي. وتعرف بأنها أقصى كمية من غاز الميثان يمكن توليدها من كتلة محددة من المادة العضوية خلال عملية الهضم اللاهوائي بواسطة البكتيريا. وهي تعد مؤشراً حاسماً في دراسة الجدوى الاقتصادية، وتقدير العائد المتوقع من المشروع. كما تُعد عاملاً مهماً في مرحلة التصميم الهندسي الأولي لتحديد الحجم الأمثل لأجهزة الهضم اللاهوائي، وسعة تخزين الغاز، وزمن الاحتجاز المناسب لهضم المادة العضوية.

إضافة إلى ذلك، تتدخل القدرة على إنتاج الميثان في نسب خلط المواد العضوية الملائمة لعمليات الهضم المشترك (Co-digestion)، عند خلط مخلفات من مصادر

مختلفة لتعظيم الإنتاجية. يوضح الشكل 1-4 أهمية القدرة على إنتاج الميثان في مشروع الغاز الحيوي.

الشكل 1-4: أهمية عامل "القدرة على إنتاج الميثان" في منظومة مشروع الغاز الحيوي

المصدر: الباحث

يمكن تحديد قيم القدرة على إنتاج الميثان للمواد العضوية عبر التجارب المختبرية ضمن ظروف قياسية محددة، إلا أنها تعبر عن أقصى كمية نظرية يمكن إنتاجها من الميثان. ونظراً لأن ظروف التشغيل الميدانية تختلف عن الظروف المختبرية، فعادة ما تعطي "القدرة على إنتاج الميثان" قيم أعلى بكثير من عائد الميثان (Methane Yield) الذي يتم إنتاجه فعلياً في جهاز الهضم في منشأة الغاز الحيوي. ولذلك يعد عائد الميثان المقياس الأكثر واقعية في تحديد كمية الميثان التي يمكن إنتاجها (متر مكعب) لوحدة الكتلة من المخلفات العضوية (طن)، التي تخضع لعملية الهضم اللاهوائي في ظروف التشغيل الميدانية.

تتفاوت قيمة عائد الميثان حسب مصدر المخلفات العضوية، كما تتأثر قيمتها بشكل سلبي كلما زادت نسبة الرطوبة (الماء) في المخلفات وبالأخص في الروث الحيواني كونها ليست ذات قيمة حرارية. وكما هو مبين بالجدول 1-2، فإن الروث الحيواني ذو عائد ميثان منخفض عموماً بسبب احتوائه على نسبة كبيرة من المياه التي قد تصل إلى 80-90%، بينما ترتفع قيمة عائد الميثان لمخلفات القطاع الصناعي والتي قد تصل إلى 580-1,000 متر مكعب لكل طن من مخلفات الجليسرين الخام، بينما تتراوح في حالة حمأة الصرف الصحي بين 50 و80 متر مكعب غاز لكل طن.

كما أن تهيئة الظروف التشغيلية المثالية تساهم في تحسين كفاءة عملية الهضم اللاهوائي، ومن ثم زيادة عائد الميثان.

الجدول 1-2: عائد الميثان (Methane Yield) لأنواع مختارة من المادة العضوية المستخدمة عملية في الهضم اللاهوائي

(متر مكعب لكل طن)

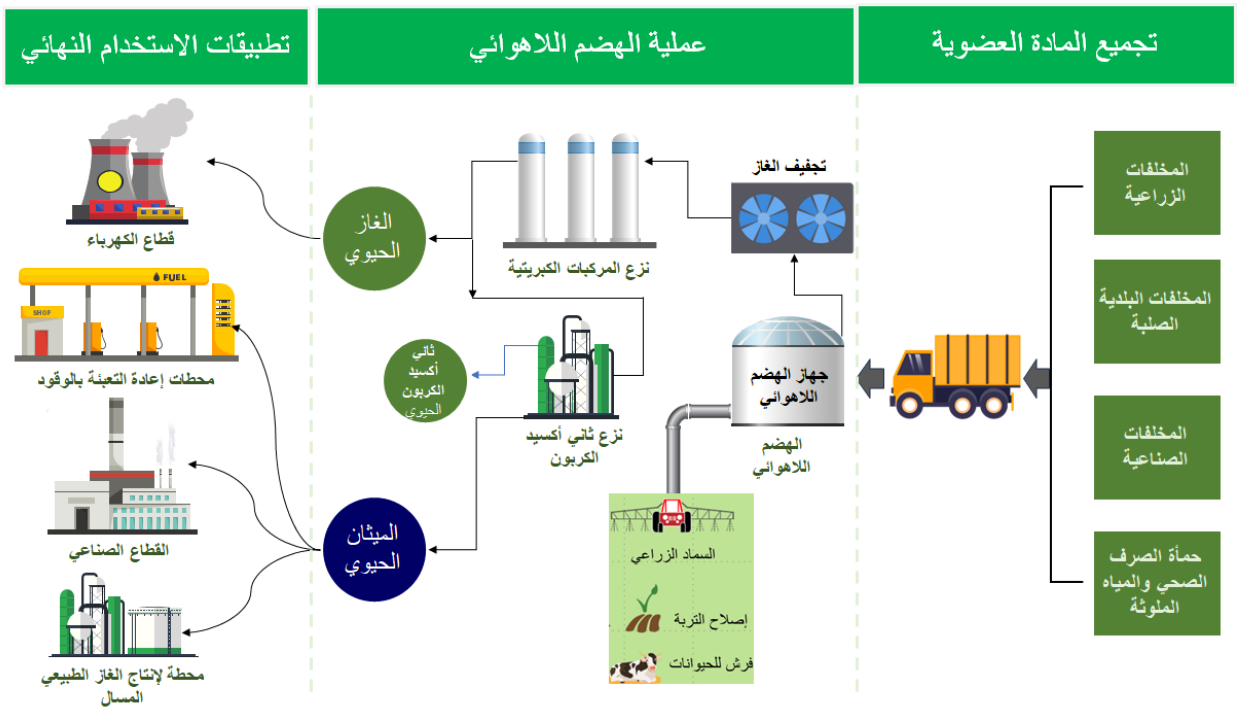
الفئة	المادة العضوية	أقل عائد (متر مكعب لكل طن)	أعلى عائد (متر مكعب لكل طن)
المخلفات الزراعية والحيوانية	روث الأبقار (10% وزن المادة الصلبة)	15	25
	روث الدواجن (20% وزن المادة الصلبة)	30	100
	القش	242	324
	القمح الكامل	185	200
الحمأة ومخلفات الصرف الصحي	حمأة الصرف الصحي	50	80
مخلفات البلدية	النفايات الغذائية (Food waste)	80	200
المخلفات الصناعية	مخلفات الصناعات الغذائية	100	180
	الجليسرين الخام (80% وزن المادة الجافة)	580	1000
	الدهون (Fats)	حتى 1,200	

المصدر: بيانات مجمعة من عدة مصادر [4, 5, 6]

1-2: السلسلة الكاملة للغاز الحيوي من الإنتاج إلى الاستهلاك

تضم سلسلة إنتاج الغاز الحيوي مجموعة من العمليات تبدأ بتجميع المخلفات العضوية ثم تحللها إلى غاز حيوي ثم معالجته لجعله صالحاً للاستخدام في التطبيقات النهائية. ولتبسيط السلسلة، يمكن تقسيم هذه العمليات إلى ثلاث مراحل متتالية كما هو موضح بالشكل 1-5.

الشكل 1-5: السلسلة الكاملة للغاز الحيوي من الإنتاج إلى الاستهلاك



المصدر: الباحث

- المرحلة الأولى: تجميع المادة العضوية (المادة الخام)

تبدأ السلسلة بتجميع المخلفات العضوية من مصادرها المختلفة بهدف توفير المادة الخام التي ستقوم بتغذية منشأة إنتاج الغاز الحيوي، التي تعد قلب سلسلة القيمة. وقد تكون المخلفات العضوية زراعية المنشأ مثل مخلفات المحاصيل أو الروث الحيواني، وهي الأكثر شيوعاً في الاستخدام عالمياً[7]. وهذا النوع من المخلفات متوافر بكثرة في الدول ذات الإنتاج الزراعي والحيواني. كما أن استغلال المخلفات الزراعية

في منشأة الغاز الحيوي ينتج عنها سماد عضوي ذو جودة عالية كمنتج ثانوي، الأمر الذي يحسن من اقتصاديات المشروع. كما تعد المخلفات الصناعية وبالأخص الناتجة من الصناعات الغذائية، من المخلفات التي يفضلها مشغلو محطات إنتاج الغاز الحيوي، نظراً لما تتسم به من عائد مرتفع للميثان، ومن ثم تساهم في تحسين العائد الاقتصادي من المشروع. فعائد الميثان من المخلفات من صناعة الزيوت النباتية يصل إلى 154 وحتى 400 متر مكعب لكل طن. أما للمخلفات الناتجة عن صناعة الدهون، فقد يصل عائد الميثان إلى 1,200 متر مكعب لكل طن. لذلك، يقوم مشغلو محطات الغاز الحيوي بدفع رسوم إلى البلدية أو السلطات المحلية نظير الحصول على المخلفات الصناعية نظراً لقيمتها العالية. وهذا النموذج التجاري مطبق على نطاق واسع في الدول الأوروبية.

وفي بعض الحالات التي تكون فيها الكميات المتوفرة من نوع واحد من المخلفات محدودة وغير مجدية اقتصادياً، يمكن خلط المخلفات الزراعية والصناعية لضمان تغذية محطة الغاز الحيوي بكميات مناسبة لتحسين الإنتاجية، وتسمى هذه العملية بالهضم المشترك Co-Digestion. حيث يتم احتساب قيمة عائد الميثان لكل نوع من المخلفات لتحديد نسبة الخلط المجدية اقتصادياً، مع ضمان التغذية المستمرة لمحطة الإنتاج.

كما تعد مخلفات البلدية الصلبة (MSW) من المصادر الهامة في صناعة الغاز الحيوي، وهي تشمل كافة المخلفات التي تقوم بتجميعها من القطاع السكني والمنشآت التجارية ومن بينها مخلفات وبقايا الطعام والكرتون والأوراق، كما هو موضح بالشكل 6-1. ومن الأفضل أن يتم فرزها مسبقاً لتحديد البقايا العضوية (Bio-Waste)، قبل تغذية محطة الغاز الحيوي.

الشكل 1-6: أمثلة من مخلفات البلدية الصلبة المستخدمة في إنتاج الغاز الحيوي

مخلفات وبقايا الطعام　　بقايا الورق والكرتون

المصدر: University of California [8]

- **المرحلة الثانية: إنتاج ومعالجة الغاز الحيوي**

تعد منشأة إنتاج ومعالجة الغاز الحيوي، أهم جزء في سلسلة القيمة للغاز الحيوي، وفيها تتم عملية الهضم اللاهوائي لتفتيت المادة العضوية الموجودة في المخلفات إلى غاز حيوي. وتعتمد هذه العملية بشكل أساسي على نشاط الكائنات الحية الدقيقة (البكتيريا) التي تتغذى على المادة العضوية لتطلق الغاز الحيوي عبر سلسلة من العمليات البيولوجية. كما ينتج عن هذه العملية البقايا المهضومة (Digestate) وهي منتج ثانوي ذو قيمة عالية لأنه بمثابة سماد طبيعي غني بالكربون العضوي والعناصر الغذائية الأخرى، ويمكن استخدامها مباشرة في تخصيب التربة الزراعية. كما تضم منشأة الغاز الحيوي عمليات معالجة أولية لإزالة الشوائب الضارة، وعلى رأسها كبريتيد الهيدروجين (H_2S)، والذي يتسبب وجوده في تلف المعدات وتقليص عمرها التشغيلي نتيجة التآكل. ويُشترط عادةً خفض تركيز كبريتيد الهيدروجين إلى مستويات لا تتجاوز 5 جزء في المليون (ppm) .

- **المرحلة الثالثة: مرحلة الاستهلاك**

يتم في المرحلة الثالثة استخدام الغاز الحيوي بعد معالجته. ومن الناحية النظرية، يمكن استخدام الغاز الحيوي في معظم التطبيقات المصمّمة للعمل بالغاز الطبيعي، إلا أن ارتفاع محتوى ثاني أكسيد الكربون في الغاز الحيوي يجعله غير مطابق للمواصفات القياسية المطلوبة لاستخدامه كوقود للنقل أو للحقن مباشرة في شبكات نقل الغاز الطبيعي دون إجراء عمليات ترقية إضافية. لذلك، يكون الغاز الحيوي أكثر ملاءمة للاستخدام في التطبيقات الثابتة في نفس موقع محطة الإنتاج. وتُعد الغلايات (Boilers) من أبرز هذه التطبيقات، حيث يمكن استخدام الغاز الحيوي فيها مباشرة حيث لا تحتاج إلى ضغوط تشغيل مرتفعة أو مستويات عالية من جودة الغاز، مقارنة بتطبيقات أخرى.

كما يمكن استخدام الغاز الحيوي في محطات التوليد المشترك للكهرباء والحرارة (Combined Heat and Power, CHP) وذلك عبر حرق الغاز لتوليد طاقة ميكانيكية وتحويلها إلى طاقة كهربائية، وطاقة حرارية. وعادة تتواجد هذه الوحدات كجزء مكمل في محطة الغاز الحيوي، حيث تستخدم الكهرباء المولدة لتشغيل المعدات، بينما تستغل الحرارة المولدة في تسخين جهاز الهضم اللاهوائي. وتصل كفاءة توليد الكهرباء إلى 40%، ووصلت في بعض الوحدات الحديثة إلى 43%[9]. بينما تصل كفاءة توليد الحرارة إلى نحو 50%. وبذلك تصل الكفاءة الكلية والتي تعبر عن مجموع الكفاءة الحرارية والكهربائية لمحطة التوليد المشترك إلى أكثر من 90% من القيمة الحرارية للغاز الحيوي.

وفي غالبية المواقع، يتم ربط الكهرباء المولدة من محطات التوليد المشترك بشبكة الكهرباء المحلية، بما يسمح بتصدير الفائض في الإنتاج إلى السوق المحلي، أو السحب من الشبكة إذا حدثت اضطرابات في عملية توليد الكهرباء اللازمة لمحطة

الغاز الحيوي. يبين الشكل 1-7، تغذية وحدة توليد مشتركة للكهرباء والحرارة داخل محطة للغاز الحيوي.

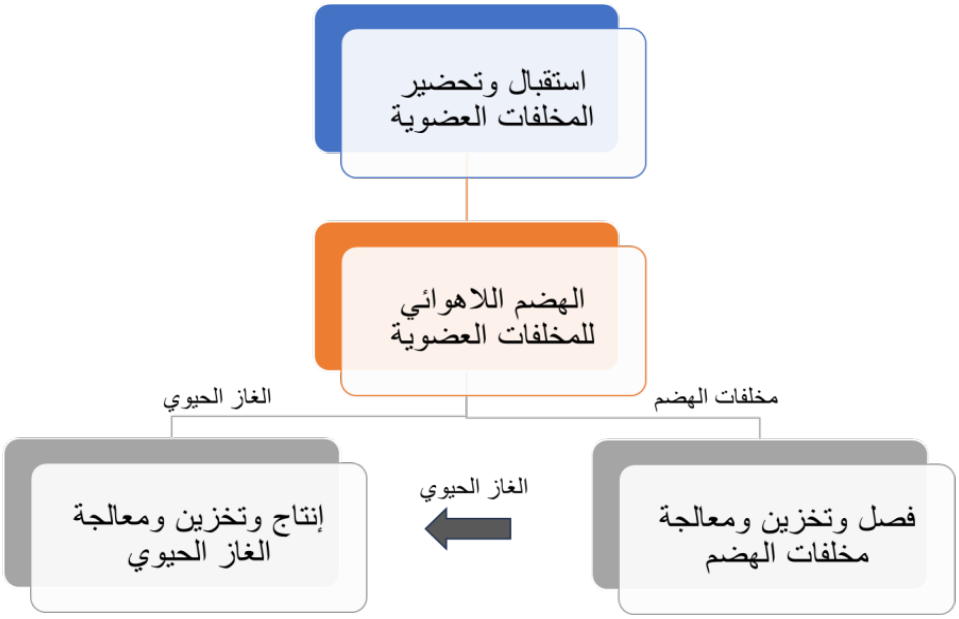
الشكل 1-7: وحدة توليد مشتركة للكهرباء والحرارة باستخدام الغاز الحيوي

المصدر: Clarke Energy [10]

1-3: سير العمليات داخل منشأة إنتاج الغاز الحيوي

تضم محطة الغاز الحيوي مجموعة من العمليات المتتالية التي تهدف إلى استمرار تزويد المادة العضوية إلى جهاز الهضم اللاهوائي بغية توليد الغاز الحيوي بطريقة مستقرة، على النحو المبين بالشكل 1-8. ويعمل مشغلو هذا النوع من المحطات على توفير الشروط المناسبة في جهاز الهضم اللاهوائي لتحفيز النشاط البكتيري اللازم لهضم المادة العضوية، مع تجنب حدوث أية توقفات في عملية التشغيل.

الشكل 1-8: تسلسل عمليات إنتاج الغاز الحيوي داخل منشأة الهضم اللاهوائي للمادة العضوية



1-3-1: عملية استقبال وتحضير المخلفات العضوية

يتم تجميع المخلفات العضوية من مصادرها المختلفة في منطقة استقبال (Reception Area) داخل المحطة. وعادة تترك عدة ساعات قبل إجراء التهيئة الأولية لها، والتي من خلالها يتم عمل غسيل للمخلفات العضوية ومزجها بالماء. كما يتم في هذه المرحلة فصل المكونات الضارة مثل النفايات البلاستيكية كالأكياس أو البقايا المعدنية أو الزجاج وبقايا المواد الصلبة، والتي يؤدي تواجدها إلى تلف المعدات الدوارة مثل الضواغط والمضخات وأجهزة الخلط. كما أن عدم إزالتها سيؤدي إلى تراكمها داخل جهاز الهضم اللاهوائي بمرور الوقت، وهو الأمر الذي سيقلل من الحيز المستخدم في عملية الهضم، ومن ثم تخفيض إنتاج الغاز الحيوي. وبعد أن يتم تجهيز المادة العضوية في صورة خليط من المواد الصلبة والسائلة، يتم ضخها إلى المرحلة التالية الخاصة بعملية الهضم اللاهوائي.

1-3-2: عملية الهضم اللاهوائي (Anaerobic Digestion)

تتم عملية الهضم اللاهوائي داخل جهاز الهضم (الهاضم) في وسط خال من الأكسجين. حيث يتم ضخ المادة العضوية - بعد معالجتها وتجهيزها مسبقاً- في صورة خليط من المواد الصلبة والسائلة إلى داخل الجهاز عبر خط أنابيب مخصص لذلك. ومع ضبط ظروف التشغيل المناسبة من الحرارة المناسبة، وتوفير وقت الاحتجاز (البقاء) داخل الجهاز، تبدأ البكتيريا والميكروبات الموجودة طبيعياً داخل المادة العضوية في النمو والتكاثر ومن ثم تتغذى على المادة العضوية. حيث تبدأ البكتيريا في تكسير المادة العضوية التي تتكون أساساً من سلاسل طويلة من الكربون والهيدروجين، لتبدأ سلسلة من العمليات البيولوجية ينتج عنها أحماض، وتخميرها على مراحل لتنتهي في النهاية بتكوين وإنتاج الغاز الحيوي. ويتم تخزين وتجميع الغاز الحيوي المتحرر من العملية في القسم العلوي من جهاز الهضم (كما هو مبين بالشكل 1-9)، تمهيداً لمعالجته حتى يصبح صالحاً للاستخدام.

ولتحسين عملية الهضم ومساعدة البكتيريا على النمو والتكاثر، يتم تسخين جهاز الهضم في بعض المحطات من خلال منظومة حرارية للحفاظ على الوسط ضمن مستويات الحرارة المطلوبة والتي قد تصل في بعض الحالات إلى أكثر من 60 درجة مئوية. ولتقليل فقد الحرارة، يتم تغليف جهاز الهاضم باستخدام مادة عازلة. كما يتبقى بعد انتهاء عملية الهضم، مخلفات الهضم (Digestate) أو ما يعرف باسم السماد الطبيعي والذي يتم سحبه من جهاز الهضم واستخدامه كسماد زراعي.

الشكل 1-9: مكونات جهاز الهضم

المصدر: LIPP magazine

تتم عملية الهضم اللاهوائي للمادة العضوية عند ظروف ومعايير تشغيلية متنوعة، والتي على أساسها يمكن تقسيمها إلى عدة أنواع حسب المعيار المستخدم. فمثلاً إذا كان إجمالي المواد الصلبة (Total Solids, TS)[1] في مزيج المواد الداخلة إلى الجهاز أعلى من 10% (أي 10% مواد صلبة، و90% مواد سائلة)، فتصنف عملية الهضم اللاهوائي على أنها عملية هضم جافة (Dry Digestion). أما إذا قلت نسبة المواد الصلبة عن 10%، فتصنف العملية على أنها عملية هضم رطبة (Wet Digestion).

كما يمكن تصنيف العملية على أساس استمرارية سريان المواد الداخلة التي قد تكون متقطعة (Intermittent)، أو مستمرة (Continuous)، أو شبه مستمرة (Quasi-Continuous). كما تلعب درجة الحرارة دوراً هاماً في نمو وازدهار النشاط البكتيري، وبحسب نطاق درجة الحرارة التي يعمل عندها جهاز الهضم

[1] يشار أيضاً إلى إجمالي المواد الصلبة بالمادة الجافة (Dry matter)

اللاهوائي، يمكن تصنيف العملية إلى ثلاثة أنواع وهي Psychrophilic في إشارة إلى اسم البكتيريا التي تنشط عند درجات الحرارة المنخفضة، و Mesophilic في إشارة إلى البكتيريا التي تنشط في درجات الحرارة المتوسطة، و Thermophilic في إشارة إلى البكتيريا التي تنشط عند درجات الحرارة المرتفعة.

يلخص الجدول 1-3، المعايير المستخدمة في تصنيف عملية الهضم اللاهوائي حسب تكوين المواد الداخلة، وطبيعة السريان، ونطاق حرارة التشغيل، وكذلك عدد مراحل العملية.

الجدول 1-3: المعايير المستخدمة في تصنيف عملية الهضم اللاهوائي

المعيار	تصنيف العملية	المعيار
تركيب المواد الداخلة	جافة (Dry)	نسبة المادة الجافة (إجمالي المواد الصلبة) أعلى من 10%
	رطبة (Wet)	نسبة المادة الجافة (إجمالي المواد الصلبة) أقل من 10%
طبيعة سريان المواد الداخلة	مستمرة (Continuous)	تغذية مستمرة لجهاز الهضم اللاهوائي على مدار اليوم
	متقطعة (Intermittent)	تغذية جهاز الهضم اللاهوائي بالكامل والانتظار حتى انتهاء العملية
نطاق حرارة التشغيل	Psychrophilic	أقل من 20 درجة مئوية
	Mesophilic	30 - 40 درجة مئوية
	Thermophilic	50 - 65 درجة مئوية
عدد أطوار العملية (Process Phases)	Single-phase	جميع العمليات الحيوية تتم في مرحلة واحدة
	Two-phase	تتم العمليات الحيوية على مرحلتين

المصدر: الباحث استناداً إلى Biogas Portal Info[11]

تتوافر عالمياً عدة أنواع تجارية من أجهزة الهضـــم، والتي تلائم أنواع مختلفة من المواد العضوية وظروف التشغيل المتنوعة، ويمكن تقسيمها حسب الشكل الهندسي والتصميم إلى خمسة أنواع هي:

1) جهاز الهضم ذو القبة الثابتة (Fixed-Dome Digester)
2) جهاز الهضم ذو القبة العائمة (Floating-Dom Digester)
3) المفاعل الصهريجي مع التقليب المستمر (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR)
4) جهاز الهضم الأنبوبي (Plug Flow Digester)
5) جهاز الهضم ذو الحمأة اللاهوائية الصاعدة (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Digester, UASB)

تعد أجهزة الهضم ذات القبة الثابتة والعائمة من أقدم تقنيات الهضم اللاهوائي وأكثرها بساطة في التصميم والشكل الهندسي، وقد أثبتت فعاليتها في المشاريع الريفية والمزارع الصغيرة. لكنها لا تعد خياراً ملائماً للمشاريع التجارية أو للهضم المشترك بسبب صعوبة التحكم في التشغيل.

أما الأنواع الأخرى فتناسب المشاريع التجارية ذات الطاقات التصميمية الكبيرة، وتصلح بشكل فعال للهضم المشترك القائم على استخدام أكثر من نوع من المخلفات. ومن أكثرها شيوعاً في الاستخدام المفاعل الصهريجي ذو التقليب المستمر (CSTR)، وهو خزان أسطواني الشكل، وله سقف غشائي مرن يستخدم لتخزين الغاز الحيوي المتحرر من عملية الهضم. ويعتمد هذا النوع على التغذية بشكل مستمر بخليط من عدة مخلفات مثل الروث الحيواني، والمخلفات الزراعية، ومخلفات الصناعات الغذائية مع التقليب، لذلك يعد مثالاً عملياً على نجاح تقنية الهضم المشترك المطبقة بشكل كبير في الأسواق الأوروبية. كما يوجد جهاز الهضم ذو الحمأة الصاعدة، وهو أسطواني الشكل ويصلح لمعالجة حمأة مياه الصرف الصحي والصرف الصناعي.

يلخص الجدول 1-4، أبرز نقاط المقارنة بين الأنواع الخمسة لأجهزة الهضم ومجال تطبيق كل منها.

الجدول 1-4: مقارنة بين أنواع أجهزة الهضم المختلفة

بند المقارنة	جهاز الهضم ذو القبة الثابتة Fixed-Dome Digester	جهاز الهضم ذو القبة العائمة Floating-Dom Digester	المفاعل الصهريجي ذو التقليب المستمر CSTR	جهاز الهضم الأنبوبي Plug Flow Digester	جهاز الهضم ذو الحمأة الصاعدة USAB
الشكل الهندسي	خزان خرساني تحت الأرض بقبة ثابتة	خزان مع قبة معدنية متحركة	خزان أسطواني مزود بسقف غشائي مرن مع خلاطات	شكل أسطواني أفقي	شكل أسطواني رأسي
أبرز المزايا	العمر التشغيلي أطول لا يضم آلات دوارة تكاليف رأسمالية صغيرة	ضغط الغاز ثابت	-كفاءة خلط عالية -يصلح للمشاريع التجارية الكبرى	-لا يحتاج إلى متطلبات طاقة مرتفعة -يعمل عند درجات حرارة مرتفعة	-تكاليف رأسمالية متوسطة -عملية غير ميكانيكية للخلط
طريقة العمل	ضخ المادة العضوية إلى داخل الجهاز بشكل شبه مستمر أو متقطع	ضخ المادة العضوية إلى داخل الجهاز مع تحرك القبة للحفاظ على الضغط	تغذيته بشكل مستمر بخليط من الروث الحيواني والمخلفات الزراعية ومخلفات الصناعات الغذائية	يعتمد على التغذية المستمرة وألا تقل المادة الصلبة عن 20-40%	ضخ المادة العضوية من أسفل إلى أعلى مع إمكانية العمل المستمر بشرط عدم ارتفاع نسبة المادة الصلبة عن 10%
أنواع المخلفات	مناسب لغالبية أنواع المخلفات العضوية، ولكن لا يصلح للهضم المشترك	مناسب لغالبية أنواع المخلفات العضوية، ولكن لا يصلح للهضم المشترك	مناسب لعمليات الهضم المشترك	مناسب لنوع واحد من المخلفات	مناسب لمخلفات مياه الصرف الصناعي أو البلدية
الشكل على الطبيعة					

المصدر: من إعداد الباحث

للحصول على معدلات إنتاج مرتفعة من الغاز الحيوي في منطقة معينة لتحقيق الجدوى الاقتصادية من الاستثمار، بدأ مفهوم محطات الهضم اللاهوائي المركزية (Centralized Anaerobic Digestion, CAD)[12] في الانتشار عالمياً، وهو يعتمد على بناء محطة مركزية كبيرة للهضم اللاهوائي، لتكون بمثابة نقطة تجميع تصل إليها المخلفات من عدة قطاعات أو مواقع. وقد كانت الدانمارك أول من قام بتنفيذ محطة

مركزية ويعود ذلك إلى عام 2002، وقد بات لديها اليوم 20 محطة مركزية قيد التشغيل. وقد اتبعت السويد نفس المسار بعد الدنمارك، ثم بدأ انتشار المحطات المركزية في عدة أسواق أوروبية وآسيوية.

1-3-3: استرجاع ومعالجة الغاز الحيوي

يعد استرجاع الغاز الحيوي الهدف الرئيسي من عملية الهضم اللاهوائي للمخلفات العضوية، فمن خلال بيعه أو استخدامه في توليد الكهرباء يحصل المالك للمشروع على العائد الاقتصادي. كما أنه يساهم في توفير الطاقة الكهربائية والحرارية اللازمة لمتطلبات التشغيل سواء في جهاز الهضم أو لباقي المرافق والآلات الدوارة المتواجدة داخل المحطة.

يتم تخزين الغاز الحيوي المنتج من عملية الهضم اللاهوائي في قبة أعلى الصهريج والتي تتكون من غشاء مرن (Membrane). ومن متطلبات التشغيل الآمن أن يتم سحب الغاز بشكل مستمر لمنع ارتفاع الضغط وحدوث تلف للغشاء، وعادة ما يعمل نظام تخزين الغاز الحيوي في ضغوط منخفضة جدا (أقل من 1 بار).

عملياً، لا تعتمد محطات الغاز الحيوي على استخدام صهريج واحد لإتمام عملية الهضم اللاهوائي، بل تقوم على منظومة متكاملة تضم صهاريج للتحضير، وصهاريج خاصة بالهضم، وأخرى لتخزين المواد الناتجة (الغاز الحيوي، ومخلفات الهضم). حيث تساهم تلك المنظومة المتكاملة في تحقيق استقرار أعلى لعمليات الهضم وتكاثر البكتيريا، وبالتالي تحسين إنتاجية الغاز الحيوي، وتحقيق الاستغلال الأمثل لمخلفات الهضم كسماد.

نظراً لأن الغاز الحيوي الناتج مباشرة من عملية الهضم اللاهوائي يحتوي على مكونات ضارة مثل المواد الكبريتية، علاوة على تشبعه ببخار الماء (بنسبة 100%)، فمن الضروري معالجته أولاً قبل استخدامه كمصدر للطاقة. ويتم ذلك من خلال وحدة للمعالجة الأولية، والتي توضع بعد صهريج التخزين، لتقوم بتجفيف الغاز للتخلص من بخار ماء، وكذلك نزع كبريتيد الهيدروجين. وللتأكد من مواصفات الغاز بعد عملية التنقية، يتم أخذ عينة من الغاز بعد وحدة المعالجة الأولية. وبانتهاء المعالجة، يصبح الغاز الحيوي صالحاً للاستخدام، وتحتوي غالباً محطة الغاز الحيوي على وحدات التوليد المشترك للكهرباء والحرارة، والتي يُحرق فيها الغاز لتوليد الكهرباء والحرارة، كما هو مبين بالشكل 1-10.

الشكل 1-10: مكونات محطة إنتاج الغاز الحيوي

1 منطقة الاستقبال وتجميع المخلفات العضوية
2 نقطة التغذية
3 خزان خلط المواد الداخلة
4 خزانات الهضم اللاهوائي
5 خزان تخزين الغاز الحيوي ومخلفات الهضم
6 وحدة معالجة وتنقية الغاز الحيوي
7 وحدة التوليد المشترك للكهرباء والحرارة
8 محول كهربائي

المصدر: معدل عن Dynamic Biogas [13]

1-3-4: فصل وتخزين ومعالجة البقايا المهضومة

تعد البقايا/المخلفات المهضومة (Digestate) مادة غنية بالعناصر الغذائية، وهي عبارة عن خليط من المكونات الصلبة والسائلة، ويمكن استخدامها بشكل مباشر كسماد طبيعي. وهي تتكون من المادة العضوية المتبقية التي لم تتحلل في جهاز الهضم، والميكروبات الدقيقة الميتة، بالإضافة إلى بعض العناصر غير العضوية. وتشكل مخلفات الهضم نحو 90-95% من حجم المواد الداخلة إلى جهاز الهضم، ومن الضروري معالجتها بشكل سليم لضمان التشغيل الأمثل لمحطة الغاز الحيوي. وتُظهر نتائج بعض الدراسات أن نسبة النيتروجين في المخلفات العضوية تتراوح بين 21 و39%، مما يؤكد على خاصية التسميد للمخلفات العضوية [14]. كما أنها غنية بعناصر أخرى مثل البوتاسيوم والفسفور، والتي تعد من العناصر الضرورية أيضاً لتغذية التربة الزراعية. لذلك فإن استغلال المخلفات العضوية الناتجة عن الغاز الحيوي كبديل عن الأسمدة الاصطناعية المشتقة من الغاز الطبيعي، يساهم في توفير الطاقة، وخفض استهلاك الوقود الأحفوري، وتقليل البصمة الكربونية. ويتم عادة تخزين البقايا المهضومة في صهريج تخزين، والذي يتيح أيضا استرجاع بعض الكميات الضئيلة من الغاز الحيوي التي لم تتحرر داخل جهاز الهضم.

هناك العديد من الاستخدامات لهذه المخلفات منها الاستخدام المباشر بوضعها على حالتها (بدون فصل مكوناتها) على الأراضي الزراعية كما هو موضح بالشكل 1-11. كما يمكن عمل معالجة للخليط لفصل المادة السائلة منه والتي تعرف باسم (Liquor) واستخدامها كسماد زراعي سائل. أما المادة الصلبة وهي الألياف (Fibres) فيمكن استخدامها كمحسن للتربة للمساعدة في نمو المحاصيل بشكل أسرع[15].

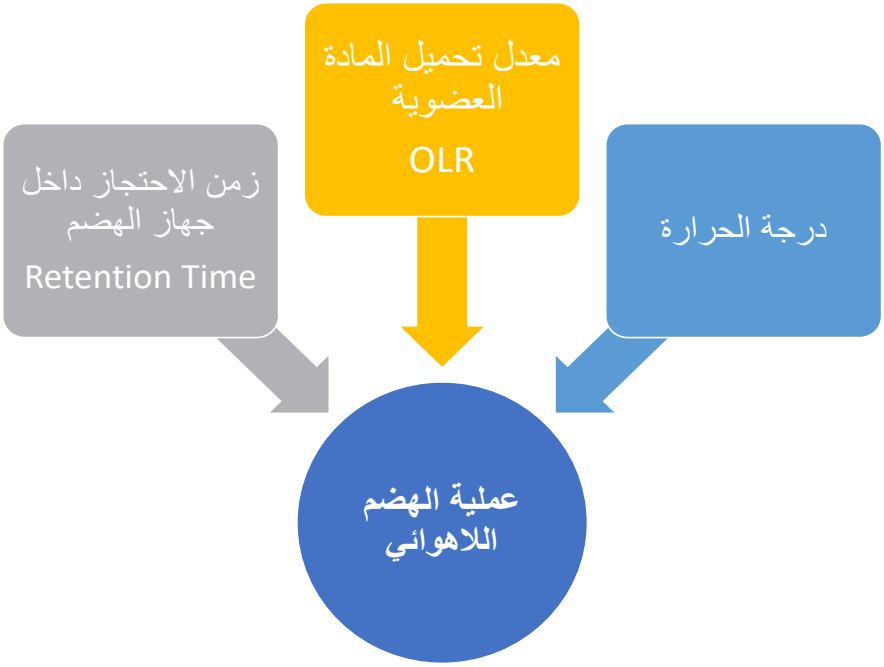
الشكل 1-11: استخدام البقايا/ المخلفات المهضومة (Digestate) كسماد للأراضي الزراعية

المصدر: AD [16]

1-4: العوامل المؤثرة على عملية الهضم اللاهوائي

يُعد الحفاظ على نظام ميكروبي في حالة استقرار أمراً بالغ الأهمية لضمان التشغيل الناجح لجهاز الهضم اللاهوائي. ولتحقيق ذلك، يجب الحفاظ على ظروف التشغيل المناسبة لتعظيم القدرة على إنتاج الغاز الحيوي. وتتأثر عملية الهضم بعدة عوامل (الشكل 1-12) أبرزها درجة الحرارة التي تؤثر على النشاط البكتيري، ومعدل تحميل المادة العضوية، وزمن بقاء المادة العضوية داخل جهاز الهضم.

الشكل 1-12: العوامل المؤثرة على عملية الهضم اللاهوائي للمادة العضوية



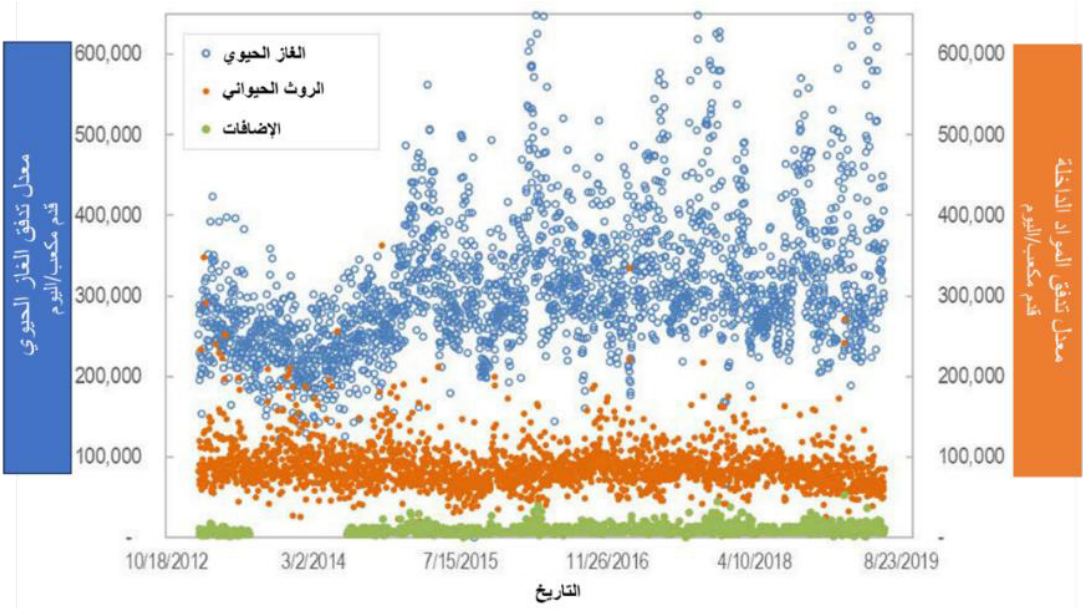
1-4-1: معدل تحميل المادة العضوية (Organic Loading Rate, OLR)

يتطلب التشغيل المستقر لجهاز الهضم الالتزام بالتحميل المنتظم للمخلفات العضوية، وضمان التجانس في الخصائص الفيزيائية والكيميائية لها، بما في ذلك تركيز المواد الصلبة الكلية (Total Solids, TS) والمواد الصلبة المتطايرة (Volatile Solids, VS)، وذلك للحفاظ على معدل تحميل عضوي ثابت. ومن الناحية العملية، ينبغي عند إجراء الهضم المشترك لمزيج متنوع من المخلفات، إضافة هذه المخلفات في الوقت نفسه وبنسب ثابتة، ويفضل خلطها مسبقاً قبل إدخالها إلى جهاز الهضم. وقد تؤدي محدودية سعة التخزين، أو اختلاف توقيتات التوريد، وتباين معدلات الهضم الحيوي للمخلفات العضوية المختلفة، إلى عدم انتظام التحميل ومن ثم حدوث تذبذبات كبيرة في إنتاج الغاز الحيوي.

يوضح الشكل 1-13 تأثير المواد الداخلة (Influent) إلى جهاز الهضم على إنتاج الغاز الحيوي وهي تتكوّن بشكل أساسي من الروث الحيواني (Manure)، إضافة إلى ركائز عضوية أخرى تُستخدم في الهضم المشترك.

على الرغم من أن إضـافة هذه الركائز الإضـافية تؤدي إلى زيادة ملحوظة في إنتاج الغاز الحيوي، فإن عدم تغذيتها بشـكل غير منتظم يؤدي إلى تذبذب واضـح في معدلات إنتاج الغاز الحيوي، مقارنة بالفترات التي اقتصـر فيها التحميل على الروث الحيواني كمادة أولية فقط، حيث كان الإنتاج أقل، ولكنه أكثر استقراراً.

الشكل 1-13: تذبذب تحرر الغاز الحيوي لعدم انتظام تحميل المواد الداخلة إلى الهاضم



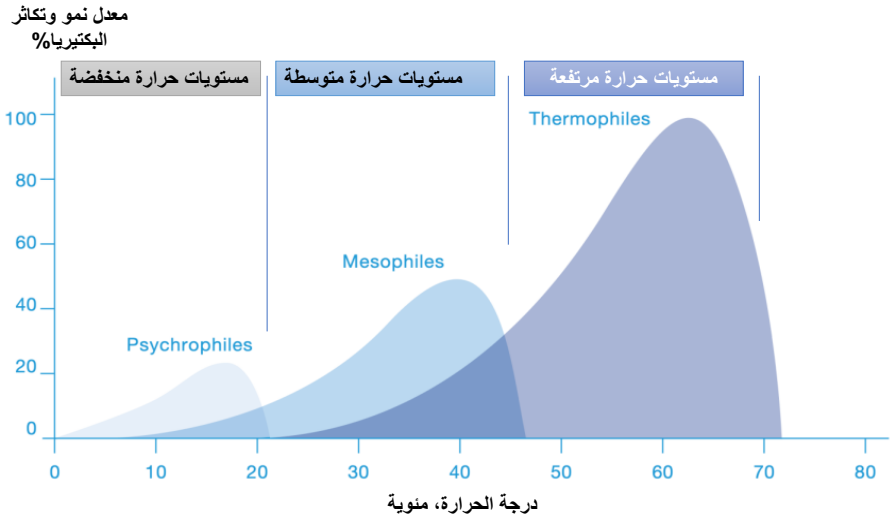
المصدر: US EPA

1-4-2: حرارة التشغيل

تعد درجة الحرارة من أهم العوامل التي تتحكم في استقرار العملية وكفاءة إنتاج الغاز الحيوي، حيث تؤثر بشـكل مباشـر على معدلات نمو الميكروبات (البكتريا)، ونشـاطها الأيضـي، وكفاءة التفاعلات الإنزيمية داخل الخلايا، وكذلك على احتياجاتها الغذائية. عملياً يمكن أن تتم عملية الهضـم اللاهوائي عند نطاق واسـع من درجات الحرارة تبدأ من 20 درجة مئوية وحتى 65 درجة مئوية. وبشـكل عام كلما ارتفعت درجة الحرارة، كلما زادت سرعة تحلل المادة العضوية، بسبب نمو النشاط البكتيري.

يمكن تقسيم مستويات الحرارة حسب نوع البكتيريا السائدة والمسؤولة عن إنتاج الميثان إلى ثلاثة مستويات[17] كما هو موضح بالشكل 1-14، ولكل منها خصائصه.

الشكل 1-14: أنواع البكتيريا والميكروبات التي تقوم بعملية الهضم اللاهوائي للمادة العضوية حسب درجة حرارة الوسط



المصدر: معدل عن US EPA

- **درجة الحرارة: أقل من 20 درجة مئوية**

وهو المستوى الملائم لنمو ميكروبات Psychrophiles. والتي تتسم بنشاط حيوي منخفض ومعدلات تحلل بطيئة، ومن ثم إنتاجية محدودة من الغاز الحيوي. ولكنها في الوقت ذاته تساهم في استقرار عملية الهضم.

- **درجة الحرارة: من 30 إلى 40 درجة مئوية**

وهو المستوى الملائم لنمو ميكروبات Mesophiles والتي تتسم بنشاط حيوي معتدل، ومعدلات تحلل معتدلة، ومن ثم إنتاجية معتدلة من الغاز الحيوي. لكنها ستحتاج إلى طاقة حرارية (معدلات متوسطة) لتوفير الحرارة اللازمة للنشاط البكتيري. ويعد

هذا المستوى من الحرارة الأوسع انتشاراً والأفضل في التطبيق في أجهزة الهضم لما توفره من استقرار لعملية الهضم.

- **درجة الحرارة: 50 - 65 درجة مئوية**

وهو المستوى الملائم لنمو ميكروبات Thermophiles والتي تتسم بنشاط حيوي مرتفع، وإنتاجية عالية من الغاز الحيوي، وتتطلب زمن احتجاز أقل داخل جهاز الهضم. لكنها في الوقت ذاته لها حساسية مرتفعة تجاه تغير مكونات المواد العضوية الداخلة إلى جهاز الهضم، كما أنها تستهلك معدلات أعلى من الطاقة لتوفير الحرارة اللازمة للنشاط البكتيري.

يلخص الجدول 1-5، أوجه المقارنة بين الأنواع المختلفة من البكتيريا التي تنشط حسب مستويات الحرارة داخل جهاز الهضم اللاهوائي.

الجدول 1-5: مقارنة بين أنواع البكتيريا التي تقوم بعملية الهضم اللاهوائي للمادة العضوية

البند	Mesophiles	Psychrophiles	Thermophiles
نطاق درجات الحرارة	تتكاثر البكتيريا عند درجات حرارة أقل من 20 درجة مئوية	تتكاثر البكتيريا عند درجات حرارة من 30 إلى 40 درجة مئوية	تتكاثر البكتيريا عند درجات حرارة من 50 إلى 65 درجة مئوية
المميزات	• لا تحتاج إلى تسخين • مناسبة للمناطق الباردة • استقرار عملية التشغيل	• استقرار عملية التشغيل • التعامل مع التغيرات في نوع المخلفات العضوية • لا تحتاج إلى متطلبات طاقة عالية	• إنتاجية عالية من الغاز الحيوي. • تصلح للمشاريع التجارية ذات السعات الكبيرة • وقت المكوث داخل المفاعل قصير
العيوب	• إنتاجية منخفضة من الغاز الحيوي. • وقت المكوث داخل المفاعل طويل جداً • لا تصلح للمشاريع التجارية ذات السعات التصميمية الكبيرة	• معدلات الهضم أقل مقارنة بالأنظمة الحرارية العالية	• تحتاج إلى قدر عالي من الطاقة للتسخين والتحكم • حساسية عالية للتغيرات في مكونات المواد العضوية الداخلة

3-4-1: زمن الاحتجاز الهيدروليكي (Hydraulic Retention Time, HRT)

يعد زمن الاحتجاز الهيدروليكي داخل جهاز الهضـــم اللاهوائي من العوامل المهمة في زيادة إنتاجية الغاز الحيوي. وهو مقياس لمتوســـط الفترة الزمنية التي تمكثها المواد الداخلة في جهاز الهضم. وهو يساوي حاصل قسمة حجم جهاز الهضم (متر مكعب) على معدل التدفق اليومي للمواد الداخلة [18] على النحو التالي:

زمن الاحتجاز الهيدروليكي باليوم	=	حجم جهاز الهضم، متر مكعب	÷	معدل التدفق للمواد الداخلة، متر مكعب/اليوم
HRT		$V_{Digester}$		Q_{Input}

يتوقف تحديد زمن الاحتجاز على درجة الحرارة التشـغيلية ونوع البكتيريا التي تقوم بعملية الهضـم اللاهوائي للمواد العضـوية الداخلة. فإذا كان زمن الاحتجاز أقل من الفترة اللازمة لنمو وتكاثر النشـــاط الميكروبي، فقد تخرج البكتيريا من جهاز الهضـــم دون اكتمال النمو الكامل لها، ومن ثم ســتتأثر ســلباً عملية الهضـــم، وتقل بذلك إنتاجية الغاز الحيوي. ولذلك يســـتخدم أحيانا مقياس آخر وهو زمن الاحتجاز للمادة الصـــلبة (Solids Retention Time, SRT) في أنظمة الغاز الحيوي المتطورة التي تعتمد على مخلفات الصـــرف، لتحديد الفترة المناســـبة لاحتجاز البكتريا والميكروبات المستخدمة في عملية الهضم اللاهوائي. وبشكل عام فإن مستويات الحرارة المنخفضة تتطلب فترات زمنية أعلى للاحتجاز بسبب بطء النشـاط البكتيري في هذه المسـتويات. أما في حالة الحرارة المرتفعة، فيكون النشـــاط البكتيري ومعدل الهضـــم أعلى ومن ثم زمن الاحتجاز أقصر. وفي المتوسط يصل زمن الاحتجاز للأجهزة العاملة عند درجات حرارة عالية (50-65 درجة مئوية) إلى 10-20 يوم، بينما يرتفع إلى 20-40 يوم عند مســـتويات الحرارة المتوســـطة (30-40 درجة مئوية). أما في الأوســـاط الباردة ذات الحرارة المنخفضة (أقل من 20 درجة)، فيصل زمن الاحتجاز إلى أكثر من 55 يوم.

الفصل الثاني

ترقية الغاز الحيوي إلى الميثان الحيوي

1-2	ترقية الغاز الحيوي إلى الميثان الحيوي
2-2	خيارات الاستخدام النهائي للميثان الحيوي
3-2	الاتجاهات الحالية للسوق العالمي للغازات الحيوية
4-2	الميثان الحيوي ومحطات إنتاجه عالمياً

تمهيد

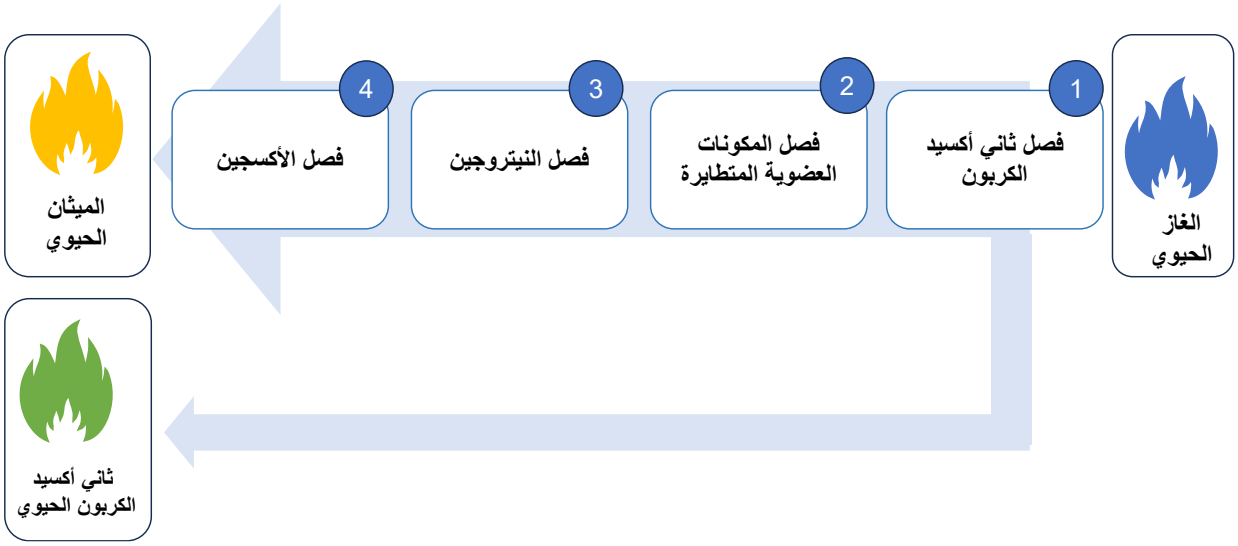
يعد الاستخدام الشائع للغاز الحيوي حرقه كوقود في وحدات التوليد المشترك للكهرباء والحرارة في نفس موقع إنتاجه، وذلك لأنها لا تتطلب اشتراطات صارمة لمواصفات الغاز المستخدم. علاوة على دورها في تلبية احتياجات محطة الإنتاج من الحرارة المستخدمة في عمليات الهضم اللاهوائي، والكهرباء اللازمة لتشغيل المعدات. ومع تنامي بناء محطات الغاز الحيوي للتخلص من النفايات، وانتشار مفهوم المحطات المركزية التي تسمح بزيادة إنتاجية الغاز الحيوي، بدأت عدة أسواق في الاستثمار في مشاريع ترقية الغاز الحيوي لإنتاج الميثان الحيوي لتوسيع نطاق استخدامه في شتى القطاعات.

1-2: ترقية الغاز الحيوي إلى الميثان الحيوي

تتم عملية ترقية الغاز الحيوي للحصول على الميثان الحيوي أو الغاز الطبيعي المتجدد كمنتج نهائي عبر تنفيذ سلسلة من عمليات المعالجة المتقدمة الموضحة بالشكل 1-2. والتي تهدف إلى زيادة تركيز الميثان في المنتج النهائي إلى 96-98% لرفع القيمة الحرارية للغاز، ثم ضخه لاستخدامه في القطاعات الممكنة.

ولتحقيق ذلك، يتم في محطة الترقية استكمال فصل المكونات الضارة المتواجدة داخل الغاز الحيوي بعد إنتاجه من عملية الهضم اللاهوائي. ويشمل ذلك فصل الغازات الضارة (ثاني أكسيد الكربون، النيتروجين، الأكسجين)، وكذلك فصل المركبات العضوية المتطايرة (VOCs)، التي تتسبب في تلف المعدات والآلات الدوارة. ولا يتم بالضرورة فصل كل تلك المكونات في محطة الترقية، بل يمكن فصل بعضها في مراحل سابقة أثناء مرحلة إنتاج الغاز الحيوي. وهو الأمر الذي يقلل من حجم العمليات، ومن ثم تقليل التكاليف الرأسمالية والتشغيلية المطلوبة للمشروع.

الشكل 2-1: عمليات المعالجة المطلوبة لترقية الغاز الحيوي إلى الميثان الحيوي



المصدر: الباحث

2-1-1: فصل ثاني أكسيد الكربون

تعد عملية فصل غاز ثاني أكسيد الكربون العملية الرئيسية في محطة الترقية، وتهدف إلى رفع قيمته الحرارية ليطابق المواصفات القياسية، حيث يعد الغاز الحيوي في صورته الخام ذو قيمة حرارية متوسطة (حوالي 21 ميجاجول لكل متر مكعب). لذلك يساهم فصل غاز ثاني أكسيد الكربون في رفع تركيز الميثان، لتصل القيمة الحرارية للميثان الحيوي إلى 36 ميجاجول لكل متر مكعب. عالمياً هناك عدة طرق مطبقة في فصل ثاني أكسيد الكربون والتي وصلت أغلبها إلى مرحلة النضوج التقني والتجاري، ومن أكثرها شيوعاً طريقة الرش/الغسل بالماء (Water Scrubbing) والتي تعتمد على استخدام الماء كمذيب، وطريقة الامتزاز بالضغط المتأرجح (Pressure Swing Adsorption, PSA)، وكذلك عملية الغسل بالمواد الكيميائية (Chemical Scrubbing). ويتوقف استخدام الطريقة المناسبة على عدة عوامل منها خصائص الغاز الحيوي، ومعدل الإنتاج اليومي، ودرجة النقاوة المطلوبة، والتكاليف الرأسمالية المتاحة. أما من جانب التكاليف التشغيلية، فتتراوح تكلفة ترقية الغاز الحيوي بين 2.5-5 دولار لكل مليون وحدة حرارية بريطانية[19].

تحقق طريقة الغسل بالماء نسبة تركيز للميثان تصل إلى 98%، وتعتمد على الامتصاص الفيزيائي لثاني أكسيد الكربون باستخدام الماء كمذيب. ويتم عمل تنشيط للماء المشبع بثاني أكسيد الكربون عن طريق خفض الضغط لإعادة استخدامه مرة أخرى. وهذه الطريقة مطبقة في عدة محطات عاملة في أوروبا، وتتسم بمرونتها العالية للتعامل مع التذبذب في معدلات تغذية الغاز الحيوي، وهي السمة البارزة لمحطات إنتاجه. كما أنها لا تتطلب عمليات تجفيف أو نزع للكبريت بشكل مسبق، لكن في المقابل تستهلك قدراً كبيراً من الطاقة.

أما طريقة الضغط المتأرجح (PSA)، فتحقق تركيز للميثان بأكثر من 97%، وهي مطبقة في عدة مشاريع في أوروبا وآسيا وبدرجة أقل في الولايات المتحدة. وتعتمد على رفع ضغط الغاز الحيوي وتمريره عبر وسط امتزاز، الذي يقوم بحجز جزيئات ثاني أكسيد الكربون، بينما يسمح بمرور الميثان. ولاحقاً يتم تحرير ثاني أكسيد الكربون عند ضغط منخفض. وتتطلب هذه الطريقة معالجة مسبقة للغاز الحيوي للتخلص من بخار الماء وكبريتيد الهيدروجين.

كما تعد طريقة التبريد من الطرق الحديثة التي تحقق تركيزً مرتفعاً من الميثان بأكثر من 98%، حيث يتم خلالها تبريد الغاز ثم إجراء عملية فصل استناداً إلى الاختلاف (الفارق) في درجات الغليان بين الميثان وثاني أكسيد الكربون، لكنها لا تزال محدودة الانتشار بسبب تكاليفها المرتفعة. يلخص الجدول 2-1 طرق فصل ثاني أكسيد الكربون، وآلية عمل كل منها، ونسبة التركيز التي يمكن تحقيقها للميثان.

الجدول 2-1: مقارنة بين الطرق المستخدمة في فصل ثاني أكسيد الكربون من الغاز الحيوي

طريقة المعالجة	تركيز الميثان الممكن تحقيقه	آلية العمل / الخصائص	اشتراطات/متطلبات	التطبيق
الغسل بالماء (Water Scrubbing)	**أعلى من 98%**	امتصاص فيزيائي باستخدام الماء كمذيب، مع تجديد المذيب عن طريق خفض الضغط	• لا تتطلب إزالة الكبريت أو التجفيف قبل المعالجة • مرونة عالية في التكيف مع معدلات تدفق الغاز • متطلبات طاقة كهربائية مرتفعة • لا تحتاج إلى طاقة حرارية • فاقد ميثان مرتفع • لا تحتاج إلى استخدام مواد كيميائية	منفذة في عدة مشاريع
الامتزاز بالضغط المتأرجح (Pressure Swing Adsorption, PSA)	**أعلى من 97%**	امتزاز فيزيائي وإزالة الامتزاز نتيجة تغيّر الضغط	• تتطلب إزالة كبريتيد الهيدروجين والتجفيف مسبقًا • متطلبات طاقة كهربائية مرتفعة • لا تحتاج إلى طاقة حرارية • فاقد ميثان مرتفع نسبياً • دون استخدام مواد كيميائية	منفذة في عدة مشاريع
الفصل بالغشاء (Membrane Separation)	**أعلى من 96%**	استخدام أغشية مسامية تعتمد على فرق الضغط لفصل الغازات وفق معدلات الانتشار	• تتطلب إزالة الكبريت والتجفيف مسبقًا • متطلبات طاقة كهربائية مرتفعة جدًا • لا تحتاج إلى طاقة حرارية • فاقد ميثان مرتفع • دون استخدام مواد كيميائية	منفذة بشكل واسع في أوروبا
طرق التبريد (Cryogenic Methods)	**أعلى من 98%**	تبريد الغاز ثم إجراء الفصل عند درجات حرارة منخفضة	• تتطلب إزالة الكبريت والتجفيف مسبقًا • متطلبات طاقة كهربائية مرتفعة جدًا • فاقد ميثان منخفض جدًا • لا تحتاج إلى استخدام مواد كيميائية	في مرحلة المحطات التجريبية

المصدر: الباحث استناداً إلى تجميع بيانات من Biogas Portal Info

2-1-2: فصل المكونات العضوية المتطايرة VOCs

يتسبب تحلل المادة العضوية في تكوين مواد عضوية متطايرة، وقد تنتج أيضاً السيلوكسنات (مركبات السيليكون) في الغاز الحيوي إذا كانت المواد العضوية تحتوي على منظفات كيميائية. وهذه المركبات تعد ضارة حيث تتسبب في إتلاف المحركات والضواغط والتوربينات عند استخدام الغاز في عملية الاحتراق. لذلك تشترط المواصفات القياسية العالمية إزالتها لتجنب هذه الإضرار أثناء الاستخدام. ويتغير تركيز السيلوكسانات على حسب نوع المخلفات المستخدمة في إنتاج الغاز الحيوي، لكن بشكل عام تكون نسبتها أقل في الروث الحيواني (0-0.2 ميليجرام لكل متر

مكعب)، بينما تكون ضمن مستويات أعلى قليلاً في مخلفات البلدية (0-50 ميليجرام لكل متر مكعب)، ومرتفعة جداً في مخلفات مياه الصرف الصناعي (0-400 ميليجرام لكل متر مكعب)[20]. ويستخدم عموماً الكربون النشط في فصل هذه المكونات الضارة ضمن فلاتر مخصصة لهذا الغرض.

2-1-3: فصل النيتروجين

في بعض الحالات، قد يحتوي الغاز الحيوي على نسبة عالية من النيتروجين، ومن ثم سيتطلب ذلك فصله من الغاز. وتتسم عملية فصل النيتروجين بأنها مكلفة ومعقدة، وتسبب في هدر كميات كبيرة من الغاز الحيوي. وتتيح بعض أنظمة معالجة الغاز الحيوي إمكانية إزالة النيتروجين بالتزامن مع ثاني أكسيد الكربون، وذلك باستخدام مواد امتزاز تتمتع بانتقائية عالية.

2-1-4: فصل الأكسجين

يعد فصل الأكسجين من الغاز الحيوي ضرورياً في حالة ضخ الميثان في شبكات نقل الغاز المحلية، والتي تشترط ألا تزيد نسبة الأكسجين عن 0.2%. ومن أفضل طرق فصل الأكسجين طريقة استخدام العامل الحفّاز، الذي يحفز الأكسجين على التفاعل مع الميثان لإنتاج ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء ثم فصلهما لاحقاً.

2-2: خيارات الاستخدام النهائي للميثان الحيوي

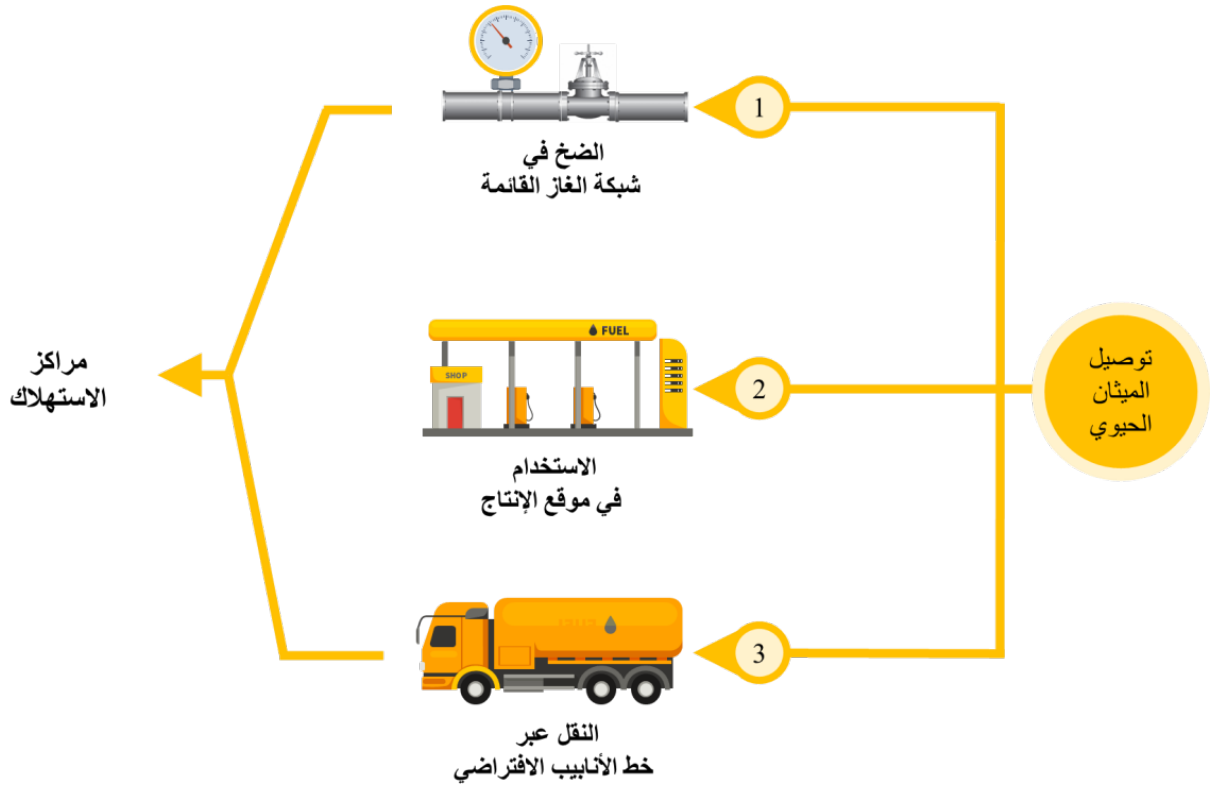
بعد انتهاء عملية ترقية الغاز الحيوي إلى الميثان الحيوي، يصبح جاهزاً للنقل والتوزيع على قطاعات الاستخدام النهائي. وبحسب المشاريع المنتشرة عالمياً يوجد ثلاث مسارات لنقل الميثان الحيوي كما هو موضح بالشكل 2-2، وهي إما الحقن مباشرة في شبكة الغاز المحلية، وذلك للاستفادة من البنية التحتية القائمة. بينما يعتمد

الخيار الثاني على اســـتخدامه في موقع العمل في تطبيقات مختلفة مثل محطات إعادة تعبئة المركبات، أو تحويله إلى غاز طبيعي مسال واستخدامه كوقود للشاحنات.

أما الخيار الثالث فهو نقله إلى المستهلكين باستخدام المقطورات وذلك في حالة عدم توافر بنية تحتية لنقل الغاز أو بعده عن مراكز الاســـتهلاك، وهو المســـار الذي يعرف باسم خط الأنابيب الافتراضي (Virtual Pipeline).

عملياً قد تعتمد بعض المشـــروعات على أكثر من آلية توصـــيل واحدة في نفس الوقت لتحقيق التوازن بين العرض والطلب على الميثان الحيوي. فعلى ســـبيل المثال، قد يتم تخصيص حصة من الإنتاج لتغذية محطة لإعادة تعبئة المركبات بالغاز الطبيعي المضغوط داخل الموقع، بينما يتم نقل الكمية المتبقية إلى محطة وقود خارجية عبر خط أنابيب افتراضي.

الشكل 2-2: طرق توصيل الميثان الحيوي إلى تطبيقات الاستخدام النهائي



المصدر: الباحث

2-2-1: حقن الميثان الحيوي في شبكات الغاز القائمة

يعد خيار حقن الميثان الحيوي في شبكات الغاز القائمة الأقل في التكلفة مقارنة بالخيارات الأخرى، حيث لا يتطلب أية تسهيلات أو توفير أنشطة لوجستية إضافية. ولتحقيق ذلك، يتم تحديد نقطة استقبال (Point of Receipt) والتي تتضمن أجهزة لقياس جودة الميثان لضمان مطابقته لمواصفات النقل قبل حقنه في الشبكة، وأجهزة لقياس كميات الغاز قبل الضخ في الشبكة. كما تتضمن أيضاً معدات تضمن وقف ضخ الغاز غير المطابق للمواصفات.

لكن من زاوية أخرى، تتسم اشتراطات شبكات نقل الغاز بالصرامة لضمان التشغيل الآمن للخطوط وتطبيقات الاستخدام النهائي. ومن بين هذه الاشتراطات، والتي قد تختلف من بلد لآخر، وجود قيود صارمة على نسبة كبريتيد الهيدروجين (أقل من 3.8 جزء في المليون)، ومحتوى الكبريت الكلي (أقل من 50 جزء في المليون)، والأكسجين (أقل من 0.2%)، وكذلك على قيود على نسبة السيلوكسانات، وبخار الماء، والميثان، والقيمة الحرارية العليا، كما يبين الجدول 2-2.

الجدول 2-2: اشتراطات مشغلي شبكات نقل الغاز لمواصفات الميثان الحيوي

المكون	المواصفات القياسية
الميثان CH_4	أعلى من 97% (مول)
الأكسجين O_2	≥ 0.2% (حجماً)
كبريتيد الهيدروجين H_2S	≥ 3.8 جزء في المليون (ppm)
إجمالي محتوى الكبريت (Total Sulphur)	≥ 50 جزء في المليون (ppm)
بخار الماء	أقل من 112 ميلجرام لكل متر مكعب (mg/m^3)
السيلوكسانات (Siloxanes)	≥ 10 ميلجرام لكل متر مكعب (mg/m^3)
القيمة الحرارية العليا (HHV)	≥ 42.3 ميجاجول لكل متر مكعب (MJ/m^3)

المصدر: Jemena 2015 [21]

2-2-2: تطبيقات الاستخدام في موقع الإنتاج (Onsite Applications)

تفضل بعض الشركات المطورة لمشاريع الميثان الحيوي الاستثمار بشكل مباشر في تطبيقات الاستخدام النهائي في موقع الإنتاج، بحيث يكون المشروع متكاملاً من الإنتاج وحتى الاستهلاك، وهو ما قد يسمح لهم بتحقيق عائد اقتصادي أعلى مقارنة ببيع الغاز مباشرة لمشغلي شبكات الغاز. كما أن هذا الخيار يسمح لهم بمعالجة الغاز الحيوي باشتراطات أقل صرامة من تلك التي يطلبها مشغلو شبكات نقل الغاز.

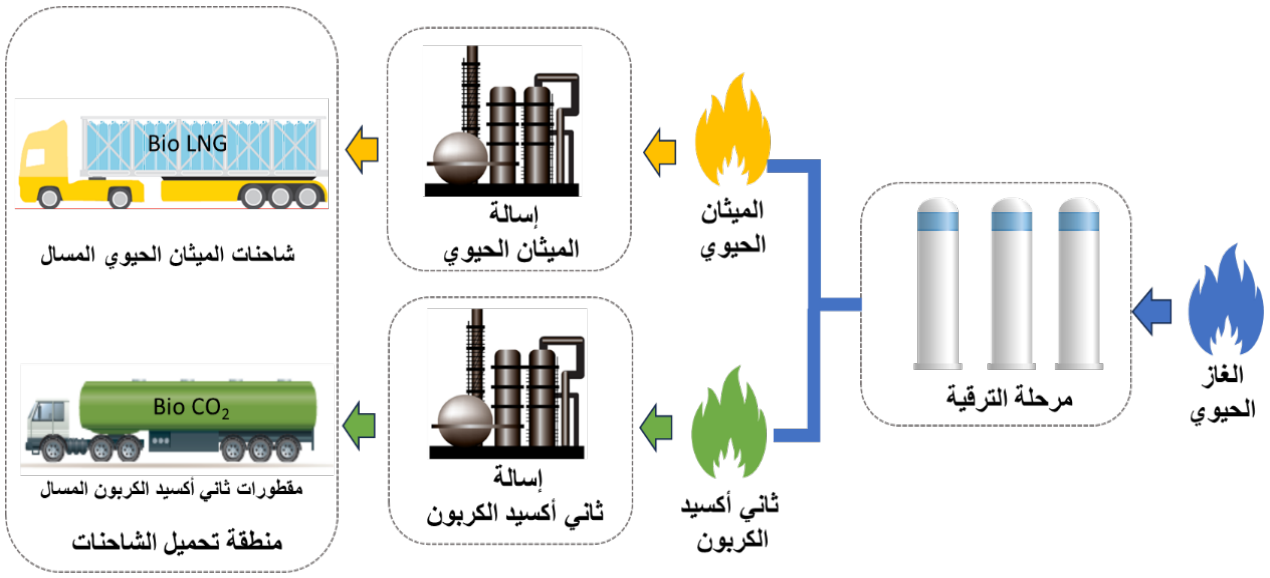
ومن أبرز تلك التطبيقات استخدام الميثان الحيوي كوقود للمركبات، وهو ما يعرف باسم الغاز الحيوي المضغوط (Bio Compressed Natural Gas, CNG). حيث يتم ضغط الميثان الحيوي وهو في حالته الغازية إلى 27 بار، وربطه بوحدة متكاملة لإعادة تعبئة المركبات بالغاز كالمبينة بالشكل 2-3. وفي بعض الحالات يقوم مطورو المشروع بتوفير أسطول المركبات اللازم لضمان تشغيل المشروع.

الشكل 2-3: وحدة لإعادة تعبئة المركبات بالغاز الحيوي المضغوط (Bio CNG)

المصدر: Prodeval [22]

بينما يمكن إسالة الميثان الحيوي في حالات أخرى، للحصول على الميثان المسال الحيوي (Bio-LNG)، والذي يمكن استخدامه كوقود لشاحنات الخدمة الشاقة (Heavy Duty Vehicles, HDV). وفي هذه الحالة، تضم محطة ترقية الغاز الحيوي تسهيلات إضافية تشمل مبادلات حرارية لتخفيض حرارة الغاز قبل دخوله مرحلة الإسالة، والتي يُبرد فيها إلى -162 درجة مئوية، ليتحول إلى الحالة السائلة عند الضغط الجوي. بالإضافة إلى صهاريج تخزين لضمان توفر مخزون تشغيلي كاف لتغذية محطة إعادة التعبئة في منطقة تزويد الشاحنات. وقد تتضمن محطة الإسالة وحدات إضافية لإسالة غاز ثاني أكسيد الكربون كما هو موضح بالشكل 2-4، حيث يتم نقله بواسطة المقطورات لاستخدامه لاحقا في التطبيقات الصناعية المختلفة.

الشكل 2-4: مخطط سير العمليات في محطة إسالة الغاز الحيوي



المصدر: الباحث

عالمياً بدأت عدة دول أوروبية مثل هولندا وألمانيا في الاستثمار في مشاريع الميثان الحيوي المسال لدعم خططها الرامية نحو نزع انبعاثات الكربون من قطاعي النقل البري والبحري. وتعد ألمانياً الرائدة في المحطات الكبيرة، والتي تصل فيها سعة المحطة الواحدة إلى نحو 100 ألف طن سنوياً من الميثان الحيوي المسال.

يبين الجدول 2-3، أمثلة من مشاريع الميثان الحيوي المسال المنفذة في ألمانيا، وهولندا وهما الرائدتان في هذا النشاط.

الجدول 2-3: أكبر محطات إنتاج الميثان المسال الحيوي (**Bio-LNG**) من حيث الطاقة الإنتاجية

المشروع	الدولة	الطاقة الإنتاجية من الميثان الحيوي المسال	ملاحظات
Shell BioLNG-Rheinland	ألمانيا	100,000 طن سنوياً	أكبر مشروع للميثان الحيوي المسال في ألمانيا، ومخصص لتوفير الوقود لشاحنات نقل البضائع (نحو 5,000-4,000 شاحنة سنوياً)
REEFUELERY Bio-LNG Plant	ألمانيا	63,000 طن سنوياً	ثاني أكبر مشروع من نوعه في العالم من حيث الطاقة الإنتاجية، وهو مخصص لتوفير الغاز الطبيعي المسال كوقود للشاحنات
Nordsol Bio-LNG	هولندا	3,400 طن سنوياً	يساهم المشروع في تخفيض 14.3 ألف طن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً
FirstBio2Shipping	هولندا	2,400 طن سنوياً 5,000+ طن سنوياً من ثاني أكسيد الكربون	يعد اول مشروع لتموين السفن بالغاز الطبيعي المسال

المصدر: تجميع الباحث استنادا إلى عدة مصادر (Bioenergy insight [23],[24], biooekonomie[25], Offshore Energy[26])

2-2-3: نقل الميثان الحيوي عبر خط الأنابيب الافتراضي (Virtual Pipeline)

قد تكون محطة إنتاج الميثان الحيوي بعيدة عن المستخدمين النهائيين أو عن شبكة الغاز المحلية في المناطق، لذلك يمكن اللجوء إلى ما يعرف باسم خط الأنابيب الافتراضي. ويعتمد هذا المسار على رفع ضغط الميثان الحيوي إلى 270 بار ثم تعبئته في مقطورات أنابيب الغاز (الشكل 2-5) التي تقوم بتوصيله إلى وجهته النهائية، وعند الوصول يُخفَّض الضغط إلى المستوى المطلوب من قبل الجهة المستقبِلة. لكن من عيوب هذا المسار أنه يتطلب تسهيلات إضافية لعمليات الضغط وخفض الضغط. لكنه يتيح في الوقت ذاته استغلال المواقع البعيدة عن البنية التحتية مثل مكبات النفايات أو مخلفات المزارع أو غيرها، وتسويق غازها الطبيعي المتجدد في المناطق الحضرية.

الشكل 2-5: مقطورة أنابيب (Tube Trailer) لنقل الميثان الحيوي

المصدر: BioGas Market Place [27]

2-3: الاتجاهات الحالية للسوق العالمي للغازات الحيوية

2-3-1: إنتاج الغازات الحيوية

لا يشكل إنتاج الغازات الحيوية (الغاز الحيوي والميثان الحيوي) سوى نسبة ضئيلة من الطلب العالمي من الغاز الطبيعي. فوفق أحدث التقديرات[2]، بلغ إنتاج الغاز الحيوية ما يعادل نحو 49 مليار متر مكعب غاز طبيعي مكافئ[3]، وهو ما يعادل نحو 1% من إجمالي الطلب العالمي على الغاز في عام 2023.

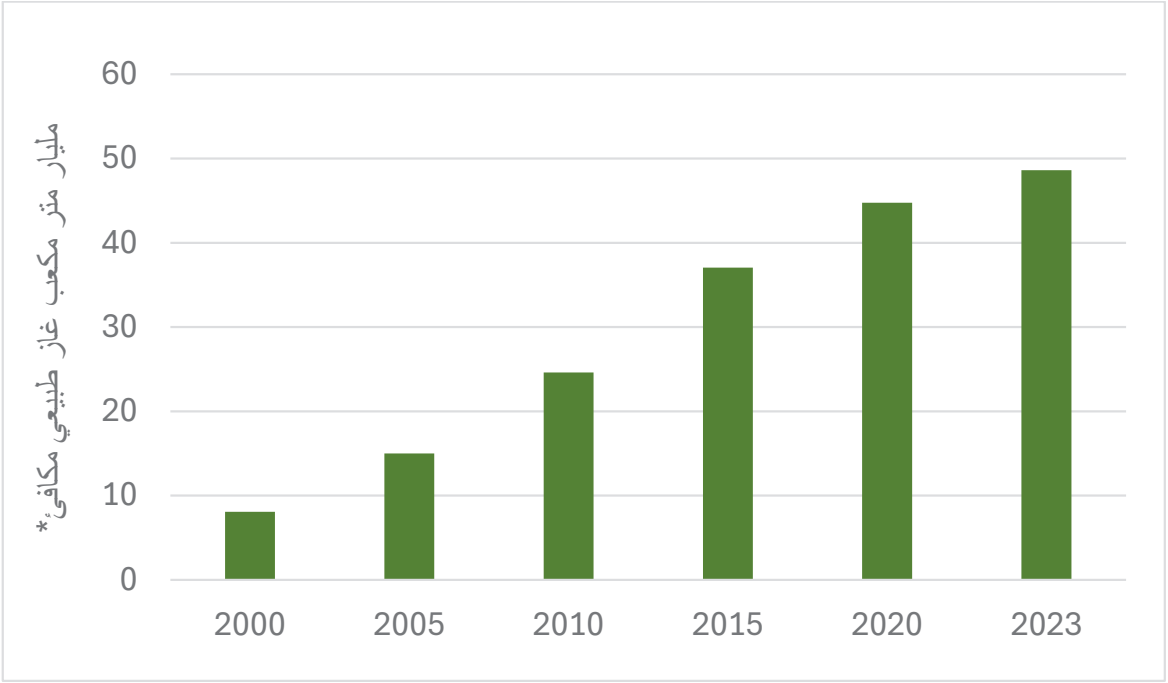
وبالرغم من محدودية إنتاجه مقارنة بالغاز الطبيعي المنتج من قطاع الغاز النفط والغاز، إلا أن قطاع الغاز الحيوي يشهد نمواً سنوياً مستمراً بفضل السياسات البيئية والإجراءات التحفيزية التي اتبعتها عدة دول للتوسع في إنتاجه، لما يوفره من

[2] تقديرات وكالة الطاقة الدولية الصادرة في عام 2025 والتي تعتمد على استخدام معيار القيمة الحرارية (بيتا جول PJ)وليس وحدة الحجم المستخدمة في تقدير الإنتاج العالمي من الغاز الطبيعي وهي مليار متر مكعب. وعادة تكون البيانات والإحصائيات الخاصة بالغاز الحيوي شحيحة ومتأخرة في الإصدار بسبب صعوبة الحصول على البيانات من هذا القطاع.

[3] القيمة الحرارية للغاز الحيوي تعد منخفضة مقارنة بالغاز الطبيعي حيث تبلغ 21 ميجا جول لكل متر مكعب، وحتى يتم تحويلها إلى مليار متر مكعب غاز طبيعي، يجب استخدام معامل القيمة الحرارية للغاز لوحدة الحجوم والمقدر بنحو 36 ميجا جول لكل متر مكعب.

مزايا بيئية واقتصادية، وكذلك دوره في دعم الاقتصاد الدائري للكربون. فكما يوضح الشكل 2-6، شهد إنتاج الغاز الحيوي نمواً سنوياً متسارعاً خلال الفترة من عام 2000 وحتى عام 2023، حيث ارتفع من 8 مليار متر مكعب غاز طبيعي مكافئ، ليصل إلى قرابة 49 مليار متر مكعب غاز طبيعي مكافئ، أي بنسبة نمو سنوي مركب بلغت حوالي 8.1%. وهذا النمو المتسارع يفوق ما حققه إنتاج الغاز الطبيعي في قطاع النفط والغاز، حيث ارتفع إنتاج الغاز الطبيعي خلال نفس الفترة من 2,400 مليار متر مكعب إلى 4,060 مليار متر مكعب، بمعدل نمو سنوي مركب 2.3%.

الشكل 2-6: تطور إنتاج الغاز الحيوي خلال الفترة 2000-2023



*تم التحويل إلى مليار متر مكعب غاز طبيعي، باستخدام معامل القيمة الحرارية للغاز لوحدة الحجوم والمقدر بنحو 36 ميجا جول لكل متر مكعب

المصدر: بيانات معدلة عن وكالة الطاقة الدولية وCedigaz

على مستوى المناطق، تعد أوروبا الرائدة في هذا القطاع إذ يشكل إنتاجها من الغاز الحيوي قرابة نصف الإنتاج العالمي (حوالي 47%). حيث تدعم القوانين والتشريعات الأوروبية التوسع في استخدامه كمصدر منخفض الانبعاثات في قطاع

الكهرباء والتدفئة، مع وضـــع إجراءات تحفيزية لشـــراء الكهرباء المنتجة من الغاز الحيوي بأسعار تفضيلية وربطها على الشبكة. وتنتشر محطات إنتاج الغاز الحيوي في العديد من الدول الأوروبية، وتعد ألمانيا المنتج الأكبر له، ويشـكل إنتاجها نحو نصـف إنتاج أوروبا من الغاز الحيوي.

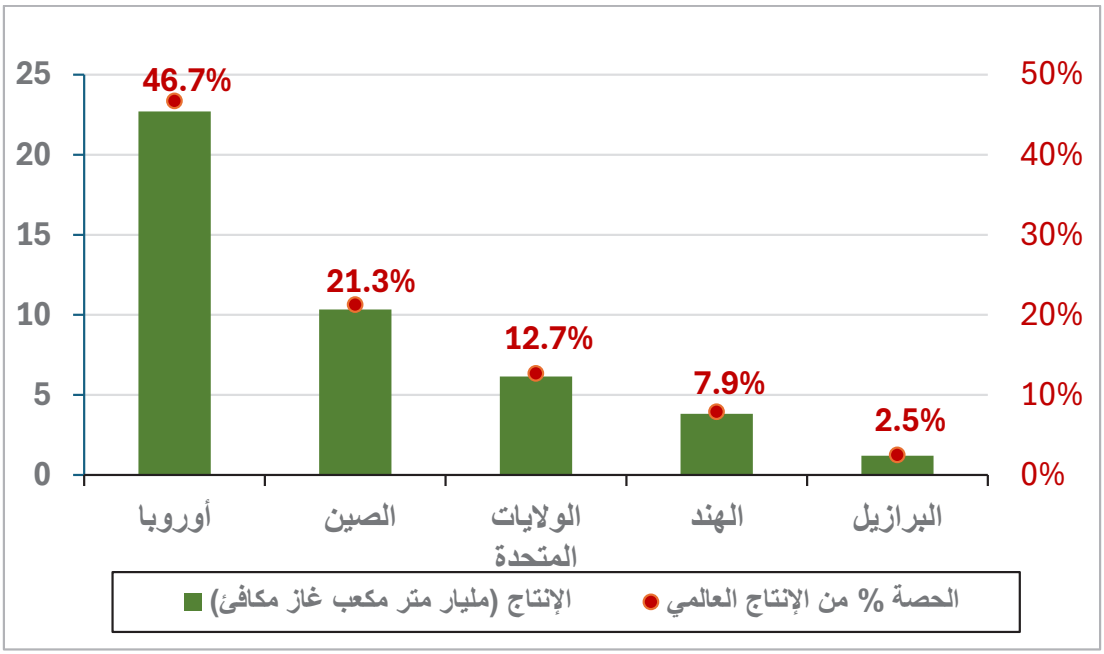
كما تعد **الصـــين** من أكبر منتجي الغاز الحيوي عالمياً، حيث بلغ إنتاجها عام 2023 نحو 10.3 مليار متر مكعب غاز طبيعي مكافئ، بما يمثل نحو 21.3% من الإنتاج العالمي. وقد بدأت الصـــين في تقديم حوافز لدعم إنتاج الغاز الحيوي من عام 2000 والتي كانت موجهه لدعم استخدام وحدات الهضم اللاهوائي صغيرة الحجم في المناطق الريفية، ثم مع تطور التكنلوجيا بدأ الاتجاه العام نحو الاسـتثمار في المحطات كبيرة الحجم. ويقدر عدد محطات الغاز الحيوي متوســطة وكبيرة الحجم بأكثر من 100,000 محطة. بينما يقدر عدد الوحدات متناهية الصـــغر (Microscale)، بأكثر من 42 مليون وحدة هضم لاهوائي، وهي مخصصة لتزويد لسكان في المناطق الريفية باحتياجاتهم من الحرارة وأغراض الطهي[28].

بينما تعد **الولايات المتحدة** الأمريكية ثالث أكبر منتج للغاز الحيوي عالمياً، ويقدر إنتاجها بنحو 6.2 مليار متر مكعب غاز طبيعي مكافئ، بما يعادل أكثر من 12.7% من الإنتاج العالمي. ويعتمد إنتاج الغاز الحيوي بشكل أساسي على استغلال مكبات النفايات التي تساهم بنحو 50% من إجمالي الإنتاج. كما بدأ الاتجاه مؤخراً نحو الاســتثمار في اســتغلال النفايات الزراعية، والتي تتســبب بنحو 25% من انبعاثات الميثان في الولايات المتحدة.

وتعد **الهند** من الدول الرئيسية المنتجة للغاز الحيوي، والتي تعتمد عليه بشكل أساسي كحل للتخلص من النفايات. وقد بلغ إنتاج الهند عام 2023 نحو 3.8 مليار متر مكعب غاز طبيعي مكافئ، بما يعادل نحو 7.9% من الإنتاج العالمي. وتنتشر في الهند

الوحدات متناهية الصـــغر لأغراض التدفئة والطهي في المناطق الريفية ويقدر عددها بنحو 4.9 مليون وحدة[29]. أما **البرازيل**، والتي تعد الرائدة عالمياً في قطاع الوقود الحيوي، فقد بلغ إنتاجها نحو 1.2 مليار متر مكعب غاز طبيعي مكافئ، وهو ما يعادل نحو 2.5% من الإنتاج العالمي. أما في بقية مناطق العالم مثل أفريقيا وبعض البلدان الآسـيوية، وأمريكا الجنوبية، فتنتشـر فيها وحدات الهضـم اللاهوائي متناهية الصـغر لإنتاج الغاز الحيوي، ويقدر عددها الإجمالي بأكثر من 700 ألف وحدة. يوضح الشكل 2-7، أكبر منتجي الغاز الحيوي عالمياً عام 2023، والذي يشـــكل إنتاجهم مجتمعين أكثر من 90% من الإنتاج العالمي.

الشكل 2-7: أكبر منتجي الغاز الحيوي عالمياً عام 2023



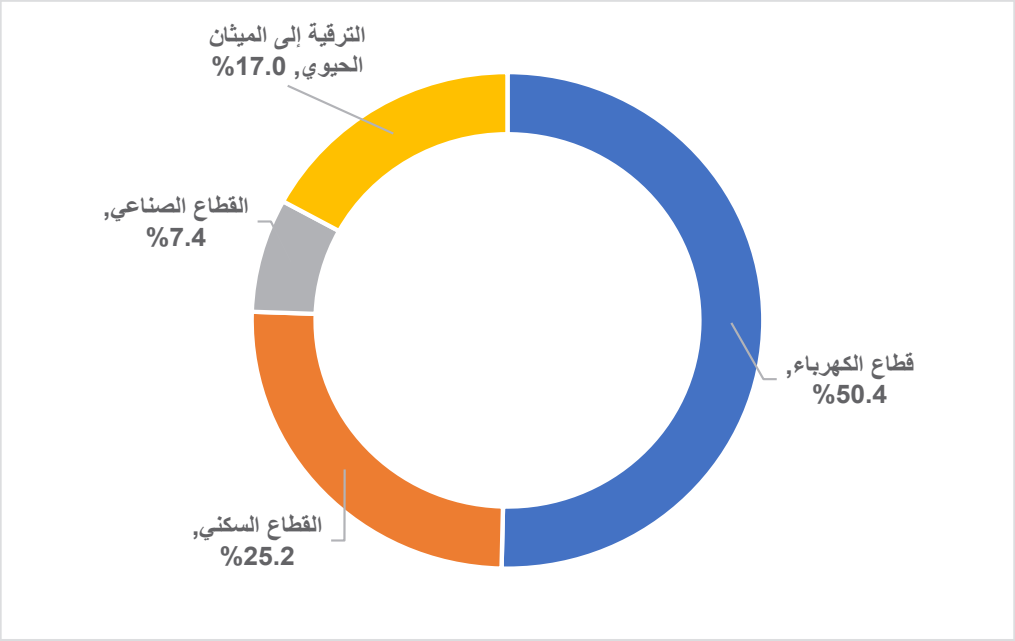
المصدر: بيانات معدلة عن وكالة الطاقة الدولية وCedigaz

2-3-2: استهلاك الغاز الحيوي

يستخدم قرابة 83% من الإنتاج العالمي من الغاز الحيوي بعد معالجته الأولية، كوقود في ثلاث قطاعات رئيســية وهي قطاع توليد الكهرباء، والقطاع الصـــناعي، والقطاع السكني، حيث يعد قطاع توليد الكهرباء المستهلك الأكبر، ويشكل نحو 50%

من إجمالي الاستهلاك، يليه القطاع السكني بنسبة 25.2% ثم القطاع الصناعي بنسبة 7.4%. أما النسبة المتبقية (17%) فتمثل الحصة المستخدمة من الغاز الحيوي كمادة تغذية (لقيم) في محطات الترقية لإنتاج الميثان الحيوي، والذي يستخدم مباشرة كوقود في المركبات أو يضخ في شبكات نقل وتوزيع الغاز المحلية. يبين الشكل 2-8، توزيع إنتاج الغاز الحيوي حسب الاستخدام.

الشكل 2-8: توزيع استهلاك الغاز الحيوي حسب الاستخدام



المصدر: استناداً إلى بيانات مشتقة من وكالة الطاقة الدولية

2-4: الميثان الحيوي ومحطات إنتاجه عالمياً

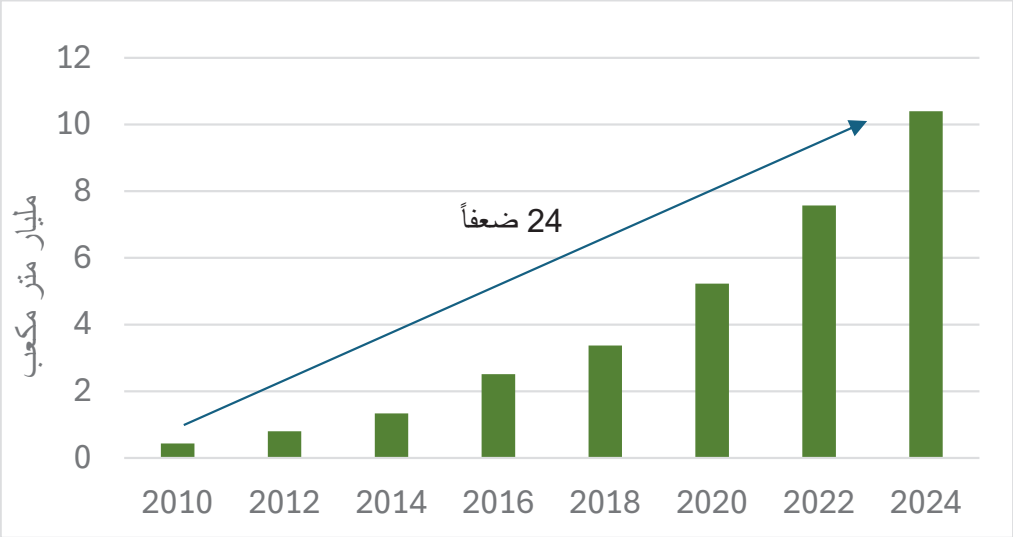
2-4-1: تطور إنتاج الميثان الحيوي

بالرغم من أن استخدام الغاز الحيوي لإنتاج الميثان الحيوي لا يشكل نسبة كبيرة (17%) من إجمالي الاستهلاك، إلا أن هذا القطاع هو الأعلى نمواً مقارنة بباقي القطاعات، بل ويعد محركاً رئيسياً لنمو الطلب العالمي على الغاز الحيوي، لإمكانية استخدامه في عدة مجالات. ففي عام 2010، كانت حصة الميثان الحيوي لا تتجاوز

2% من استهلاك الغاز الحيوي عالمياً، بما يعادل نحو 0.43 مليار متر مكعب. وكان إنتاجه محصوراً في عدد محدود من الدول لا يتجاوز 16 دولة، ويقع غالبيتها في أوروبا. ومنذ ذلك الحين، شهد قطاع الميثان الحيوي نمواً متسارعاً مدفوعاً بعدة عوامل أبرزها السياسات الداعمة للطاقة منخفضة الكربون في قطاع النقل، ونضج التكنولوجيا المستخدمة في ترقية الغاز الحيوي. علاوة على إمكانية دمج الميثان الحيوي بسهولة في شبكات نقل الغاز الطبيعي القائمة ليصبح مكملاً للغاز في الاستخدامات المختلفة.

وقد أدى ذلك النمو إلى اتساع النطاق الجغرافي لمشاريع إنتاج الميثان الحيوي ليشمل نحو 40 دولة موزعة في مختلف مناطق العالم. ومن بين الدول التي انضمت في هذا المسار مؤخراً كل من تركيا، وأوكرانيا، وليتوانيا، وبولندا في أوروبا، إلى جانب دول من خارج أوروبا مثل كولومبيا وأستراليا. فضلًا عن دول أخرى لا تزال في مرحلة تنفيذ مشاريع تجريبية محدودة النطاق. وبحلول عام 2024، ارتفع الإنتاج العالمي للميثان الحيوي إلى 10.4 مليار متر مكعب عام 2024، محققاً نمواً يقارب الـ 24 ضعفاً مقارنة بمستوياته عام 2010، كما هو موضح بالشكل 2-9.

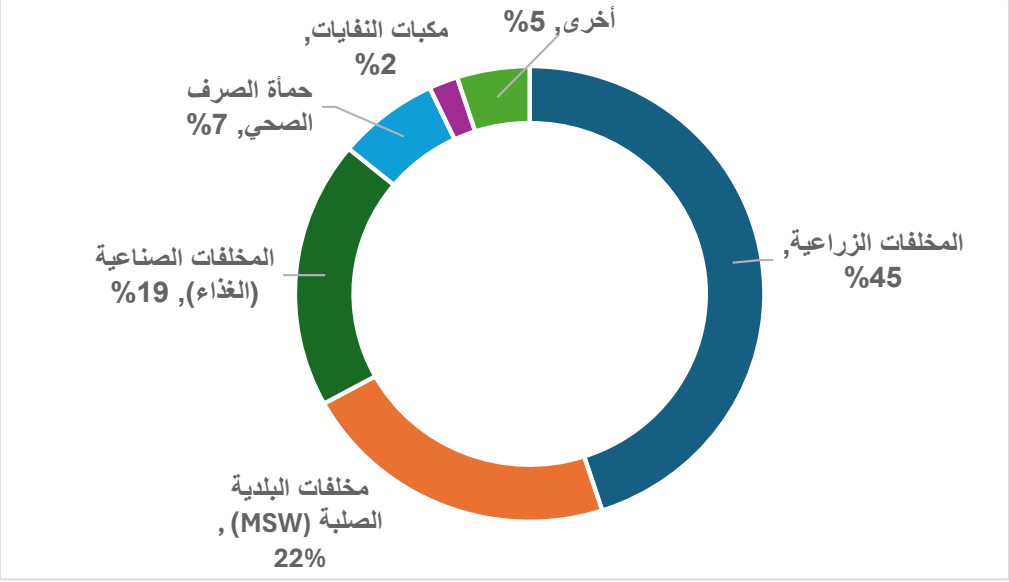
الشكل 2-9: نمو الإنتاج العالمي من الميثان الحيوي خلال الفترة 2010-2024



المصدر: الباحث استنادا إلى قاعدة بيانات Cedigaz

على مستوى المناطق، تساهم أوروبا وحدها بنحو نصف الإنتاج العالمي للميثان الحيوي، حيث بلغ إنتاجها في عام 2024 نحو 5.2 مليار متر مكعب. ويأتي غالبية الإنتاج الأوروبي من دول الاتحاد الأوروبي (EU27) بإجمالي 4.3 مليار متر مكعب، والباقي من خارجها (بريطانيا، سويسرا، أوكرانيا، تركيا). ويعد إنتاج أوروبا عام 2024 الأعلى تاريخياً، مدفوعاً بدخول عدة مشاريع جديدة حيز التشغيل، إلى جانب اتساع قاعدة الدول المنخرطة في إنتاج الميثان الحيوي بعد انضمام البرتغال عام 2022، وليتوانيا وأكرانيا عام 2023، وبولندا عام 2024، ليرتفع العدد إلى 25 دولة أوروبية. وتعد ألمانيا المنتج الأكبر في أوروبا ككل وثاني أكبر منتج للميثان الحيوي عالمياً. وتعتمد أوروبا بشكل رئيسي على المخلفات الزراعية في إنتاج الميثان الحيوي، بنسبة 45% من إجمالي المواد الأولية، ويعود ذلك إلى اتساع نطاق النشاط الزراعي في غالبية الدول الأوروبية. في المقابل، تسهم مخلفات البلدية الصلبة بنسبة تقارب 22%، بينما تشكل مخلفات صناعة الأغذية نحو 19% من إجمالي المدخلات، وتتوزع النسبة المتبقية بين مصادر عضوية أخرى، كما هو موضح في الشكل 2-10.

الشكل 2-10: مصادر إنتاج الميثان الحيوي في أوروبا حسب نوع المادة العضوية المستخدمة

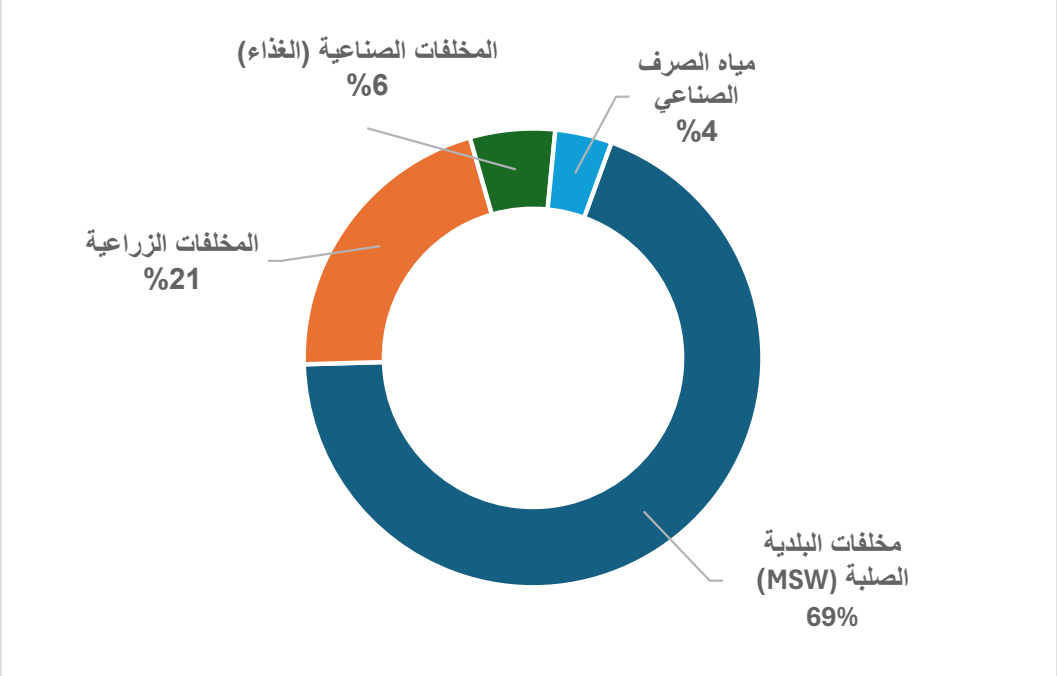


المصدر: EBA [30]

تأتي **أمريكا الشمالية** في المرتبة الثانية بقيادة الولايات المتحدة بإنتاج بلغ نحو 4.1 مليار متر مكعب عام 2024، وبحصة 39% من الإنتاج العالمي. وتعد الولايات المتحدة المنتج الأكبر عالمياً للميثان الحيوي بأكثر من 3.5 مليار متر مكعب، أي بما يعادل نحو ثلث الإنتاج العالمي. وعلى عكس أوروبا، تعتمد الولايات المتحدة بشكل رئيسي على مخلفات البلدية الصلبة كمصدر رئيسي لإنتاج الميثان الحيوي، بنسبة 69% من إجمالي المواد الأولية المستخدمة. بينما تسهم المخلفات الزراعية بنحو 21%، وتساهم مخلفات صناعة الأغذية بنسبة تقارب 6%، أما مياه الصرف الصناعي فتمثل حوالي 4% من إجمالي المدخلات، الشكل 2-11.

ويعكس هذا التباين في مزيج المواد العضوية المستخدمة من منطقة جغرافية إلى أخرى، اختلاف الأنماط الاستهلاكية، وحجم ونوعية المخلفات المتاحة في كل منطقة.

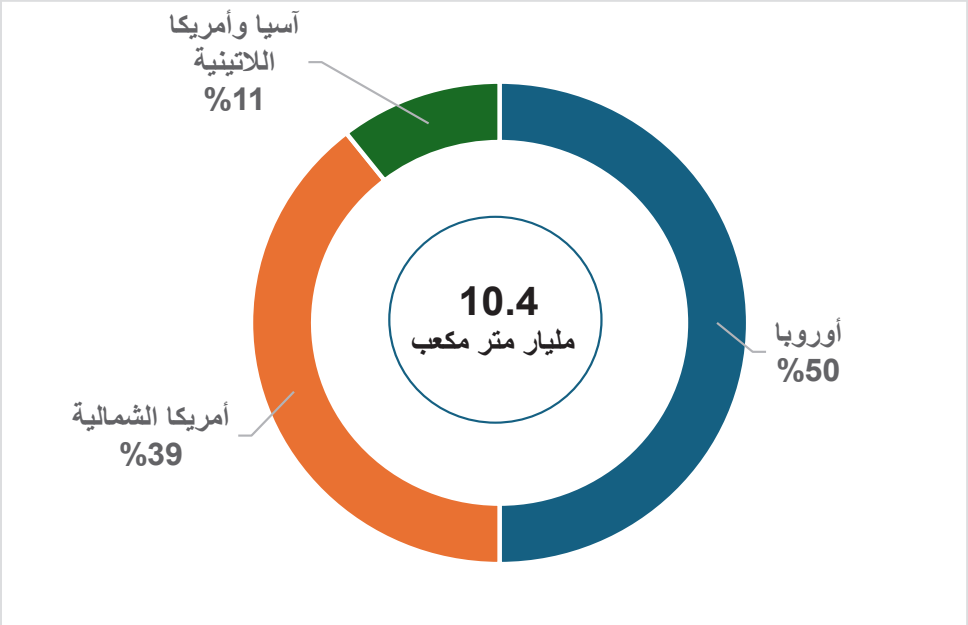
الشكل 2-11: مصادر إنتاج الميثان الحيوي في الولايات المتحدة حسب نوع المادة العضوية المستخدمة



المصدر: RNG Coalition [31]

أما بقية مناطق العالم (آسيا، أمريكا الجنوبية، أفريقيا)، فيشكل إنتاجها مجتمعة نحو 1.1 مليار متر مكعب، بما يعادل قرابة 11% من الإنتاج العالمي. وتعد الصين من الدول الرائدة في آسيا، ويشهد إنتاجها السنوي نمواً متسارعاً، بينما تعد البرازيل من أكبر منتجي الميثان الحيوي في أمريكا اللاتينية. يبين الشكل 2-12، توزيع إنتاج الميثان الحيوي بين مناطق العالم لعام 2024.

الشكل 2-12: توزيع إنتاج الميثان الحيوي عالمياً وفق المنطقة، عام 2024



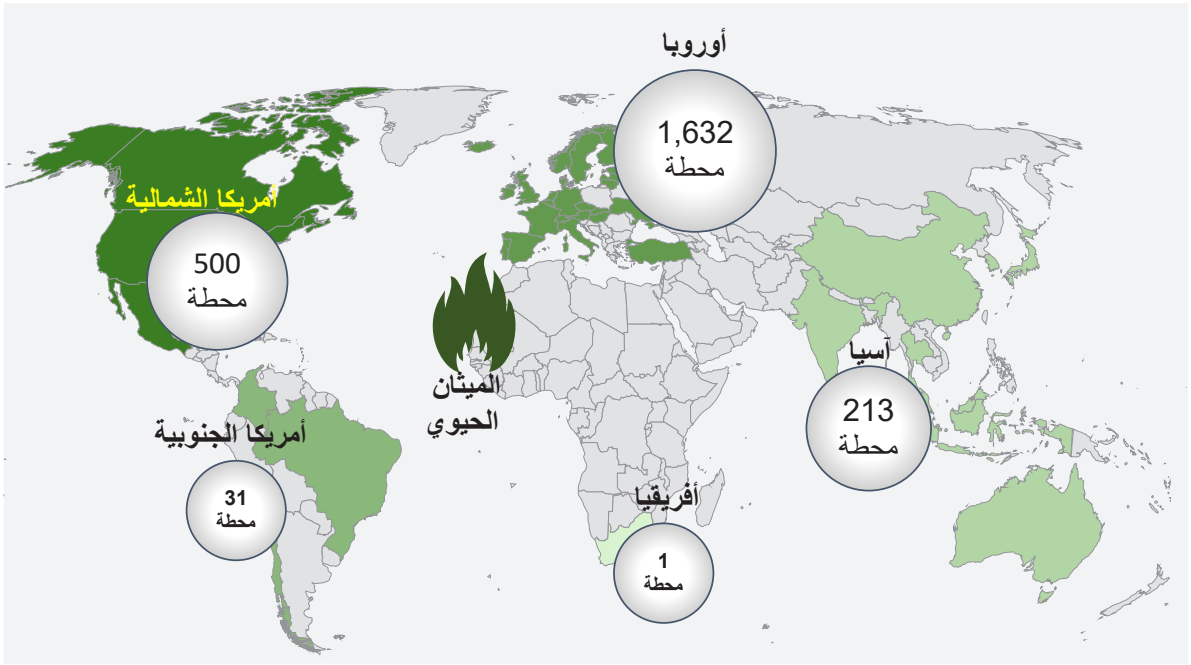
المصدر: حسابات الباحث استناداً إلى تحليل بيانات من Cedigaz و IEA و EBA

2-4-2: الانتشار الجغرافي لمحطات إنتاج الميثان الحيوي

شهد قطاع الميثان الحيوي خلال السنوات الأخيرة تزايداً واضحاً في عدد المحطات والمشاريع الجديدة التي دخلت حيز التشغيل، الأمر الذي انعكس بشكل مباشر على الإنتاج العالمي. ويعود هذا التوسع إلى توافر أطر تنظيمية داعمة، وحوافز اقتصادية، وسياسات تستهدف خفض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، إلى جانب تنامي الطلب على الوقود منخفض الكربون، لا سيما في قطاع النقل.

عالمياً بلغ عدد محطات إنتاج الميثان الحيوي قيد التشـــغيل مطلع عام 2025 نحو 2,377 محطة، موزعة على أربعين دولة. ويقع العدد الأكبر من المحطات في أوروبا التي تضم وحدها 1,632 محطة، تليها أمريكا الشمالية بإجمالي 500 محطة، وآسيا بإجمالي 213 محطة، وأمريكا الجنوبية بإجمالي 31 محطة، بينما تضم أفريقيا محطة واحدة تقع في جنوب أفريقيا، الشكل 2-13.

الشكل 2-13: توزيع محطات إنتاج الميثان الحيوي بين مناطق العالم، مطلع عام 2025



المصدر: حسابات وتجميع الباحث استناداً إلى CEDIGAZ, EBA, RNG COALITION

تصل السعة التصميمية الكلية للمحطات قيد التشغيل إلى قرابة 14 مليار متر مكعب سنوياً كما هو موضح بالجدول 2-4. وتتفاوت السعة التصميمية للمحطة الوحدة (متر مكعب سنوياً) بشكل كبير من مشروع لآخر ومن منطقة إلى أخرى، إلا أنها تشهد ارتفاعاً في المشروعات الجديدة بفضل تطور تكنولوجيا الترقية وتحسن اقتصاديات الحجم. ويقدر متوسط السعة التصميمية للمحطات قيد التشغيل في أوروبا بنحو 4.22 مليون متر مكعب سنوياً وهي القيمة الأقل عالمياً، بينما تصل إلى أعلى من 10 مليون

مكعب سنوياً للمحطات في منطقة الأمريكيتين، وذلك لأن محطاتها حديثة الإنشاء، وذات طاقات إنتاجية مرتفعة.

الجدول 2-4: توزيع محطات إنتاج الغاز الحيوي بين مناطق العالم والطاقة الإنتاجية، عام 2025

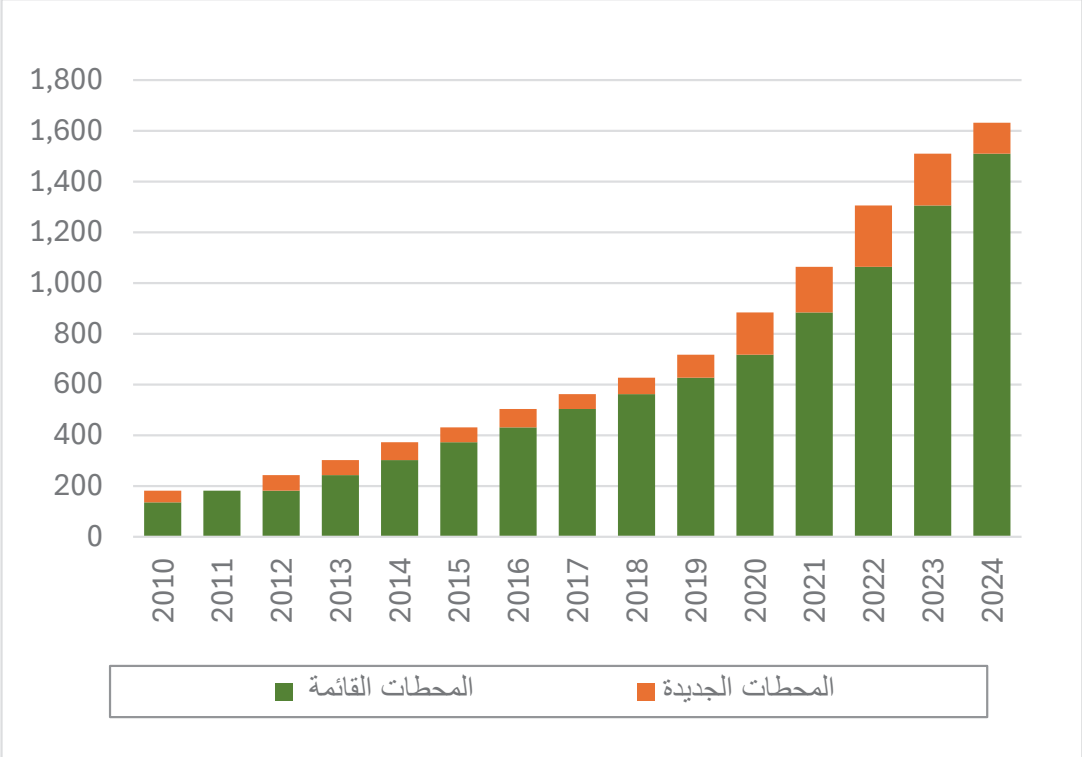
البند	أوروبا	أمريكا الشمالية	أمريكا الجنوبية	آسيا	أفريقيا	الإجمالي
عدد المحطات	1,632	500	31	213	1	2,377
عدد الدول المنتجة	25	3	3	8	1	40
إجمالي السعة التصميمية مليون متر مكعب سنوياً	6,900	5,415	323	1,341	6.66	13,985
متوسط السعة التصميمية للمحطة الواحدة (مليون متر مكعب سنوياً)	4.22	10.83	10.4	6.29	6.66	

المصدر: تجميع وحسابات الباحث استناداً إلى CEDIGAZ, EBA, RNG COALITION

- ***محطات الميثان الحيوي في أوروبا***

تضم أوروبا العدد الأكبر من محطات الميثان الحيوي وكذلك العدد الأكبر من الدول المنتجة للميثان الحيوي بإجمالي 25 دولة. حيث تشهد سنوياً إضافة عشرات المحطات الجديدة، والتي ارتفعت وتيرتها منذ عام 2019 كما يوضح الشكل 2-14. الأمر الذي أسفر عن ارتفاع عدد محطات الميثان الحيوي إلى 1,632 محطة مطلع عام 2025، واستمر العدد في النمو ليصل إلى 1678 حتى نهاية الربع الأول من 2025. وقد بلغ متوسط السعة التصميمية لمحطات الميثان الحيوي في أوروبا حوالي 483 متر مكعب/الساعة للمحطة الواحدة (ما يعادل 4.23 مليون متر مكعب سنوياً). ويعد هذا المعدل أعلى بأربعة أمثال متوسط السعة التصميمية لمحطات الغاز الحيوي الأوروبية، لكنه الأقل مقارنة بباقي المناطق الأخرى.

الشكل 2-14: تطور محطات الميثان الحيوي في أوروبا خلال الفترة 2010-2024



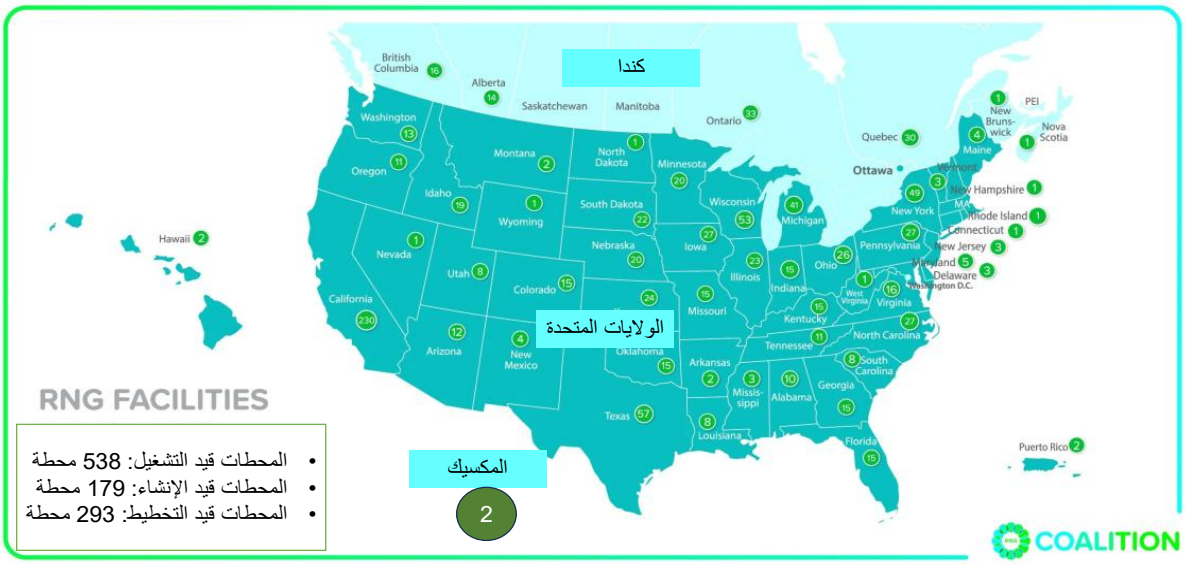
المصدر: EBA

- ***محطات الميثان الحيوي في أمريكا الشمالية***

بلغ عدد محطات الميثان الحيوي في **أمريكا الشـــمالية** نحو 500 محطة مطلع عام 2025 [32]، وتقع غالبيتها في الولايات المتحدة. وبخلاف المحطات قيد التشـغيل، هناك 153 محطة جديدة تحت الإنشـــاء. ومع دخول عدد كبير من المشـــروعات قيد الإنشـاء حيز التشـغيل، ارتفع عدد المحطات قيد التشـغيل مطلع عام 2026 إلى 538 محطـة (487 محطـة في الولايـات المتحـدة، 49 محطـة في كنـدا، ومحطتين في المكســيك). كما ارتفعت حزمة المشـــاريع المؤكدة والمخططة إلى 179 محطة تحت الإنشاء، و293 محطة قيد التخطيط، والتي ستساهم حال تنفيذها ودخولها حيز التشغيل في رفع الحصـــيلة الإجمالية من المحطات إلى أكثر من 1,000 محطة. ويعكس هذا الزخم في محطات الميثان الحيوي حجم الاهتمام المتزايد في هذا القطاع، بالرغم من

أن الولايات المتحدة وكندا من أكبر منتجي الغاز الطبيعي التقليدي على مستوى العالم. وعلى الرغم من أن المكسيك تضم عدد محدود جداً من محطات لإنتاج الميثان الحيوي (محطتين)، إلا أنها أبدت اهتماماً بالتوسع في هذا المجال، من خلال إبرام مذكرات تعاون لتنفيذ مشاريع جديدة[33]. يوضح الشكل 2-15 توزيع محطات الميثان الحيوي في أمريكا الشمالية مطلع عام 2026.

الشكل 2-15: توزيع محطات الميثان الحيوي قيد التشغيل والإنشاء في أمريكا الشمالية مطلع عام 2026



المصدر: RNG Coalition

- ***محطات الميثان الحيوي في آسيا***

يوجد في آسيا نحو 213 محطة لإنتاج الميثان الحيوي موزعة بين 8 دول. حيث يوجد قرابة نصف هذا العدد في الصين وحدها (حوالي 100 محطة)، تليها الهند بـ 82 محطة، ويتوزع العدد المتبقي بين كوريا الجنوبية (14 محطة)، وتايلاند (5 محطات) واليابان (6)، وماليزيا (3 محطات)، وإندونيسيا (محطتين)، وأستراليا (محطة واحدة). وتعد الصين المنتج الأكبر للميثان الحيوي بين دول المنطقة بطاقة إنتاجية إجمالية تصل إلى 1.63 مليون متر مكعب يومياً.

- ***محطات الميثان الحيوي في أمريكا الجنوبية***

يوجد في أمريكا الجنوبية 31 محطة للميثان الحيوي موزعة بين ثلاث دول حيث يقع منها 29 محطة في البرازيل، بالإضافة إلى محطة واحدة في كل من تشيلي وكولومبيا.

تعد البرازيل المنتج الرئيسي في المنطقة، وهي من الدول ذات الإمكانيات الواعدة في إنتاج الغاز الحيوي والميثان الحيوي بسبب وفرة المخلفات الزراعية والحيوانية والصرف الصحي. وتقدر الجمعية البرازيلية للغاز الحيوي والميثان الحيوي (ABiogás) أن البرازيل لديها إمكانات لإنتاج 120 مليون متر مكعب يومياً من الميثان الحيوي، علماً بأن إنتاج البرازيل عام 2025 بلغ حوالي 840 ألف متر مكعب يومياً (أي أقل من 1 مليون متر مكعب يومياً).

- ***محطات الميثان الحيوي في أفريقيا***

تعد أفريقيا من المناطق حديثة العهد بالميثان الحيوي رغم الإمكانات الكبيرة للاستثمار في هذا القطاع. حيث توجد محطة واحدة للميثان الحيوي تقع في مدينة "كيب تاون" في جنوب أفريقيا، وهي محطة (New horizons Waste to Energy)[34]، والتي تم تشغيلها عام 2017، بغرض معالجة نحو 1% من نفايات مدينة "كيب تاون". وتصل الطاقة الإنتاجية للمحطة بـ 6.66 مليون متر مكعب سنوياً.

2-4-3: استخدامات الميثان الحيوي

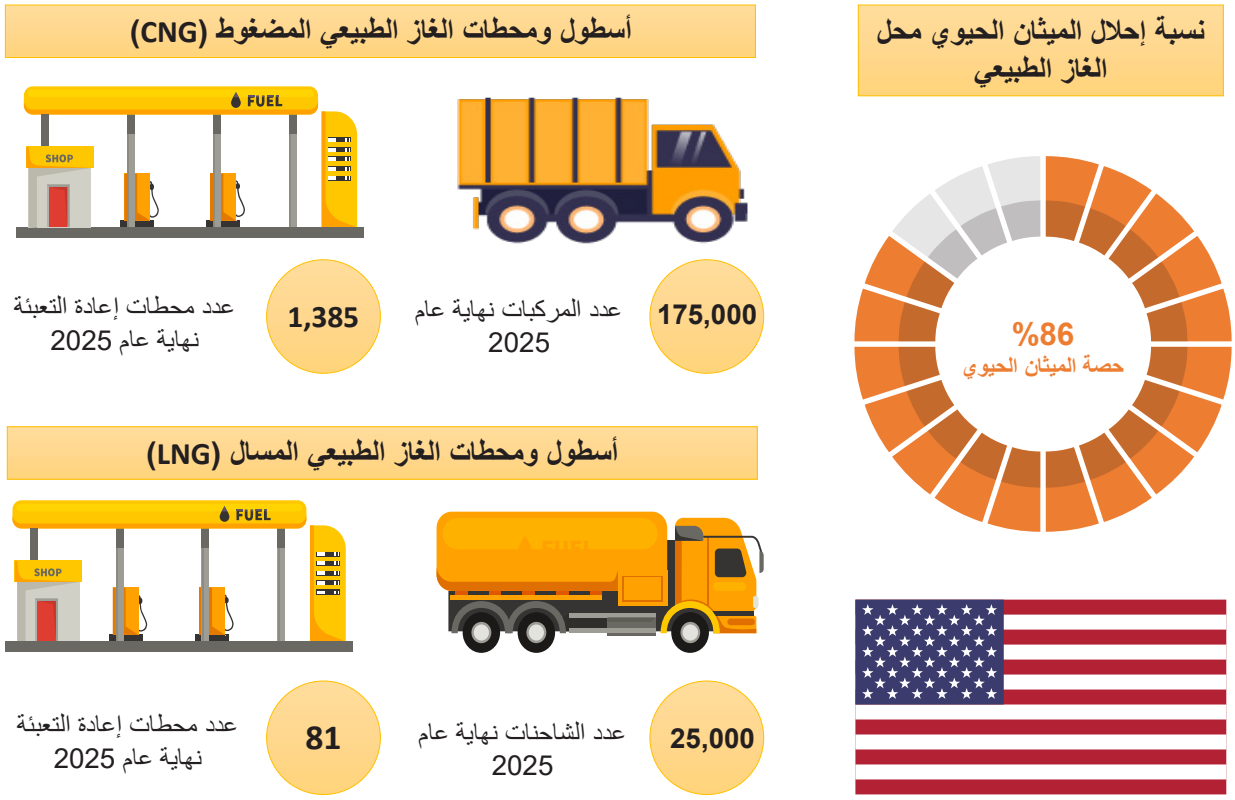
نظراً لأن خواص الميثان الحيوي لا تختلف عن الغاز الطبيعي، فقد بدأ ينافس الغاز الطبيعي في بعض القطاعات وبالأخص قطاع النقل ليحل محله تدريجياً عبر استخدامه سواء في صورة وقود مضغوط (الغاز الحيوي المضغوط Bio-CNG)، أو مسال (Bio-LNG). وقد جاء هذا التحول مدعوما بسياسات الخلط الإلزامي (خلط

الغاز الطبيعي مع الميثان الحيوي في شبكات نقل وتوزيع الغاز) لتحقيق مستهدفات خفض الكربون في قطاع النقل في بعض المناطق مثل أوروبا والولايات المتحدة. كما تشهد أيضاً بعض الأسواق في آسيا وأمريكا اللاتينية انطلاقة متسارعة في هذا المجال. وقد بات قطاع النقل يستحوذ على **قرابة نصف الطلب العالمي على الميثان الحيوي**، مع توقعات أن تستمر حصته في النمو في ظل الاتجاه الواضح نحو إحلاله محل الغاز الطبيعي والمنتجات البترولية السائلة لتقليل الانبعاثات الناتجة عن حرق الوقود.

على مستوى المناطق، تعد الولايات المتحدة الأعلى تقدماً في استخدام الميثان الحيوي في قطاع النقل المعتمد على الغاز، حيث بلغت نسبة اختراق الميثان الحيوي عام 2024 نحو 86%، وذلك على حساب حصة الغاز الطبيعي التقليدي التي تراجعت إلى 14%. وبحسب تقديرات منظمة Transport Project الأمريكية، بلغ إجمالي استهلاك الغاز (الطبيعي والحيوي) في قطاع النقل في الولايات المتحدة عام 2024 ما يعادل نحو 2.4 مليار متر مكعب، منها 2.05 مليار متر مكعب من الميثان الحيوي والباقي (0.33 مليار متر مكعب) من إنتاج الغاز الطبيعي التقليدي.

يقدر أسطول المركبات العاملة بالغاز الطبيعي المضغوط (سواء كان مصدره أحفوريا أو حيوياً) في الولايات المتحدة حسب تقديرات مكتب المعادن الحرجة وابتكار الطاقة الأمريكي (Office of Critical Minerals and Energy Innovation) في نهاية عام 2025 بنحو 175,00 مركبة[35]، بينما وصل عدد محطات إعادة التزود بالغاز المضغوط إلى نحو 1,385 محطة وفق تقديرات منظمة Transport Project الأمريكية[36]. أما للغاز الطبيعي المسال، فقد وصل عدد الشاحنات العاملة حوالي 25 ألف شاحنة، ويتم توفير الغاز الطبيعي المسال لها من خلال 81 محطة لإعادة التعبئة. وتعكس تلك الأرقام تحولاً هيكلياً في قطاع النقل في الولايات المتحدة لصالح الميثان الحيوي على حساب الغاز الطبيعي التقليدي، كما هو موضح بالشكل 2-16.

الشكل 2-16: أبرز مؤشرات قطاع النقل العامل بالغاز في الولايات المتحدة

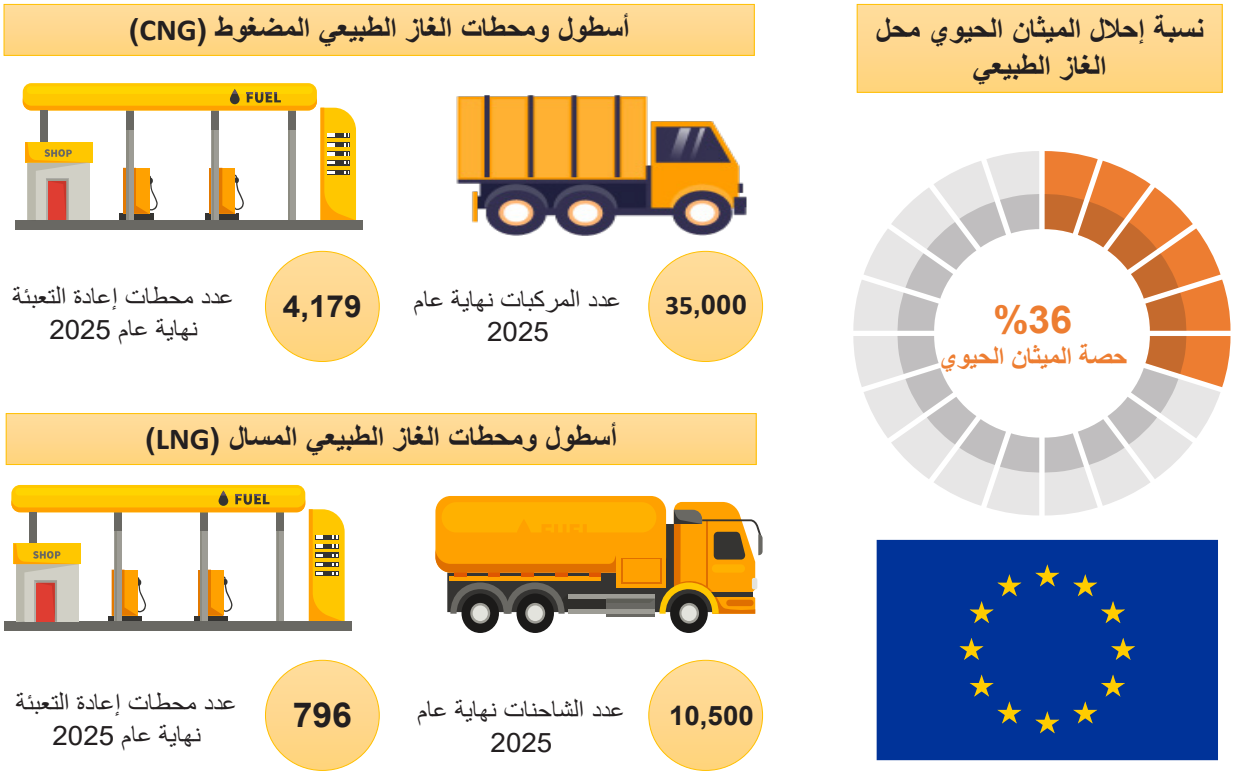


المصدر: الباحث

كما حققت **أوروبا** تجربة رائدة في مجال استخدام الغاز الطبيعي والمسال كوقود للمركبات، وحققت تقدماً ملحوظاً في إحلال الميثان الحيوي محل الغاز التقليدي. حيث يقدر حجم أسطول شاحنات الخدمة الشاقة العاملة بالغاز الطبيعي المضغوط (سواء كان تقليدياً أو حيوياً) بنحو 35 ألف شاحنة، والتي يتم إعادة تزويدها عدد بالوقود من خلال 4,179 محطة حسب تقديرات المفوضية الأوروبية. أما بالنسبة للغاز الطبيعي المسال، فيقدر أسطول شاحنات الخدمة الشاقة بأكثر من 10 آلاف شاحنة، بينما يبلغ عدد المحطات 796 محطة وفق تقديرات منظمة Eurogas لعام 2025.

وقد عملت الدول الأوروبية على زيادة حصة الميثان الحيوي على حساب الغاز الطبيعي الأحفوري في المركبات العاملة بالغاز، والتي وصلت مطلع عام 2024 نحو 36% (الشكل 2-17)، وبذلك تعد أوروبا الثانية عالمياً في الاعتماد على الميثان الحيوي لقطاع النقل الذي يعمل بالغاز.

الشكل 2-17: أبرز مؤشرات قطاع النقل العامل بالغاز في أوروبا



المصدر: الباحث

الفصل الثالث

الجوانب البيئية والاقتصادية للغاز الحيوي وفرص الاستثمار في الدول العربية

3-1 الجوانب البيئية والاقتصادية لإنتاج الغاز الحيوي

3-2 الأهداف والسياسات الداعمة للغاز الحيوي في مناطق العالم

3-3 شركات الطاقة العالمية تدخل سباق الغاز الحيوي

3-4 آفاق إنتاج الميثان الحيوي

3-5 الدول العربية والغاز الحيوي

تمهيد

وضعت عدة دول حوافز وأهداف محددة بأطر زمنية تدعم الاستثمار في إنتاج الغاز الحيوي والميثان الحيوي. وقد تنوعت تلك الأهداف حسب الأساس المستخدم، فمنها ما يعتمد على رقم مستهدف لإنتاج الغاز الحيوي بالمليار متر مكعب، أو تحديد حصة للغاز الحيوي من مزيج الطاقة الوطني، أو وضع مخطط لعدد المشاريع التي يجب تنفيذها. وتساهم تلك الأهداف في تشجيع المستثمرين في الدخول إلى قطاع الغاز الحيوي وتطبيقاته، في ظل وجود ضمانات تقدمها الحكومات لشراء الإنتاج من المشاريع سواء كان في صورة ميثان حيوي أو كهرباء مولدة باستخدام الغاز الحيوي.

3-1: الجوانب البيئية والاقتصادية لإنتاج الغاز الحيوي

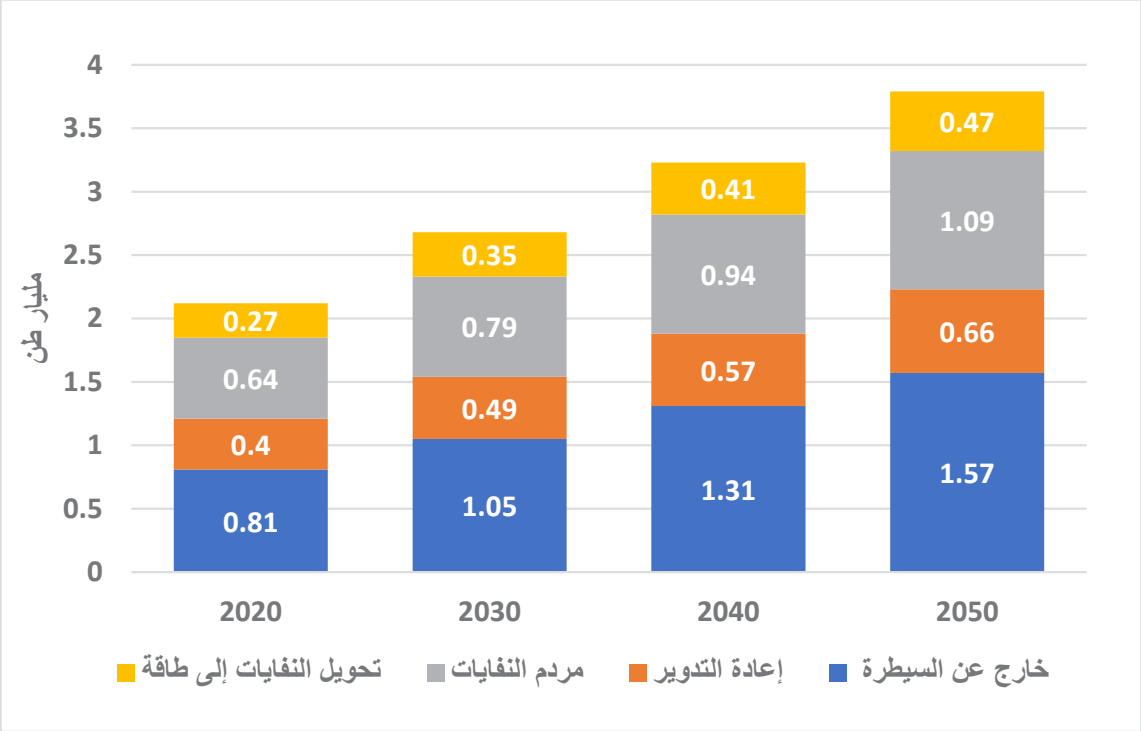
3-1-1: الغاز الحيوي كوسيلة فعالة لإدارة النفايات

اتجهت العديد من الدول منذ عدة سنوات، نحو تحفيز الاستثمار في مجال إنتاج الغاز الحيوي من المخلفات العضوية، بفضل ما يوفره من مزايا بيئية واقتصادية، ودعم الاقتصاد الدائري للكربون. وكذلك المساهمة في تنويع مصادر إمدادات الطاقة بما يحقق أمن الطاقة. فمن الجانب البيئي، يعتبر الغاز الحيوي أداة فعالة لإدارة النفايات، التي يرتفع معدل توليدها سنوياً نتيجة نمو النشاط الاقتصادي والنمو السكاني. كما أن زيادة هجرة السكان من الريف إلى المدن تتسبب في توليد كميات أكبر من النفايات بسبب ارتفاع جودة الحياة.

فوفقاً لتقديرات برنامج الأمم المتحدة للبيئة[37]، بلغ إجمالي النفايات البلدية الصلبة التي خلَّفها العالم في عام 2020 نحو 2.1 مليار طن. ولا تنحصر المشكلة على حجم النفايات الكبير، بل إن 38% منها (ما يعادل 810 مليون طن)، صنَّفها البرنامج على أنها نفايات خارجة عن السيطرة أي أنها أُلقيت في البيئة أو حُرقت في الهواء الطلق مسببة أضراراً على البيئة والصحة. بينما تم التخلص من 13% في مردم

النفايات، أي أن ما يزيد عن نصف ما يولدَه العالم من النفايات لا يتم استغلاله على النحو الأمثل، بينما يستخدم النصف الآخر في عمليات إعادة التدوير وتحويل النفايات إلى طاقة. وعلى صعيد التوقعات، تشير تقديرات الأمم المتحدة إلى أن إجمالي حجم النفايات سيصل إلى 3.79 مليار طن بحلول عام 2050، بنسبة نمو 70% مقارنة بعام 2020 كما هو موضح بالشكل 3-1. وإذا استمرت الممارسات الحالية، فإن النفايات "الخارجة عن السيطرة" ستتضاعف إلى 1.6 مليار طن بحلول 2050، الأمر الذي سيتسبب في آثار سلبية جسيمة على الصحة العامة، والتنمية الاقتصادية والبيئة.

الشكل 3-1: آفاق نمو النفايات البلدية الصلبة (MSW) في العالم



المصدر: برنامج الأمم المتحدة للبيئة

من هذا المنطلق، فإن إدارة وتقليل هذه النفايات على نحو يساهم في تقليل الأثر البيئي لها بات أمراً ملحاً. ومن ثم فإن تطبيق تقنية الهضم اللاهوائي لهذه النفايات غير المستغلة سيساهم في إدارتها على نحو أفضل، علاوة على الاستفادة من الغاز الحيوي

كمصـــدر للطاقة. كما أن البقايا/المخلفات المهضـــومة (Digestate) غنية بعناصـــر البوتاسيوم والفسفور، وهي العناصر الضرورية لتغذية التربة الزراعية. ومن ثم يمكن اسـتغلالها كبديل عن الأسـمدة الاصـطناعية المشـتقة من الغاز الطبيعي، الأمر الذي يساهم في خفض استهلاك الوقود الأحفوري، وتقليل البصمة الكربونية.

3-1-2: الغاز الحيوي كأداة للحد من انبعاثات الميثان ودعم المبادرات الدولية

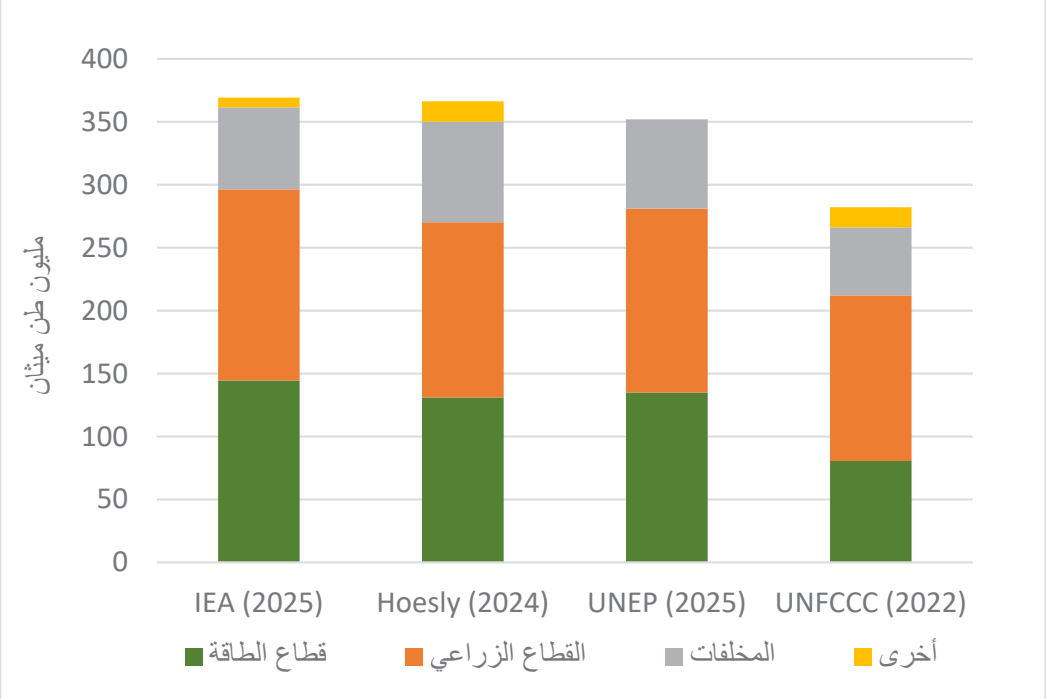
يمكن أن يســـاهم الغاز الحيوي في الحد من انبعاثات غاز الميثان الناتجة عن الأنشـــطة البشـــرية (Anthropogenic Activities)، الذي يعد ثاني أكبر مســـبب للاحتباس الحراري بعد غاز ثاني أكســـيد الكربون بســـبب قدرته العالية على حبس الحرارة. حيث تصـــل قدرته إلى 80 مرة مقارنة بغاز ثاني أكســـيد الكربون[38]. وتنبع أهمية الغاز الحيوي في هذا السياق من كونه يعالج مباشرةً مصـادر رئيسية لانبعاثات الميثان، مثل مخلفات القطاع الزراعي، والمخلفات الصلبة، وصـناعات الأغذية، ومياه الصـرف الصـناعي، وهي قطاعات ترتبط ارتباطًا وثيقًا بسـلسـلة إنتاج الغاز الحيوي والميثان الحيوي.

على الصـــعيد العالمي، هناك اختلاف في تقديرات حجم انبعاثات الميثان بســـبب صـعوبة الرصـد والإبلاغ، وتباين المنهجيات المسـتخدمة. فوفقا لتقديرات وكالة الطاقة الدولية (IEA) الصادرة عام 2025، بلغ انبعاثات الميثان حوالي 369.26 مليون طن، وهي التقديرات الأعلى عالمياً. بينما تشـــير اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشـــأن تغير المناخ (UNFCCC)، إلى أن إجمالي انبعاثات الميثان بلغ 282.14 مليون طن (وفقاً للبيانات الصادرة عام 2022)، أي أقل بنحو 24% عن تقديرات وكالة الطاقة الدولية.

كما تســـتند الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC)، إلى بيانات Hoesly كمرجعية لها، كونها من أكثر المراجع موثوقية فيما يخص انبعاثات الغازات

الدفيئة والميثان. ووفقا لـــــ Hoesly، فإن إجمالي انبعاثات الميثان بلغ نحو 366.3 مليون طن، ولذلك تعد وســـيطاً متوازناً بين تقديرات وكالة الطاقة الدولية ولجنة الأمم المتحدة لتغير المناخ. أما تقديرات برنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP) الصـادرة عام 2025، فتشير إلى أن إجمالي انبعاثات الميثان بلغ 352 مليون طن (لعام 2020)، كما هو مبين بالشكل 3-2.

الشكل 3-2: تقديرات انبعاثات الميثان عالمياً وفق عدة مصادر وتاريخ الإصدار، والقطاعات الرئيسية المسببة لها



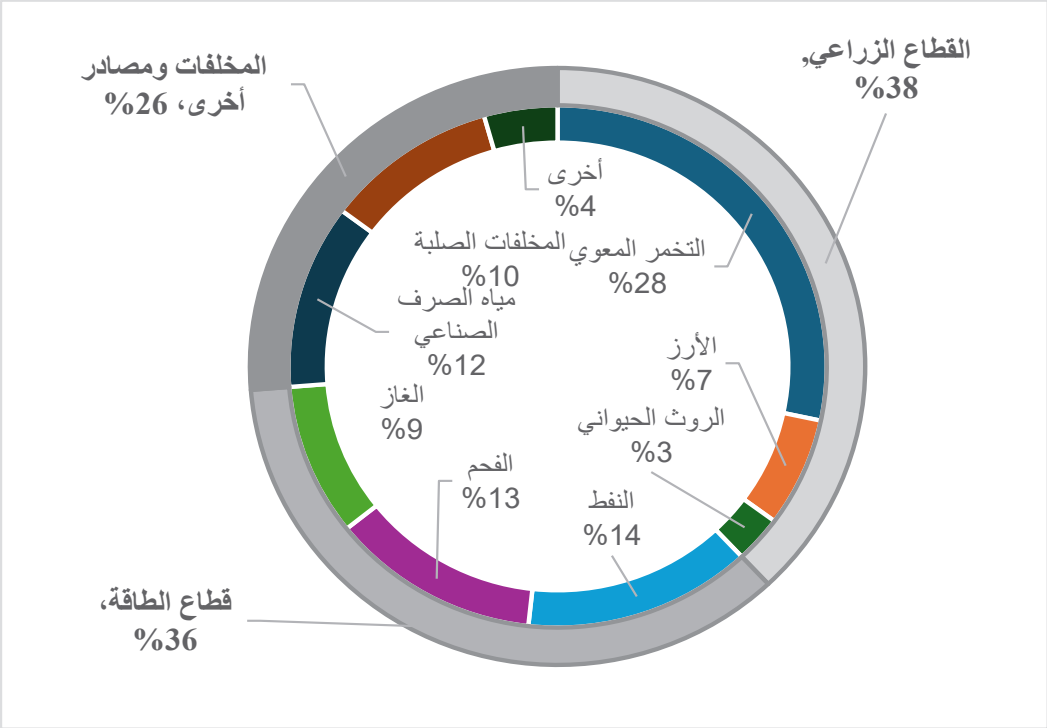
* المصادر الموضحة حسب سنة إصدار البيانات، لكنها تتحدث عن انبعاثات الميثان في عام 2020 غي أغلب الحالات

المصدر: الباحث استناداً إلى تجميع بيانات من IEA، Hoesly، UNFCCC

وبغضّ النظر عن اختلاف القيم المطلقة بين المصـــادر المختلفة، إلا أنها تتفق في أن **القطاعات الرئيســـية التي تنطلق منها انبعاثات غاز الميثان هي** القطاع الزراعي، وقطاع مصـــادر الطـاقـة الأحفوريـة (النفط، والغـاز، والفحم)، والنفايات/المخلفات الصلبة.

ووفقاً لبيانات Hoesly الموضحة بالشكل 3-3، يساهم قطاع الزراعة بنحو 38% من إجمالي الانبعاثات الناتجة عن الأنشطة البشرية، وهي موزعة بين التخمر المعوي للماشية بنسبة 28% كأكبر مصدر منفرد. أما النسبة المتبقية (10%) فتمثل الانبعاثات الناتجة عن الهضم اللاهوائي للروث الحيواني والمواد العضوية المدفونة في التربة الزراعية المستخدمة في زراعة الأرز (Rice Cultivation)[4].

الشكل 3-3: مصادر انبعاثات الميثان الناتجة عن النشاط البشري



المصدر: Hoesly et al., 2024

أما القطاع الرئيسي الثاني فهو قطاع الطاقة بنسبة 36%، نتيجة عمليات استخراج وإنتاج ونقل النفط، والغاز، والفحم. حيث تتحرر انبعاثات الميثان كانبعاثات هاربة من التسهيلات المستخدمة في عمليات الإنتاج والمعالجة مثل الضواغط، وصهاريج التخزين، وخطوط الأنابيب، والصمامات. بينما تعد النفايات المصدر الرئيسي الثالث لانبعاثات الميثان بحصة 22%، منها 12% تمثل انبعاثات الميثان

[4] عند غمر حقول الأرز بالمياه لفترة طويلة، يتم عزل التربة عن الأكسجين الموجود في الهواء الجوي. وفي هذه الظروف، تبدأ البكتريا في النشاط والتكاثر، وتقوم بتحليل المواد العضوية الموجودة في التربة، ومن ثم ينتج الميثان كمنتج ثانوي لهذه العملية.

الناتجة عن تحلل المادة العضوية في مياه الصرف الصناعي وحمأة الصرف الصحي، و10% تمثل انبعاثات الميثان من المخلفات الصلبة، والتي تأتي غالباً من مدافن النفايات أو المكبات المكشوفة.

يتضح مما سبق أن القطاعات الأكثر مساهمة في انبعاثات الميثان هي ذاتها القطاعات التي تولد المادة الخام لإنتاج الغاز الحيوي والميثان الحيوي، وبالأخص الروث الحيواني، ومخلفات البلدية الصلبة، وحمأة الصرف الصحي والصناعي. وعليه، فإن التوسع في مشاريع الهضم اللاهوائي لا يحقق إنتاج مصدر طاقة منخفض الكربون فحسب، بل يشكل في الوقت ذاته أحد أكثر الحلول فعالية من حيث التكلفة والسرعة للحد من انبعاثات الميثان عالمياً.

على الصعيد العالمي، برزت العديد من المبادرات الهادفة إلى الحد من انبعاثات الميثان، ومن أهمها التعهد العالمي للميثان (Global Methane Pledge)، والذي تم الإعلان عنه في عام 2021 أثناء انعقاد مؤتمر الأمم المتحدة للمناخ (COP26). وبحسب التعهد، فإن الدول الموقعة التزمت بتخفيض انبعاثات الميثان الخاصة بها بنحو 30% بحلول عام 2030، مقابل مستويات عام 2020. ووفقاً لتقديرات المنظمة العالمية للغاز الحيوي (World Biogas Association, WBA)[39]، فإنه يمكن تحقيق نحو 50% من التعهد العالمي لخفض الميثان، من خلال الاستثمار في تطبيق تقنية الهضم اللاهوائي للمواد العضوية الناتجة عن الروث الحواني، ومخلفات البلدية الصلبة، والحمأة.

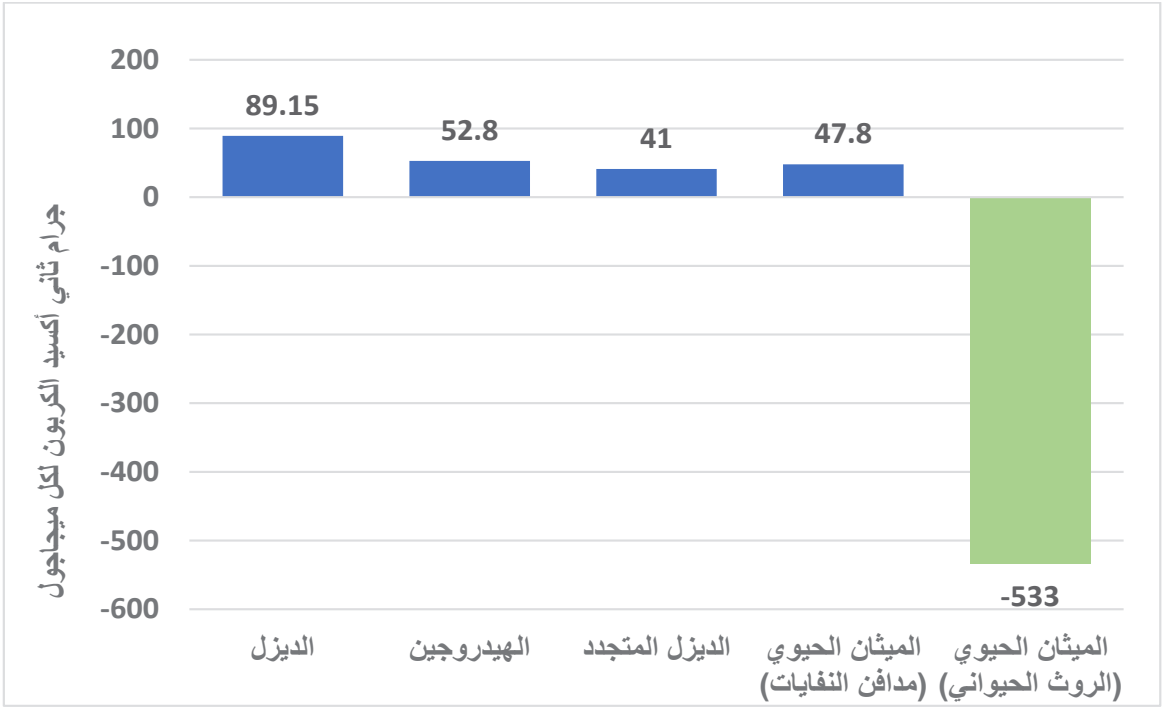
3-1-3: الغاز الحيوي كمساهم في تقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري

بجانب الفوائد البيئية من إدارة النفايات، والمساهمة في تخفيض انبعاثات الميثان، يمكن للميثان الحيوي أن يساهم في تقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري

في قطاع النقل الثقيل، مقارنة بأنواع المنتجات البترولية السائلة. بل وفي بعض الحالات تحقيق انبعاثات سالبة (Negative Emissions)، حسب نوع المادة العضوية المستخدمة في إنتاج الغاز الحيوي.

ففي ولاية كالفورنيا الأمريكية، قدر مجلس California Air Resources Board الانبعاثات الناتجة عن استخدام الميثان الحيوي المضغوط في قطاع النقل بنحو -533 جرام ثاني أكسيد الكربون المكافئ لكل ميجاجول، وذلك إذا كان مصدره الروث الحيواني. وتعود القيمة السالبة إلى مساهمة الميثان الحيوي في تخفيض انبعاثات الميثان من مزارع الأبقار (المصدر)، علاوة على الخفض الناتج في انبعاثات الاحتراق الناتجة عن استخدام الغاز نفسه كوقود للمركبات. وبالمقارنة مع مصادر الوقود الأخرى كما هو موضح بالشكل 3-4، فتصل الانبعاثات في حالة الديزل إلى 89.15 جرام ثاني أكسيد كربون مكافئ لكل ميجا جول.

الشكل 3-4: كثافة انبعاثات مصادر الوقود المختلفة في قطاع النقل



المصدر: CARB

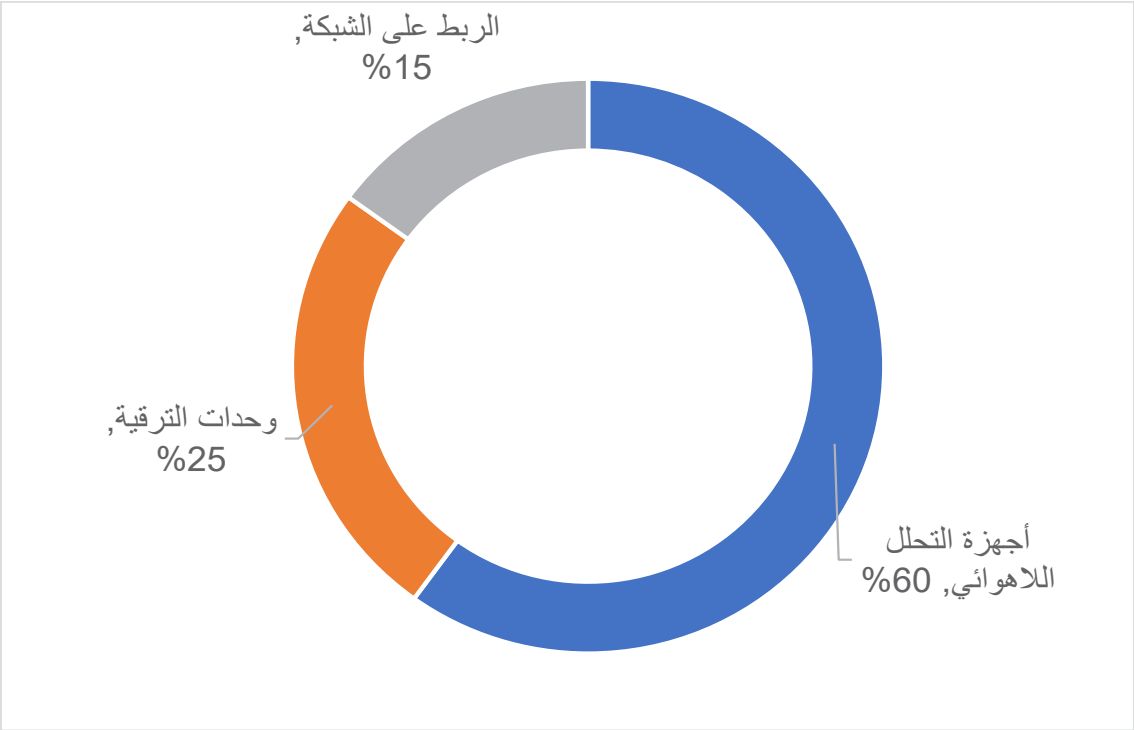
3-1-4: الجانب الاقتصادي من الاستثمار في الغاز الحيوي

بشكل عام، لا تعد التكاليف الرأسمالية لمشاريع الغاز الحيوي باهظة، بالمقارنة مع مشاريع الغاز التقليدية. لكنها تتأثر بشكل كبير بالسعة التصميمية لمحطة الإنتاج، حيث تقل التكلفة كلما ارتفعت السعة بسبب وفورات الحجم، الناتجة عن توزيع تكاليف ثابتة مثل الإدارة وأنظمة المراقبة والتراخيص على سعة تصميمية أكبر.

عملياً تؤثر عدة عوامل على التكاليف الرأسمالية والتشغيلية للمشروع، ومنها حجم المشروع، ونوع المادة العضوية المستخدمة في تغذية جهاز الهضم اللاهوائي، ونوع تكنولوجيا الترقية المستخدمة، وموقع المشروع ومدى قربه من مصادر المخلفات والبنية التحتية للغاز.

عادة يتوزع هيكل التكاليف الرأسمالية لمشروع متكامل لإنتاج الميثان الحيوي بين ثلاثة أجزاء رئيسية وهي مرحلة إنتاج الغاز الحيوي، ومرحلة ترقية الغاز الحيوي إلى ميثان، ومرحلة ما بعد الإنتاج (أي الربط على الشبكة). وفي هذا السياق، تعد وحدات الهضم اللاهوائي والوحدات المرتبطة بها المكون الرئيسي في التكلفة، حيث تمثل في المتوسط نحو 60% من إجمالي التكاليف، بينما تبلغ حصة وحدات ترقية الغاز الحيوي حوالي 25%، والنسبة المتبقية (أي 15%) هي تكلفة ربط المحطة على الشبكة المحلية، الشكل 3-5. ولا شك أن النسب الفعلية قد تختلف من مشروع لآخر ومن بلد لآخر حسب نطاق الأعمال المطلوبة، لكنها تظل مساهمة وحدات الهضم اللاهوائي هي الأكبر عموماً. كما أن حصة تكلفة الربط على الشبكة قد ترتفع بشكل حاد إذا كان موقع المشروع بعيداً عن البنية التحتية، الأمر الذي يجعل من اختيار موقع المشروع عاملاً حاسماً قد يوازي تكلفة أجهزة الهضم اللاهوائي.

الشكل 3-5: توزيع هيكل التكاليف الرأسمالية لمشروع إنتاج الميثان الحيوي



المصدر: بيانات Biomethane Industrial Partnership

واستنادا إلى بيانات الشراكة الصناعية لمنتجي الميثان الحيوي (Biomethane Industrial Partnership)[40]، والتي تعتمد على بيانات عدة شركات أوروبية، فإن التكلفة الرأسمالية تختلف باختلاف السعة التصميمية للمحطات (مثلا بـــ الكيلووات أو الميجاوات للميثان الحيوي التي تعبر ذاتها عن القدرة) على النحو التالي:

- **المحطات الصغيرة والمتوسطة (سعة 3-8 ميجاوت)**

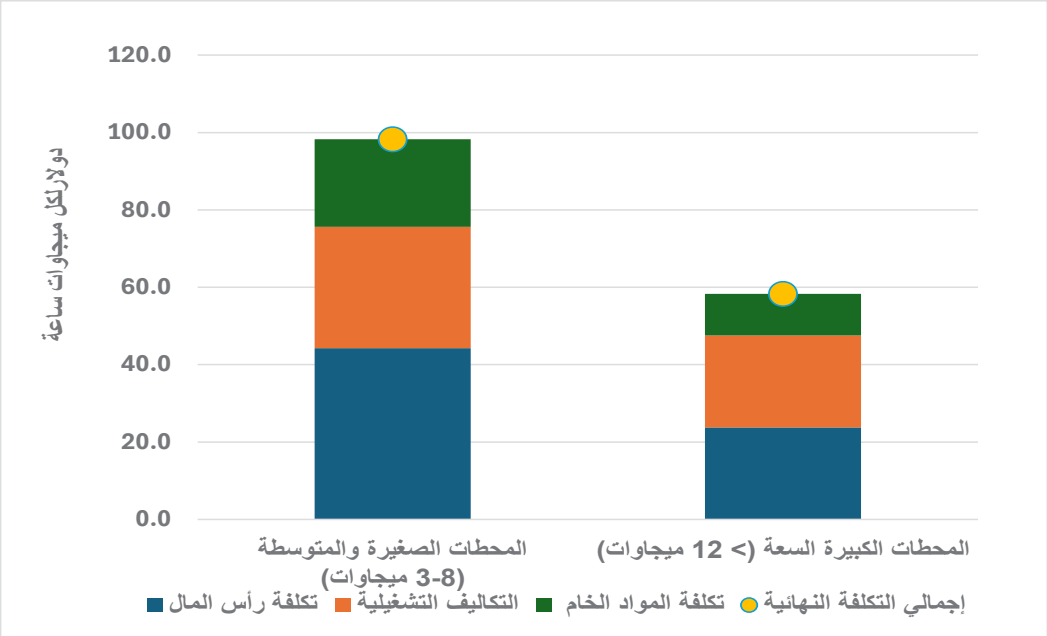
تتراوح التكلفة بين 3.78-5.94 مليون دولار لكل ميجاوات من الميثان الحيوي. وتكافئ هذه السعة معدل تدفق من الغاز الحيوي المستخدم في الترقية يعادل 4.38-11.38 مليون متر مكعب سنوياً.

- **المحطات الكبيرة (سعة أعلى من 12 ميجاوات)**

تتراجع التكلفة إلى 2.160 مليون دولار لكل ميجاوات من الميثان الحيوي. وتكافئ هذه السعة معدل تدفق من الغاز الحيوي بأعلى من 17.5 مليون متر مكعب سنوياً.

أما التكاليف التشغيلية (الدولار لكل ميجاوات ساعة منتجة)، فتقل كلما كانت الطاقة التصميمية للمحطة أعلى. وعادة ما يلجأ مشغلو المشاريع إلى فصل تكلفة المادة العضوية المستخدمة كمادة خام لإنتاج الميثان الحيوي، لتقييم كفاءة التشغيل. وفي المتوسط تصل التكاليف التشغيلية (دون احتساب تكلفة المادة العضوية) إلى نحو 31.3 دولار لكل ميجاوات ساعة من الميثان الحيوي للمحطات الصغيرة والمتوسطة، وإلى 23.8 دولار لكل ميجاوات ساعة للمحطات الكبيرة. وللمقارنة على فترة عمل المشروع (عادة 20 سنة) على النحو الذي يهم المستثمرين، يتوزع هيكل التكلفة بين المكونات الرئيسية الثلاثة وهي تكلفة رأس المال، والتكاليف التشغيلية، وتكاليف المواد الخام، كما هو مبين بالشكل 3-6.

الشكل 3-6: توزيع هيكل التكاليف لمشروع إنتاج الميثان الحيوي بين التكاليف الرأسمالية والتشغيلية والمخلفات العضوية



المصدر: من إعداد الباحث استنادا إلى بيانات BIP Europe

أما من جانب الجدوى الاقتصـــادية، فيكتســـب الغاز الحيوي جدواه من أدواره المتعددة في إدارة النفايات، وعائدات الكربون، وســـعر بيع الغاز نفســـه في الســـوق المحلي أو عبر تحويله إلى كهرباء وربطها بالشبكة. ويحسن من اقتصاديات المشروع، العوائد الاقتصـادية من بيع بواقي الهضـم الناتجة عن عملية الهضـم اللاهوائي كسـماد طبيعي.

فمن جانب إدارة النفايات، تقدر تكلفة طمر أو دفن طن واحد من النفايات في المدافن بنحو 50 دولار في أوروبا، وقد تصـــل إلى 120 دولار للطن. ومن ثم يمكن تجنب هذه التكلفة الكبيرة عبر توريدها لمنشـــآت إنتاج الغاز الحيوي. ففي بعض الحالات، يحصـل بعض المشـغلين في أوروبا على رسـوم من البلدية نظير مسـاعدتهم على التخلص من النفايات، وهي ما تعرف باسم رسوم البوابة (Gate Fees).

كما يشـكل بيع اعتمادات الكربون (Carbon Credits) حافزاً اقتصـادياً مهماً لدعم اقتصاديات مشروع الغاز الحيوي. بفضل ما يساهم به في تخفيض انبعاثات ثاني أكســـيد الكربون عند اســـتخدامه كوقود وبالأخص في قطاع النقل، الذي يعد أحد القطاعات الرئيسية للانبعاثات. أما متبقي/مخلفات الهضم، فاستخدامها كسماد عضوي طبيعي يوفر تكلفة شراء الأسمدة الصناعية عالية التكلفة المشتقة من الوقود الأحفوري. ففي عام 2024، بلغ متوسـط الطن الواحد من الأسـمدة الفوسـفاتية نحو 573 دولار، ولليوريا نحو 324 دولار. ولا تقتصـر الجدوى الاقتصـادية على العناصـر المباشـرة (بيع الغاز الحيوي، أو مخلفات الهضـم)، بل تمتد إلى مسـاهمة الغاز الحيوي في خلق فرص عمل داخل السوق المحلي، وكذلك دوره في تحقيق الأمن الطاقي.

3-2: الأهداف والسياسات الدولية الداعمة للغاز الحيوي والميثان الحيوي

3-2-1: الحوافز والأهداف الداعمة للغاز الحيوي في أوروبا

تعد أوروبا السوق الرائدة في قطاع الغاز الحيوي على مستوى العالم. وقد حظي القطاع باهتمام أكبر بعد اندلاع الأزمة الروسية الأوكرانية في فبراير 2022. حيث اتخذت المفوضية الأوروبية إجراءات وتدابير لإيقاف الاعتماد على إمدادات الغاز الروسي[41] الذي كان يلبي نحو 45% من احتياجات أوروبا من الغاز قبل عام 2022. ولتحقيق هذا الهدف، أصدرت المفوضية الأوروبية خطة (REPower EU) والتي وضعت هدفاً للوصول بإنتاج الغاز الحيوي إلى 35 مليار متر مكعب بحلول عام 2030، أي نحو عشرة أمثال الإنتاج الأوروبي في عام 2022، والذي بلغ حينها 3.5 مليار متر مكعب.

وامتثالاً لتلك التوصيات، أعلنت عدة دول أوروبية عن الإجراءات والتدابير الوطنية لإنتاج الميثان الحيوي، ضمن ما يعرف بالخطة الوطنية للطاقة والمناخ (NECP)، والتي تقوم كل دولة أوروبية بتحديثها كل سنتين، وتسليمها إلى المفوضية الأوروبية، وتتضمن آليات إدارة قطاع الطاقة على المستوى الوطني، وكيفية معالجة قضايا المناخ على المدى المتوسط. وقد تباينت الدول في خططها من حيث الفصل بين الغاز الحيوي والميثان الحيوي، فمنها ما وضع هدف مجمع للاثنين معها مثل إسبانيا التي وضعت هدفاً مجمعاً لإنتاج الغاز الحيوي والميثان الحيوي بإجمالي 20 تيراوات ساعة (يعادل 2 مليار متر مكعب) بحلول عام 2030. بينما حددت دول أخرى هدفاً مستقلاً للميثان الحيوي، ومن بينها إيطاليا التي وضعت هدف لإنتاج 5.7 مليار متر مكعب سنوياً بحلول 2030. وبحسب أحدث وثيقة صادرة[42] عن المفوضية الأوروبية في عام 2025، يبلغ مجموع أهداف إنتاج الميثان الحيوي من دول الاتحاد الأوروبي نحو 15.2 مليار متر مكعب سنوياً بحلول 2030، كما هو موضح بالجدول 3-1. وبتضمين خطط إنتاج الغاز الحيوي، سيرتفع إجمالي الإنتاج المستهدف إلى 25.85

مليار متر مكعب سنوياً بحلول عام 2030. ومن ثم لا تزال الدول الأوروبية بعيدة عن تحقيق الهدف الذي وضعته المفوضية الأوروبية، لكن من المتوقع أن تشهد الفترة المقبلة إعلان المزيد من الدول عن أهدافاً محددة للميثان الحيوي ضمن الخطط المحدثة.

الجدول 3-1: أهداف إنتاج الميثان الحيوي الموضحة في الخطط الوطنية لدول الاتحاد الأوروبي

الدولة	هدف إنتاج الميثان الحيوي بحلول عام 2030	ملاحظات
إيطاليا	5.7 مليار متر مكعب سنوياً	خطة إيطاليا هي الأكثر طموحاً في الاتحاد، حيث تم تخصيص الدعم بالكامل لتحويل محطات الغاز الحيوي إلى ميثان حيوي للحقن في الشبكة
فرنسا	4.4-5 مليار متر مكعب سنوياً	الهدف حسب الخطة هو حقن 44-50 تيراوات ساعة من الميثان الحيوي في الشبكة كبديل للغاز الطبيعي
هولندا	2 مليار متر مكعب سنوياً	-
الدانمارك	1.2 مليار متر مكعب سنوياً	الخطة الدنماركية هي الأكثر طموحاً حيث تهدف لاستبدال 100% من غاز الشبكة بميثان حيوي بحلول 2030.
إيرلندا	0.57 مليار متر مكعب سنوياً	وضعت الخطة (أو 5.7 TWh)؛ الهدف موجه حصرياً لإنتاج الميثان الحيوي كوقود للنقل والتدفئة الصناعية
جمهورية التشيك	0.5 مليار متر مكعب سنوياً	حددت هدفاً لتحويل 500 مليون متر مكعب للميثان الحيوي
البرتغال	0.2 مليار متر مكعب سنوياً	وضعت الخطة هدف 2 تيراوات ساعة ضمن "خطة عمل الميثان الحيوي" الوطنية
الإجمالي	15.2 مليار متر مكعب سنوياً	-

المصدر: من تجميع الباحث استنادا إلى الخطط الوطنية للدول الأوروبية

3-2-2: الحوافز والأهداف الداعمة للغاز الحيوي في أمريكا الشمالية

تختلف استراتيجية أمريكا الشمالية عن الاتحاد الأوروبي في طبيعة السياسات الداعمة للغاز الحيوي والميثان الحيوي. فبينما يضع الاتحاد الأوروبي أهدافاً "مركزية" لدول الاتحاد (مثل هدف الوصول بالإنتاج إلى 35 مليار متر مكعب سنوياً)، تعتمد الولايات المتحدة وكندا على حوافز السوق والتشريعات الضريبية بدلاً من وضع رقم مستهدف للإنتاج.

ففي **الولايات المتحدة**، استمد القطاع جاذبيته من خلال قانون خفض التضخم الأمريكي (Inflation Reduction Act, IFR)، والذي تم تمريره عام 2022. وبموجب القانون، يمكن توفير ائتمانات ضريبية للاستثمار بما يتراوح بين 6% إلى 30% من تكلفة إنشاء محطة الغاز الحيوي، ويسري العمل بهذا الحافز حتى عام 2028. أما من حيث الأهداف، فلا يوجد هدف محدد لإنتاج الغاز الحيوي أو الميثان الحيوي على المستوى الوطني، بل موجود ضمنياً ضمن أهداف نزع الكربون. فإدارة معلومات الطاقة الأمريكية وضعت أهدافاً لخفض انبعاثات قطاع النقل في الولايات المتحدة بنسبة 100% بحلول عام 2050 [43]، وذلك من خلال إنتاج كميات كافية من الوقود الحيوي بأنواعه المختلفة (مثل الغاز الحيوي، والميثان الحيوي). ويعد قطاع النقل أكبر قطاع مسبب للانبعاثات، حيث يساهم وحده بنحو ثلث حجم انبعاثات غازات الاحتباس الحراري في الولايات المتحدة. ويأتي هذا الهدف اتساقاً مع هدف الوصول إلى صافي صفر انبعاثات للاقتصاد الأمريكي بحلول عام 2050.

وفي **كندا**، بدأ قطاع الميثان الحيوي في النمو بوتيرة متسارعة منذ 2020. حيث تحفز السلطات الفيدرالية على الاستثمار في قطاع الميثان الحيوي، وذلك من خلال لوائح/تنظيمات الوقود النظيف (Clean Fuel Regulations, CFR)، وصندوق تمويل الوقود النظيف (Clean Fuel Fund). فالصندوق-الذي تم تأسيسه عام 2021 بتمويل 1.5 مليار دولار كندي من الميزانية الفيدرالية-وضع مشاريع الغاز الحيوي والميثان الحيوي ضمن القطاعات ذات الأولوية.

أما من حيث الأهداف، فقد وضعت جمعية الغاز الحيوي الكندية (Canadia Biogas Association, CBA) ممثلة بأعضائها، هدفاً لخلط الميثان الحيوي في شبكة الغاز الطبيعي التقليدي، بنسبة 10% بحلول عام 2030، مقارنة بنسبة الخلط الحالية المقدرة بـ1%. ولتحقيق هذا الهدف، يجب أن يصل إنتاج الميثان

الحيوي إلى نحو 4 مليار متر مكعب سنوياً، وذلك استناداً إلى استهلاك الغاز في القطاع السكني والتجاري في كندا في عام 2024.

3-2-3: الحوافز والأهداف الداعمة للغاز الحيوي في آسيا

تعتمد البلدان الآسيوية المهتمة بالغاز الحيوي على استغلاله كحل لمشكلة إدارة النفايات، وتحقيق الأمن الطاقي للصناعات المحلية. ففي الصين على سبيل المثال، بدأ التوجه نحو دعم الميثان الحيوي عام 2015، حيث قدمت وزارة الشؤون الزراعية والريفية (Ministry of Agriculture and Rural Affairs) دعماً لنحو 64 مشروعا لإنتاج الميثان الحيوي خلال 2015-2017 بغرض تقييم الجدوى الاقتصادية وتحديد أفضل التقنيات التي يمكن تطبيقها. كما دعت الخطة الخمسية الرابعة عشر (14th FYP) في الجزء الخاص بتطوير الطاقة المتجددة، إلى التوسع في تنفيذ مشاريع الميثان الحيوي على مستوى الدولة، مع التركيز على المناطق الغنية بالمخلفات العضوية. كما أكدت الخطة على ضرورة التركيز على المشاريع ذات الطاقة الإنتاجية التي تزيد عن 10 مليون متر مكعب سنوياً، بغرض ربط إنتاجها مع شبكات التوزيع الخاصة بالغاز الطبيعي.

أما من حيث الأهداف، فتعد الصين ذات الطموح الأعلى إذ وضع مجلس الدولة الصيني (China State Council) هدفاً لإنتاج 10 مليار متر مكعب سنويا من الغاز الحيوي والميثان الحيوي بحلول عام 2025، ثم رفعه إلى **20** مليار متر مكعب سنوياً بحلول عام 2030.

أما في **الهند**، فقد أقرت الحكومة سياسات داعمة للغاز الحيوي المضغوط كما يعرف في الهند (Compressed Biogas, CBG)، من خلال برامج ومبادرات لتحويل النفايات إلى طاقة، ودعم بدائل الوقود المستدام.

كما تعد مبادرة SATAT من المبادرات الوطنية الداعمة للغاز الحيوي، حيث وضعت توصية لبناء 5,000 محطة للغاز الحيوي المضغوط بطاقة إنتاجية 15 مليون طن سنوياً (ما يعادل 15 مليار متر مكعب سنوياً). أما من حيث أهداف التوسع في إنتاج الغاز الحيوي والميثان الحيوي وخلطه في الشبكة، فأصدرت اللجنة الوطنية للوقود الحيوي في نوفمبر 2023[44]، أهدافاً لخلط الميثان الحيوي في شبكة غاز المدينة بنسبة 1% في العام المالي 2025-2026 مع رفعها تدريجياً بنسبة 1% سنوياً لتصل النسبة إلى 5% بحلول العام المالي 2029/2028. ووفق اللجنة، فإن الأهداف ستكون اختيارية للعام الأول، ثم إلزامية في الأعوام التالية له.

3-2-4: الحوافز والأهداف الداعمة للغاز الحيوي في أمريكا الجنوبية

تعد البرازيل الدولة الرائدة في مجال الغاز الحيوي في أمريكا الجنوبية، ولديها المئات من محطات الهضم اللاهوائي لإنتاج الغاز الحيوي بغرض توليد الطاقة الكهربائية. ومؤخراً، اتجهت البرازيل نحو إنتاج الميثان الحيوي، الذي بات يستحوذ على 37% من إنتاج الغاز الحيوي. وتعتمد البرازيل في استراتيجيتها للغاز الحيوي على استغلال مكانتها كقوة زراعية عالمية، حيث يُنظر إلى الميثان الحيوي كأداة رئيسية لخفض الانبعاثات في قطاع النقل الثقيل، وتقليل الاعتماد على الأسمدة المستوردة.

وبدأ التحول النوعي مع إطلاق السياسة الوطنية للوقود الحيوي (RenovaBio) عام 2017، وهي المبادرة التي وضعت إطاراً قانونياً لربط إنتاج الوقود الحيوي بأهداف بيئية ملموسة عبر إصدار شهادات إزالة الكربون (CBIOs) التي تُباع في البورصة، مما وفر حافزاً اقتصادياً دائماً للمنتجين بعيداً عن الدعم الحكومي المباشر.

وفي عام 2022، أطلقت الحكومة الفيدرالية البرنامج الوطني لصفر ميثان (Metano Zero)، والذي ركز على تحويل المخلفات العضوية من قطاعات قصب السكر، والروث الحيواني، ومدافن النفايات إلى ميثان حيوي. ويهدف البرنامج إلى خلق "ممرات خضراء" لقطاع النقل الثقيل، حيث يتم استخدام الميثان الحيوي كبديل للديزل في الشاحنات والحافلات، خاصة في المناطق الريفية والمراكز اللوجستية الكبرى. كما تضمنت التشريعات الأخيرة لعام 2024 ضمن قانون وقود المستقبل (Fuels of the Future Law)، حوافز لربط محطات الإنتاج الكبرى بشبكات أنابيب الغاز الطبيعي، لضمان وصول الميثان الحيوي إلى المراكز الصناعية الساحلية.

أما من حيث الأهداف، فتعد **البرازيل** "العملاق الصاعد" في هذا المجال. حيث تقدر الجمعية البرازيلية للغاز الحيوي (ABiogás) الإمكانات التقنية الإجمالية بنحو 84.6 مليار متر مكعب سنوياً. وقد حددت الرؤية الاستراتيجية للحكومة هدفاً للوصول إلى إنتاج 30 مليون متر مكعب يومياً (أي ما يعادل تقريباً 11 مليار متر مكعب سنوياً) بحلول عام 2030، وهو طموح يضع البرازيل في منافسة مباشرة مع الصين كأحد أكبر منتجي الميثان الحيوي في العالم خارج الاتحاد الأوروبي.

3-2-5: المقارنة بين مناطق العالم المختلفة

تُظهر المراجعة الدقيقة للمشهد الدولي لسياسات الغاز الحيوي تبايناً جوهرياً في الفلسفة التنظيمية والدوافع الاستراتيجية بين المناطق الكبرى. فبينما تقود أوروبا القطاع بدوافع أمن الطاقة عبر وضع أهدافاً مركزية صارمة، تتبنى أمريكا الشمالية نموذجاً قائماً على مرونة السوق والحوافز الضريبية لخفض تكلفة التحول. وفي المقابل، تبرز آسيا وأمريكا الجنوبية كقوى صاعدة تربط إنتاج الميثان الحيوي بضرورات محلية ملحة، تتراوح بين المعالجة البيئية للنفايات كما هو الحال في الصين والهند، وبين تعظيم القيمة المضافة للقطاع الزراعي كما هو الحال في البرازيل.

هذا التنوع في المسارات، وإن اختلف في الوسائل، يلتقي عند نقطة واحدة وهي جعل الغازات الحيوية أداة مهمة لإزالة الكربون من القطاعات الاقتصادية مثل الكهرباء والنقل، كما يوضح الجدول المقارن التالي.

الجدول 3-2: مقارنة بين الحوافز والأهداف لإنتاج الغاز الحيوي في مناطق مختارة

وجه المقارنة	أوروبا	أمريكا الشمالية	آسيا	أمريكا الجنوبية
أمثلة	الاتحاد الأوروبي	الولايات المتحدة، كندا	الصين، الهند	البرازيل
المحرك الرئيسي	الأمن الطاقي والتحول الأخضر	حوافز السوق	إدارة النفايات وتأمين طاقة للصناعات المحلية	إدارة النفايات الزراعية مثل مخلفات قصب السكر وتقليل استيراد الأسمدة
السياسات الداعمة	**خطط مركزية ووطنية:** هداف REPowerEU والخطة الوطنية للطاقة والمناخ	**تشريعات ضريبية:** قانون خفض التضخم ولوائح الوقود النظيف في الولايات المتحدة، وصندوق الوقود النظيف في كندا	**خطط خماسية ومبادرات** عبردعم مشاريع كبرى في الصين، وبرنامج SATAT في الهند	**سوق الكربون:** برنامج (RenovaBio) وشهادات (CBIOs) وقانون وقود المستقبل
الأهداف لعام 2030	إنتاج 35 مليار متر مكعب سنوياً	التخلص من انبعاثات قطاع النقل الأمريكي بحلول 2050	**الصين:** إنتاج 10 مليار متر مكعب سنوياً	الرؤية الاستراتيجية للحكومة تقضي بإنتاج 11 مليار متر مكعب سنوياً
	مجموع الأهداف الوطنية للدول الأوربية بلغ 15.2 مليار متر مكعب سنوياً	**كندا:** خلط الميثان الحيوي بنسبة 10% في الشبكة (يعادل 4 مليار متر مكعب)	**الهند:** خلط إلزامي يصل إلى 5% في الشبكة بحلول 2029	
الاستخدام، التوجه التقني	الحقن في الشبكة	استخدام الميثان الحيوي كوقود في قطاع النقل	ربط المشاريع الكبرى بشبكات التوزيع	استبدال الديزل في الشحن الثقيل، وربط المزارع بالصناعة

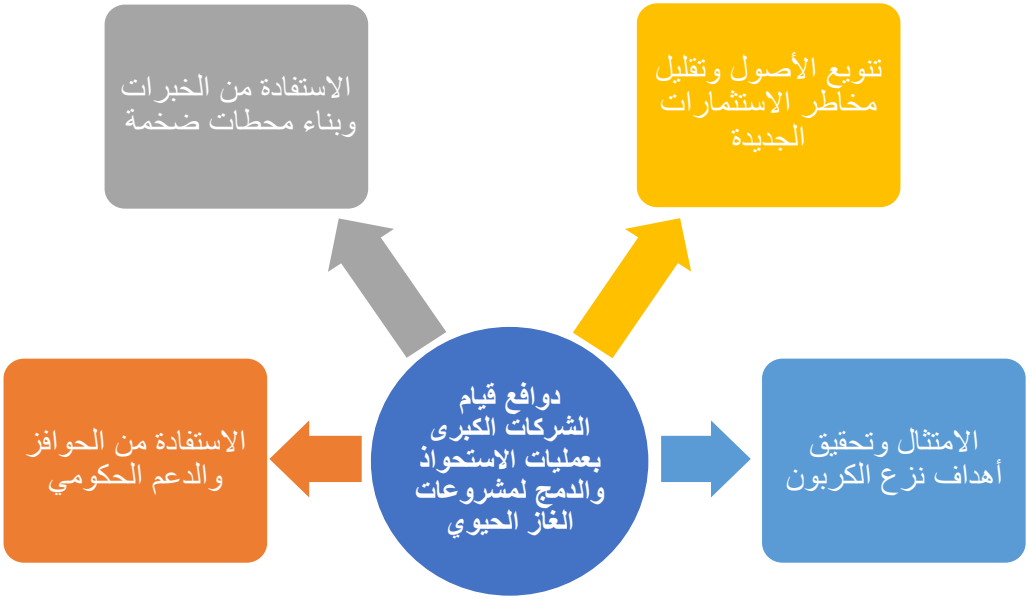
المصدر / الباحث

3-3: شركات الطاقة العالمية تدخل سباق الغاز الحيوي

أبدت شركات الطاقة العالمية اهتماماً كبيراً في السنوات الخمس الأخيرة بالدخول في قطاع الغاز الحيوي، من خلال تنفيذ عدة صفقات للاستحواذ والدمج للمشاريع الصغيرة والمتوسطة في عدة أسواق. حيث شهدت الفترة 2021-2025، تنفيذ عدة صفقات قامت بها أكبر الشركات العالمية مثل شركة BP، و Shell وExxonMobil وغيرها، للاستحواذ على محافظ مشاريع كاملة أو شركات تشغيل قائمة.

ويشير هذا التطور إلى حدوث تحول هيكلي في قطاع الغاز الحيوي من شركات محلية أو مطورين محليين إلى مرحلة تكتل مؤسسي تقوده شركات الطاقة العالمية. ويعود قيام الشركات الكبرى بهذه الخطوات إلى الدوافع الموضحة بالشكل 3-7.

الشكل 3-7: دوافع قيام شركات الطاقة الكبرى بعمليات الاستحواذ على مشاريع الغاز الحيوي



المصدر: الباحث

3-3-1: الامتثال وتحقيق أهداف نزع الكربون

بشكل عام تضع الشركات العالمية لنفسها أهدافاً لخفض البصمة الكربونية أو كثافة الكربون (Carbon Intensity) لعملياتها التشغيلية الموزعة في مناطق استثماراتها. ويعد قطاع الغاز الحيوي من أقل الخيارات في التكلفة لتحقيق خفض في الانبعاثات من عمليات التشغيل وبالأخص من خلال استخدامه في قطاعي النقل والصناعة، مقارنة ببدائل أخرى عالية المخاطر مثل الهيدروجين. فالشركات العالمية كانت تخطط للاستثمار بقوة في قطاع الهيدروجين لتخفيض البصمة الكربونية، إلا أن ارتفاع التكاليف الرأسمالية، وعدم إبرام تعاقدات لبيعه، وصعوبة الحصول على التمويل، أحدث تراجعاً في هذه الخطط. الأمر الذي أسفر عن قيام عدة شركات

بالإعلان عن تأجيل وإلغاء عشرات المشاريع في عدة مناطق. ومن ثم فإن الاستثمار في مشاريع الغاز الحيوي سيسمح لهذه الشركات تخفيض البصمة الكربونية لعملياتها التشغيلية، ومن ثم تقليل مخاطر الاستثمار.

3-3-2: الاستفادة من الحوافز والدعم الحكومي

تحقق مشاريع الغاز الحيوي عوائد اقتصادية مرتفعة في بعض الأسواق مثل أوروبا والولايات المتحدة، مدفوعة بالسياسات ولوائح الوقود النظيف وليس فقط من بيع الغاز الحيوي. وبذلك تضمن الشركات العالمية الحصول على عائد ثابت من الاستثمار في مشاريع الغاز الحيوي.

3-3-3: تنويع الأصول وتقليل مخاطر الاستثمارات الجديدة

مع تصاعد حالة عدم اليقين بخصوص مستقبل الطلب على بدائل الوقود مثل الهيدروجين، تسعى الشركات الكبرى إلى تنويع أصولها باستخدام مصادر قليلة المخاطر وقابلة للاندماج في منظومة الطاقة الحالية دون الحاجة إلى إحداث تغييرات جذرية في البنية التحتية أو تأسيس بنية تحتية كاملة جديدة تحتاج إلى تكاليف رأسمالية عالية.

3-3-4: الاستفادة من الخبرات المحلية، وتوحيد المقاييس

تستطيع الشركات العالمية من خلال عمليات الاستحواذ، الاستفادة من خبرات الشركات المحلية المطورة لمشاريع الغاز الحيوي دون الانخراط من البداية. وهو الأمر الذي يمكنها من نقل المعرفة والخبرات لتنفيذ مشاريع أخرى في أسواق جديدة. كما أنها تستطيع بحكم مكانتها وملاءتها المالية، تحسين شروط التمويل لبناء مشاريع جديدة، وكذلك توحيد معايير هذا القطاع.

بحسب عمليات الاستحواذ والشراكة التي قامت بها الشركات العالمية المبينة بالجدول 3-3، يتضح أن موجة الاستحواذ لا تعكس توجهاً بيئياً فحسب، بل توجهاً مدروساً لإعادة تسويق الغاز كوقود نهائي وليس انتقالي في عملية تحول الطاقة. كما أن زخم عمليات الاستحواذ ظهر بشكل كبير فور حدوث الأزمة الروسية الأوكرانية، بدوافع تحقيق أمن الطاقة وتنويع مصادر إمدادات الغاز، خاصة وأن تنفيذ مشاريع الميثان الحيوي يمكن تنفيذها ودخولها حيز التشغيل خلال فترات زمنية قصيرة (1-3 سنوات).

الجدول 3-3: عمليات الاستحواذ والشراكة التي قامت بها شركات الطاقة العالمية خلال 2020-2025

المشتري	البائع / الشريك	الدولة	قيمة الصفقة	السنة	طبيعة الصفقة	المشروع / الوصف
Naturgy	ID Energy	إسبانيا	500 مليون يورو	2025	شراكة	تطوير 20 مشروعاً للميثان الحيوي في إسبانيا بقدرة 1600 جيجاواط ساعة سنوياً، على أن تكون قيد التشغيل 2026-2028
Shell	Hashog Biogas	الدنمارك	غير معلنة	2025	استحواذ	استحواذ على مرافق قائمة لإعادة تطويرها وتحديثها لإنتاج الميثان الحيوي
Naturgy	Hispania Silva	إسبانيا	غير محدد	2025	شراكة	تحالف لبناء ما يصل إلى 30 محطة ميثان حيوي في إسبانيا قبل عام 2030
BP	BP Bunge Bioenergia	البرازيل	1.4 مليار دولار	2024	استحواذ	إتمام الاستحواذ على حصة 50% المتبقية للسيطرة الكاملة على الشركة الرائدة في البرازيل
Naturgy	Recycle	إسبانيا	غير معلنة	2024	استحواذ	الاستحواذ على حصة في الشركة لضمان سلاسل إمداد النفايات العضوية لمشاريعها
Repsol	Genia Bioenergy	إسبانيا	غير معلنة	2024	استحواذ	الاستحواذ على حصة 40% في شركة Genia Bioenergy والتي تشمل 19 محطة للميثان الحيوي قيد التطوير، و11 محطة في مراحل تطوير أولية
Nordic St1	Biokraft(السويد) St1 Biogas و Assets	السويد	غير معلنة	2024	دمج	دمج كامل لشركة Biokraft مع أصول St1 لتشكيل أكبر منتج للميثان الحيوي في شمال أوروبا
TotalEnergies	Vanguard Renewables	الولايات المتحدة	غير معلنة	2024	شراكة	شراكة استراتيجية لتطوير وتشغيل 10 مشاريع لإنتاج الميثان الحيوي في الولايات المتحدة، بقدرة إنتاجية تصل إلى 0.8 تيراواط-ساعة بحلول 2025
Vitol	BioMethane Partners	الولايات المتحدة	غير معلنة	2024	استحواذ	الاستحواذ على شركة BioMethane Partners لتطوير مشاريع الميثان الحيوي والغاز الحيوي المسال (Bio-LNG)
TotalEnergies	Polska Grupa Biogazowa (PGB)	بولندا	غير معلنة	2023	استحواذ	الاستحواذ على شركة PGB، المطور والمشغل الأكبر للغاز الحيوي في بولندا، بطاقة إنتاجية تصل إلى 0.4 تيروات-ساعة سنوياً من الميثان الحيوي

المشتري	البائع / الشريك	الدولة	قيمة الصفقة	السنة	طبيعة الصفقة	المشروع / الوصف
TotalEnergies	Ductor	فنلندا	غير معلنة	2023	استحواذ	الاستحواذ على شركة Ductor المتخصصة في تكنولوجيا معالجة المخلفات العضوية عالية النيتروجين لإنتاج الغاز الحيوي.
Shell	Nature Energy	الدانمارك	2 مليار دولار	2023	استحواذ	الاستحواذ على شركة Nature Energy، الرائدة في تطوير وتشغيل مرافق الغاز الحيوي والميثان الحيوي في أوروبا
Marathon Petroleum	LF Bioenergy	الولايات المتحدة	50 مليون دولار	2023	استحواذ	الاستحواذ على حصة 49% في شركة LF Bioenergy، المطور الأمريكي الناشئ لمشاريع الميثان الحيوي من مدافن النفايات
Varo Energy	Bio Energy Groenvorden BV	هولندا	غير معلنة	2023	استحواذ	الاستحواذ على شركة Bio Energy Groenvorden بهدف توسيع محفظة إنتاج الغاز الحيوي والميثان الحيوي في هولندا
Varo Energy	Renewable Energy Services BV	هولندا	غير معلنة	2023	استحواذ	الاستحواذ على شركة Renewable Energy Services لإضافة قدرة إنتاجية تصل إلى 1 تيراواط-ساعة سنوياً من الميثان الحيوي
BP	Archaea Energy	الولايات المتحدة	4.1 مليار دولار	2022	استحواذ	الاستحواذ على شركة Archaea Energy لتطوير وتشغيل مرافق إنتاج الغاز الطبيعي المتجدد من مدافن النفايات عبر الولايات المتحدة، بإنتاج يقارب 400 مليون قدم مكعب يومياً من الميثان الحيوي
Chevron	Beyond6	الولايات المتحدة	غير معلنة	2022	استحواذ	الاستحواذ على شركة Beyond6 وتوسيع شبكة محطات الغاز الطبيعي المتجدد في كاليفورنيا.
Naturgy	Elena Bioenergy	إسبانيا	غير معلن	2021	استثمار مباشر	تشغيل أول محطة ميثان حيوي، مع حقن الغاز مباشرة في الشبكة الإسبانية
Shell	RNG Junction City	الولايات المتحدة	غير معلن	2021		بدء تشغيل منشأة كبرى لإنتاج الغاز الطبيعي المتجدد من مزارع الألبان لخدمة قطاع النقل
BP	Clean Energy	الولايات المتحدة	غير معلنة	2021	شراكة	مشروع مشترك لتطوير وتشغيل مشاريع الغاز الطبيعي المتجدد في المزارع الزراعية، بما في ذلك مزارع الألبان، مع شراء حصة في شركة Clean Energy تبلغ 20%
BP	Gaselec	المملكة المتحدة	غير معلنة	2021	استحواذ	الاستحواذ على حصة 28.75% في شركة Gaselec، أكبر مزود للغاز الحيوي المستخدم في النقل في بريطانيا
TotalEnergies	Fonroche Biogaz	فرنسا	غير معلنة	2021	استحواذ	الاستحواذ على شركة Fonroche Biogaz، المطور الفرنسي لمشاريع الغاز الحيوي، وتشغيل 30 محطة في أوروبا وإفريقيا وأمريكا الجنوبية
TotalEnergies	Clean Energy	الولايات المتحدة	400 مليون دولار	2021	استحواذ	الاستحواذ على حصة 50% في شركة Clean Energy لتسريع تطوير مشاريع الغاز الطبيعي المتجدد في الولايات المتحدة، مع هدف الوصول إلى 15% من سوق الوقود منخفض الكربون.
ENI	FRI-EL Biogas Holding	إيطاليا	غير معلنة	2021	استحواذ	الاستحواذ على شركة FRI-EL Biogas التي تمتلك وتشغل محطات غاز حيوي متعددة في إيطاليا، وتشمل إنتاج الكهرباء من الغاز الحيوي ومعالجة الغاز الحيوي لإنتاج الميثان الحيوي.
Chevron	Brightmark LLC	الولايات المتحدة	غير معلنة	2020	استثمار مباشر	استثمار في شركة Brightmark لتطوير وتشغيل أنظمة إدارة الغاز الطبيعي المتجدد من مدافن النفايات، ومخلفات المزارع
Chevron	California Bioenergy LLC & CalBio	الولايات المتحدة	غير معلنة	2020	شراكة	شراكة استراتيجية للاستثمار في مشاريع الغاز الحيوي الزراعي في كاليفورنيا، بما في ذلك منشآت هضم لاهوائي

المصدر: من تجميع الباحث استناداً إلى بيانات الشركات المطورة ([45]،[46]،[47]،[48]،[49])

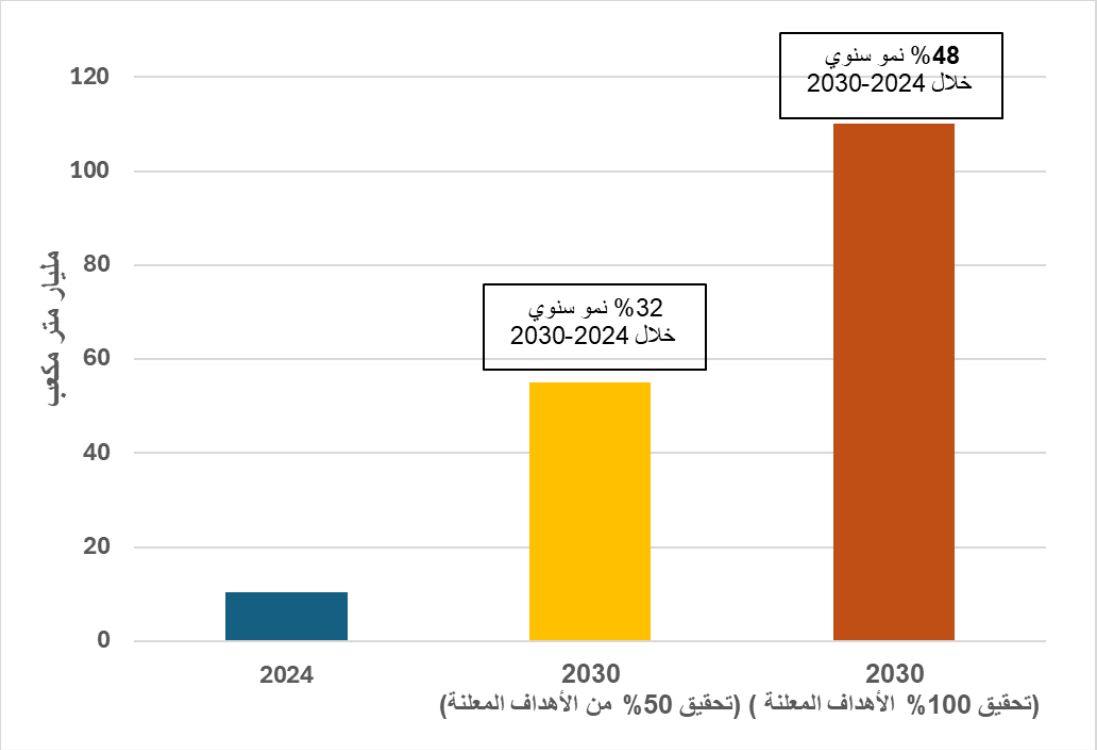
3-4: آفاق إنتاج الميثان الحيوي

تعد السياسات الحالية التي تبنتها العديد من الدول في أوروبا وآسيا والأمريكيتين، وكذلك شركات الطاقة العالمية، داعمة لنمو قطاع الغازات الحيوية خلال السنوات المقبلة. فبفضل تلك السياسات، انتقلت الغازات الحيوية من مجرد حل بيئي ثانوي إلى أحد أدوات دعم الأمن الطاقي.

وبناءً على رصد الأهداف الرسمية المعلنة على مستوى الدول والتكتلات الدولية، فإن مجموع تلك الطموحات الحكومية يصل إلى 109 مليار متر مكعب سنوياً من الميثان الحيوي بحلول عام 2030. وإن تحققت هذه الطموحات، فستحدث قفزة هائلة في إنتاج الميثان الحيوي تصل إلى عشرة أمثال الإنتاج عام 2024. وبعبارة أخرى، فإن تحقيق تلك الأهداف يتطلب نمواً سنوياً مركباً 48% خلال الفترة 2024-2030. لكن بالنظر إلى وتيرة المشروعات الحالية، تظل هذه الأهداف "طموحة للغاية"، حيث تشير تقديرات وكالة الطاقة الدولية (IEA) في سيناريو التعهدات المعلنة (APS) إلى إمكانية تحقيق 67 مليار متر مكعب فقط، الأمر الذي يكشف عن فجوة تنفيذية تستوجب تحركاً جذرياً في الحوافز الاستثمارية.

وعلى سبيل المقارنة الواقعية، فإن تحقيق نحو 50% فقط من الأهداف المعلنة للحكومات والتكتلات الإقليمية، يعني وصول الإنتاج العالمي من الميثان الحيوي إلى 54.5 مليار متر مكعب سنوياً بحلول عام 2030. ويتماشى هذا السيناريو المفترض بشكل كبير مع التوقعات المتحفظة لوكالة الطاقة الدولية، ويمثل نمواً سنوياً أقل تسارعاً تصل نسبته إلى 32% خلال الفترة 2024-2030، كما موضح بالشكل 3-8.

الشكل 3-8: آفاق نمو إنتاج الميثان الحيوي وفق الأهداف المعلنة بحلول عام 2030

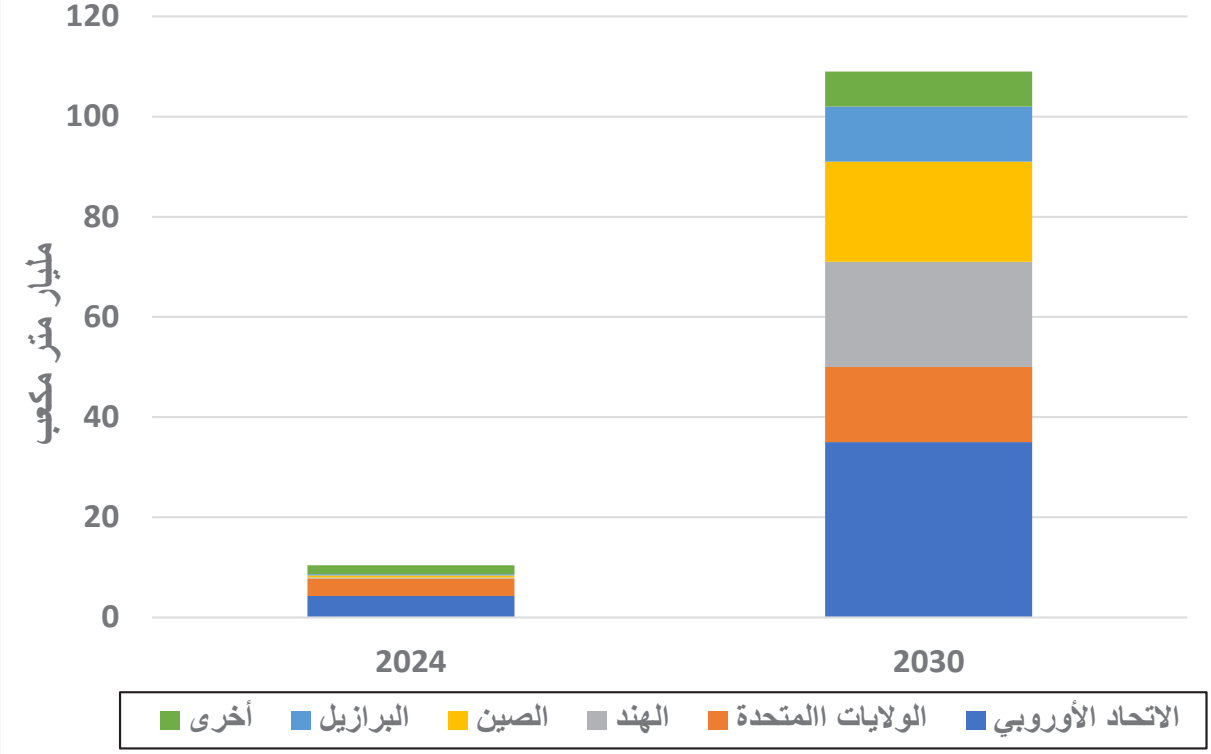


المصدر: الباحث

أما على مستوى الدول والتكتلات الدولية، فتعد أوروبا ذات الطموح الأعلى، إذ تمثل أهدافها المعلنة (35 مليار متر مكعب سنوياً)، ما يعادل نحو ثلث الطموح العالمي. تليها الهند بأهداف تصل إلى 21 مليار متر مكعب سنوياً عبر التوسع في إنتاج الميثان الحيوي المضغوط لخدمة قطاع النقل، والصين بـ 20 مليار متر مكعب سنوياً، ثم الولايات المتحدة بـ 15 مليار متر مكعب سنوياً، بينما تستهدف البرازيل 11 مليار متر مكعب سنوياً بحلول عام 2030.

يبين الشكل 3-9، أهداف إنتاج الميثان الحيوي في بعض الدول والتكتلات الدولية بحلول عام 2030، مقارنة بإنتاجها عام 2024.

الشكل 3-9: أهداف إنتاج الميثان الحيوي في بعض الدول والتكتلات الدولية بحلول عام 2030، مقارنة بإنتاجها عام 2024



المصدر: الباحث استناداً إلى الأهداف المعلنة للدول والكيانات المبينة بالرسم

3-5: الدول العربية والغاز الحيوي

3-5-1: المشاريع القائمة للغاز الحيوي في الدول العربية

لا تزال تجربة الاستثمار في قطاع الغاز الحيوي في الدول العربية في مرحلة مبكرة. ومع ذلك، فقد قررت عدة دول الدخول في هذا المجال عبر مشاريع ريادية، إيماناً منها بالدور الذي يساهم به الغاز الحيوي في إدارة المخلفات على اختلاف وتنوع مصادرها، بغية تقليل الأثر البيئي، وتحويله إلى مصدر للطاقة الكهربائية. فعلى المستوى العربي، يوجد أكثر من عشرة مشاريع قيد التشغيل لإنتاج الغاز الحيوي موزعة في سبع دول هي الإمارات، ومصر، والأردن والسعودية، والجزائر، والمغرب وتونس، علاوة على حزمة مشاريع أخرى قيد الإنشاء والتخطيط.

لكن من المهم التوضيح أن بعض هذه المشاريع لم يتم تنفيذه من الأساس بغرض إنتاج الغاز الحيوي، وإنما جاء كعملية مساعدة في محطات معالجة مخلفات البلدية الصلبة والصرف الصحي، والرغبة في توفير قسم من الطاقة الكهربائية اللازمة في محطة المعالجة. وبخلاف المشاريع الكبرى، تنتشر وحدات الهضم اللاهوائي صغيرة الحجم على نطاق واسع في بعض المناطق الريفية لدى بعض الدول العربية مثل مصر.

تعد دولة **الإمارات** ذات تجربة رائدة في تنفيذ مشاريع الغاز الحيوي، بإجمالي ثلاثة مشاريع. حيث تشمل القائمة مشروع "**القصيص**" لغاز مدافن النفايات (تم تشغيله عام 2013)، ومشروع "**الروابي**" للغاز الحيوي (تم تشغيله عام 2021)، ومشروع "**ورسان**" لتحويل الغاز الحيوي إلى طاقة (تم تشغيله عام 2023).

يعد مشروع "**القصيص**" لاستخراج غاز الميثان من مكب النفايات في "دبي"، الأول من نوعه في منطقة الشرق الأوسط، وهو يقوم على استغلال الغاز الحيوي الناتج من مدفن النفايات التابع لبلدية دبي، والتي تستقبل نحو 5,000 طن يومياً من النفايات. وبحسب مخطط المشروع، يتم سحب نحو 6,000 متر مكعب/الساعة من الغاز الحيوي[50]، والذي يتم حرق جزء منه، والباقي يستخدم كوقود لتوليد الكهرباء لمحطة بقدرة 1 ميجاوات، مع خطط مستقبلية لرفع القدرة إلى 13.5 ميجاوات. أما من جانب الأثر البيئي، فيساهم المشروع في تجنب 300 ألف طن مكافئ من ثاني أكسيد الكربون سنوياً، حسب تقييم شركة Green Energy المطورة للمشروع. أما مشروع "**الروابي**"، فهو يعتمد على استغلال روث الأبقار في مزارع الروابي في دبي، بمعدل 150 طن يومياً، لإنتاج 5.1 مليون متر مكعب من الغاز الحيوي سنوياً. ويستخدم الغاز الحيوي في التوليد المشترك للكهرباء والحرارة بقدرة 1.3 ميجاوات. ويصل الإنتاج السنوي من الكهرباء إلى 11,046 ميجاوات ساعة، ومن الحرارة إلى 11,896

ميجاوات ساعة. أما من جانب الأثر البيئي، فيساهم المشروع في خفض نحو 7,000 طن سنوياً من ثاني أكسيد الكربون[51]. يوضح الشكل 3-10، المخطط العام لمشروع الروابي للغاز الحيوي.

الشكل 3-10: المخطط العام لمشروع الروابي للغاز الحيوي في دولة الإمارات

المصدر: شركة الروابي [52]

بينما يعد مشروع **"ورسان"** لتحويل الغاز الحيوي إلى طاقة أحدث مشروع للغاز الحيوي في دول الإمارات، وتم تدشينه عام 2023 بقدرة 6 ميجاوات. وهو ينتج نحو 57 ألف متر مكعب يومياً من الغاز الحيوي لتوليد 121 ميجاوات ساعة من الكهرباء يومياً (44,250 ميجاوات ساعة سنوياً)، بما يغطي 50% من احتياجات محطة معالجة مياه الصرف الصحي. أما من جانب الأثر البيئي، فيساهم المشروع في تخفيض نحو 31 ألف طن سنوياً من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون [53].

أما في **الأردن**، فيوجد مشروعان للغاز الحيوي، الأول لتحويل نفايات مكب "الغباوي" في منطقة عمان إلى غاز حيوي، والذي تم إطلاقه رسمياً عام 2019. وهو يستقبل 4,300 طن يومياً من النفايات، والتي يتم معالجتها لتوليد 4.68 ميجاوات من الكهرباء وربطها على الشبكة. أما من جانب الأثر البيئي، فيساهم في إزاحة 175 ألف

طن مكافئ من ثاني أكسيد الكربون[54]. أما المشروع الثاني فهو "**العقبة للغاز الحيوي**"، والذي تم تشغيله عام 2025 ضمن محطة لمعالجة مياه الصرف الصحي بالعقبة بمعدل 40 ألف متر مكعب يومياً. حيث يستخدم الغاز الحيوي الناتج عن تحلل حمأة الصرف الصحي في توفير نحو 40% من احتياجات المحطة من الكهرباء.

وفي **مصر**، تبرز تجربة محطة "**الجبل الأصفر**" كأحد أضخم مشاريع الغاز الحيوي في المنطقة. فالمحطة انطلق تشغيلها عام 1998، ثم خضعت لعمليات توسعة لمعالجة 2.5 مليون متر مكعب يومياً من مياه الصرف الصحي. وينتج الغاز الحيوي عبر استخدام تقنية الهضم اللاهوائي للحمأة الناتجة عن معالجة مياه الصرف الصحي، ويستخدم في محطة توليد مشترك لإنتاج كهرباء تغطي أكثر من 60% من احتياجات المحطة. أما من جانب الأثر البيئي، فتساهم المحطة في منع الانبعاث المباشر للميثان الناتج عن تحلل المخلفات العضوية في الحمأة[55]. كما توجد محطة "**أبو رواش**" لإنتاج الغاز الحيوي عبر معالجة نحو 2,000 طن يومياً من حمأة الصرف الصحي. ويستخدم الغاز الناتج في توليد الكهرباء والحرارة لتغطية جزء من احتياجات المحطة[56]. وبخلاف المحطات المركزية الكبرى، ينتشر في مصر عدد ضخم من وحدات الغاز الحيوي صغيرة الحجم في عدة مواقع زراعية وصناعية، وهي مخصصة للاستخدام الذاتي.

وفي **المغرب**، تبرز محطة RADEEMA لمعالجة مياه الصرف الصحي في مراكش، كنموذج ناجح يعمل منذ عام 2012 ويتم توسعته باستمرار. فالمحطة تقوم بمعالجة مياه الصرف للمدينة، وتستخدم الغاز الحيوي الناتج عن تخمير الحمأة لتوليد الكهرباء بقدرة تغطي نحو 50% من احتياجات المحطة. أما من جانب الأثر البيئي، فتساهم في خفض 12,000 طن سنوياً من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. كما توجد مشاريع مماثلة في مدن مثل "فاس" و"الرباط"، حيث تسعى المغرب لتعميم هذه التقنية في محطات المعالجة الجديدة لرفع كفاءة إدارة النفايات وتقليل الاعتماد على الطاقة المستوردة.

كما أن هناك مجموعة أخرى من المشـــاريع العاملة في الســـعودية (مثل محطتي "هيت" "و "أجيال")[57]، وهي تعتمد على الهضـم اللاهوائي لحمأة الصـرف الصـحي. وقد حققت هذه المشـــاريع نجاحاً في توفير الطاقة الكهربائية اللازمة لتشـــغيل محطات معالجة الصرف الصحي بنسبة تصل إلى أكثر من 40%. كما توجد مشاريع أخرى في الجزائر، وتونس، وهي تسـتهدف التخلص من النفايات (وأغلبها حمأة الصـرف الصـحي)، وإنتاج الغـاز الحيوي لتوفير احتيـاجـات المحطـة الـذاتيـة من الكهربـاء. يلخص الجـدول 3-4، المشاريع المنتجة للغاز الحيوي في الدول العربية.

الجدول 3-4: المشاريع المنتجة الغاز الحيوي في الدول العربية، ونوع المادة العضوية المستخدمة

الدولة	اسم المحطة /المشروع	سنة التشغيل	نوع المادة العضوية	حجم النفايات / إنتاج الغاز الحيوي	القدرة الكهربائية
الإمارات	مركز ورسان (دبي)	2023	حمأة الصرف الصحي	57 ألف متر مكعب يومياً من الغاز الحيوي	6 ميجاوات
	القصيص (دبي)	2013	غاز مدافن(LFG)	6000 متر مكعب في الساعة من الغاز الحيوي	13.5 ميجاوات
	الروابي (دبي)	2021	روث أبقار	5.1 مليون متر مكعب سنويا من الغاز الحيوي	1.3 ميجاوات
مصر	الجبل الأصفر	2018	حمأة الصرف الصحي	2.5 مليون متر مكعب يومياً من مياه الصرف	14.6 ميجاوات
	أبورواش	1998 ثم توسعات لاحقة	حمأة الصرف الصحي	2,000 طن يوميا من لنفايات	تغطية 40% من احتياجات المحطة
الأردن	الغباوي (عمان)	2019	غاز المدافن	4,300 طن يوميا من لنفايات	4.68 ميجاوات
	محطة العقبة	2025	حمأة الصرف الصحي	40 ألف متر مكعب يومياً من مياه الصرف	تغطية 40% من احتياجات المحطة
المغرب	محطة (RADEEMA)	2012	حمأة الصرف الصحي	غ. م	تغطية 50% من احتياجات المحطة
السعودية	مشروع الإحساء "تحويل غاز النفايات إلى كهرباء)	2021	غاز النفايات	غ.م	0.56 ميجاوات
	محطة هيت	2024	حمأة الصرف الصحي	غ.م	تغطية 46% من احتياجات المحطة (2.8 ميجاوات ساعة)
	محطة أجياد	2024	حمأة الصرف الصحي	غ.م	تغطية 30% من احتياجات المحطة (0.6 ميجاوات ساعة)
الجزائر	مديونة (قسنطينة)	2021	غاز مدافن (LFG)	معالجة نفايات البلدية	1 ميجاوات
تونس	تبرسق (باجة)	2018	مخلفات زراعية	مشروع نموذجي ريادي	0.1 ميجاوات

المصدر: من تجميع الباحث استناداً إلى البيانات الرسمية للمشاريع

3-5-2: مقومات ودوافع الاستثمار في مشاريع الغاز الحيوي والميثان الحيوي

تتوافر لدى الدول العربية عدة عوامل ومقومات كثيرة تمكنها من الاستثمار بنجاح في مشاريع الغاز الحيوي وكذلك ترقيته إلى الميثان الحيوي، وأبرزها:

- **استراتيجيات وطنية لتحول الطاقة وتقليل الانبعاثات**

وضعت معظم الدول العربية خططاً واضحة لتعزيز أمن الطاقة وتقليل الانبعاثات، في ظل التحديات العالمية المتزايدة. ولا شك أن الغاز الحيوي يمكن أن يُشكّل ركيزة أساسية في دعم هذه الخطط والاستراتيجيات، من خلال توفير مصدر طاقة منخفض الكربون، يتكامل مع جهود تنويع مصادر الطاقة وتعزيز تكامل الشبكات. كما أن إنتاج الميثان الحيوي يمكن استغلاله في إنجاز التعهدات الدولية الخاصة بالتخلص من انبعاثات الميثان، والتي وقعت عليها بعض الدول العربية.

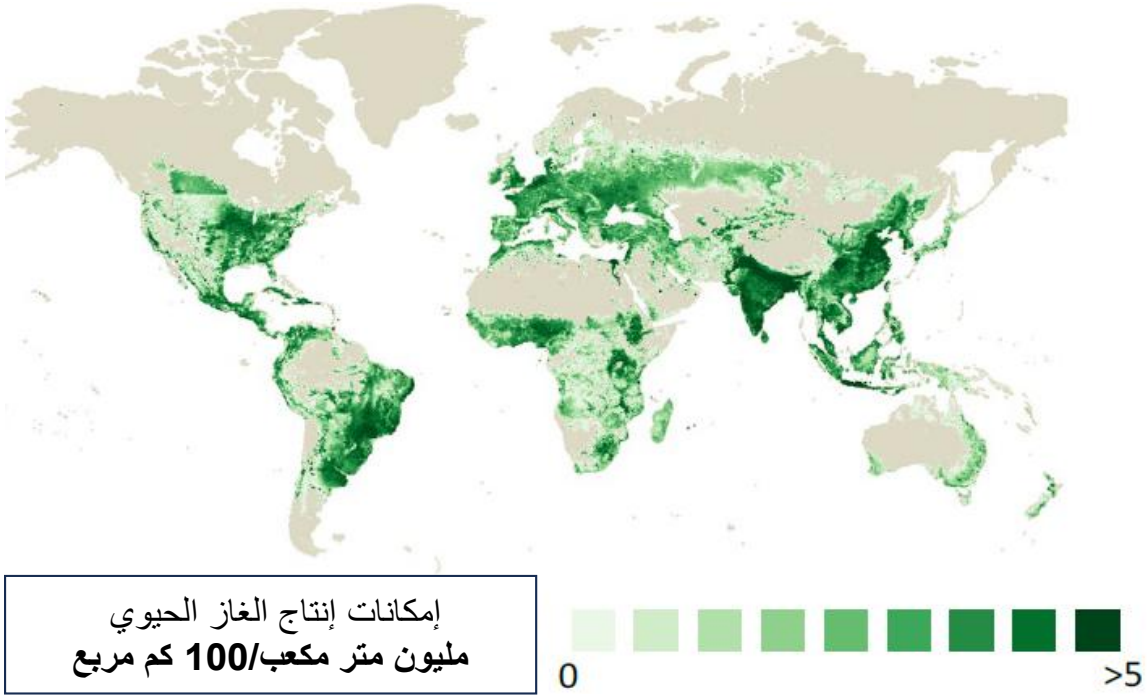
- **حجم النفايات المتزايد**

تعد إدارة المخلفات من القضايا الاستراتيجية الملحة في الدول العربية، لا سيما في ظل تسارع معدلات النمو السكاني والنشاط الاقتصادي. وتمتلك بعض الدول، وفي مقدمتها مصر، قطاعاً زراعياً واسعاً يولّد كميات ضخمة من المخلفات العضوية التي يمكن استغلالها بفاعلية في إنتاج الغاز الحيوي.

وبناءً على الخريطة الموضحة بالشكل 3-11، والتي تعتمد على قواعد بيانات عدة منظمات دولية (منظمة WRI، منظمة HydroWaste ومنظمة FAO، ووكالة الطاقة الدولية IEA). يمكن استنتاج أن بعض الدول العربية تمتلك إمكانات واعدة لإنتاج الغاز الحيوي. حيث تتصدر مصر قائمة الدول العربية من حيث الإمكانات التي تتركز في منطقتي الدلتا ووادي النيل بكثافة 5 مليون متر مكعب لكل 100 كيلومتر مربع.

كما تأتي المغرب في مرتبة متقدمة أيضـــاً بإمكانات تصـــل إلى 5 مليون متر مكعب لكل 100 كيلومتر مربع في مناطقها الزراعية. بينما تتراوح كثافة الإنتاج بين 3 و4 مليون متر مكعب لكل 100 كيلومتر مربع، وذلك في المناطق الشـمالية لكل من تونس والجزائر، بالإضـــافة إلى حوضـــي دجلة والفرات في العراق. وهذه الإمكانات، تفتح آفاقاً واســـعة للاســـتثمار في هذا القطاع لتعزيز أمن الطاقة، وتحقيق مســـتهدفات الاستدامة البيئية.

الشكل 3-11: التوزيع الجغرافي لقدرات إنتاج الغاز الحيوي (متر مكعب لكل 100 كم مربع) عالمياً



المصدر: وكالة الطاقة الدولية بناء على بيانات WRI و FAO و Hydro Waste

- **وجود شبكات نقل وتوزيع متطورة للغاز الطبيعي**

تتوافر في الدول العربية بنى تحتية واســـعة ومتطورة لنقل وتوزيع الغاز من مناطق إنتاجه وحتى القطاعات الرئيسية المستهلكة له. ومن ثم فإنه يمكن دمج منشآت الغاز الحيوي بعد ترقيته إلى الميثان الحيوي، ضـــمن تلك البنى التحتية، الأمر الذي سيقلل من الاستثمارات الرأسمالية المطلوبة.

- **التكامل والتعاون مع شركات الطاقة العالمية**

لدى الكثير من شـركات الطاقة العربية وبالأخص المُنتجة للنفط والغاز علاقات اسـتراتيجية وطيدة مع شـركات الطاقة العالمية مثل BP البريطانية، و Eni الإيطالية، وTotalEnergies الفرنسية وغيرها. وهذه الشركات باتت تولي اهتماماً كبيراً بقطاع الغاز الحيوي ضمن استراتيجياتها في السنوات الأخيرة لتقليل البصمة الكربونية. كما أصبح لديها معرفة تقنية بالقطاع وخبرات مكتسبة من تشغيل عدة مشاريع منتشرة في عدة أسواق. ومن هذا المنطلق، وعلى أساس المصلحة لكل الأطراف، تستطيع الكيانات الوطنية العربية إبرام مذكرات تفاهم وشراكة مع هذه الشركات لدراسة تنفيذ مشاريع للميثان الحيوي، للاستفادة من خبراتها، وضمان تحقيق الجدوى الاقتصادية من التنفيذ.

- **الخبرة الفنية والمؤسسية في مجال الطاقة**

لدى الدول العربية تاريخ عريق في صـــناعة النفط والغاز، ولديها شـــركات وطنية عريقة لديها خبرات فنية ومؤسسية تراكمية. وتلك الخبرات يمكن استغلالها في تنفيذ مشـــاريع الميثان الحيوي، عبر ربطه على الشـبكة المحلية أو اسـتخدامه بشـكل مباشر في توليد الكهرباء أو كوقود لقطاع النقل.

الخاتمة والاستنتاجات

تعد الغازات الحيوية (الغاز الحيوي والميثان الحيوي) أحد المسارات العملية والمرنة لدعم التحول نحو منظومة طاقة منخفضة الكربون، ليس بوصفها مصدراً متجدداً للطاقة فقط، بل كذلك كأداة فعّالة لإدارة المخلفات العضوية وتقليل انبعاثات غاز الميثان. ويكتسب هذا الدور أهمية متزايدة في ظل التوجهات الدولية الرامية إلى خفض انبعاثات الميثان ضمن ما يعرف بالتعهد العالمي للميثان، إلى جانب تحقيق أهداف الحياد الكربوني خلال العقود المقبلة.

- **مصادر المادة العضوية المستخدمة في إنتاج الغاز الحيوي**

يعتمد إنتاج الغاز الحيوي على الهضم اللاهوائي للمادة العضوية الموجودة في المخلفات الزراعية والصناعية والبلدية. وبحسب ما أوضحته الدراسة، هناك تباين واضح في هيكل المواد الأولية المستخدمة في إنتاج الغاز الحيوي والميثان الحيوي بين مناطق العالم، وهو تباين يعكس الخصائص الاقتصادية والزراعية والتنظيمية لكل منطقة، ويؤثر بصورة مباشرة في طبيعة المشروعات، وتكلفتها، وأنماط استخدامها النهائي. فأمريكا الشمالية تميل بدرجة أكبر إلى الاعتماد على مخلفات البلدية الصلبة، وحمأة الصرف الصحي، ومخلفات مدافن النفايات، إضافة إلى مخلفات الصناعات الغذائية، ويعود ذلك إلى عدة عوامل أبرزها: ارتفاع معدلات إنتاج النفايات الحضرية، وتطور أنظمة جمع ومعالجة النفايات، ووجود أطر تنظيمية تشجع على التقاط الميثان من المدافن واستخدامه ضمن برامج الوقود منخفض الكربون، خاصة في قطاع النقل. في المقابل، تعتمد أوروبا بدرجة أكبر على المخلفات الزراعية والروث الحيواني، إضافة إلى الهضم المشترك بين المخلفات الزراعية والصناعية، ويعكس ذلك الطبيعة الزراعية الكثيفة في عدد كبير من الدول الأوروبية.

- **الإنتاج والاستهلاك العالمي من الغاز الحيوي والميثان الحيوي**

أبرزت الدراسة أن الإنتاج العالمي من الغاز الحيوي شهد نمواً متواصلاً خلال العقدين الماضيين، مدفوعاً بالتوسع في أوروبا وأمريكا الشمالية وآسيا، مع وصول الإنتاج العالمي إلى 49 مليار متر مكعب، وهو ما يعادل نحو 1% من الطلب العالمي على الغاز الطبيعي. **أما من حيث الاستخدام**، فقرابة 83% من الإنتاج العالمي من الغاز الحيوي، يستخدم كوقود في ثلاث قطاعات رئيسية وهي قطاع توليد الكهرباء، والقطاع الصناعي، والقطاع السكني. ويعد قطاع توليد الكهرباء المستهلك الأكبر، حيث يشكل نحو 50% من إجمالي الاستهلاك، يليه القطاع السكني بنسبة 25.2% ثم القطاع الصناعي بنسبة 7.4%. أما النسبة المتبقية (17%) فتمثل استخدام الغاز الحيوي كمادة تغذية (لقيم) في محطات الترقية لإنتاج الميثان الحيوي، والذي يستخدم مباشرة كوقود في المركبات أو يضخ في شبكات نقل وتوزيع الغاز المحلية.

بينما سجل الميثان الحيوي نمواً أسرع من الغاز الحيوي نفسه خلال السنوات الأخيرة، نتيجة التوسع في مشروعات الترقية وحقن الغاز في الشبكات، واستخدامه في قطاع النقل كوقود منخفض الكربون. ففي عام 2010، كانت حصة الميثان الحيوي لا تتجاوز 2% من استهلاك الغاز الحيوي عالمياً، وإنتاجه محصوراً في 16 دولة، بينما وصل الإنتاج العالمي إلى 10.4 مليار متر مكعب عام 2024، محققاً نمواً إجمالياً يقارب الـ 24 ضعفاً مقارنة بمستوياته عام 2010، مع اتساع رقعة النطاق الجغرافي ليشمل 40 دولة. **وتوصلت الدراسة** إلى أن أوروبا لا تزال تتصدر الإنتاج العالمي للميثان الحيوي، سواء من حيث عدد المحطات أو حجم الإنتاج، بفضل سياسات داعمة طويلة الأمد، في حين تشهد الولايات المتحدة نمواً متسارعاً مدفوعاً بسوق الغاز الطبيعي المتجدد واستخدامه في النقل الثقيل. كما بدأت بعض الدول الآسيوية في تعزيز استثماراتها في هذا القطاع، خاصة في المناطق ذات الكثافة السكانية المرتفعة وما يرتبط بها من نمو في المخلفات البلدية.

- **الجوانب الاقتصادية والبيئية للغاز الحيوي والميثان الحيوي**

أبرزت الدراسة أن القيمة الحقيقية لمشاريع الغاز الحيوي لا تقتصر على العائد المباشر من بيع الطاقة (سواء كهرباء مولدة باستخدام الغاز الحيوي في وحدات التوليد المشترك أو الميثان الحيوي بعد ترقية الغاز الحيوي)، بل تمتد إلى ما يمكن تسميته بـ"العائد البيئي والاقتصادي والاجتماعي المركب". فمن الناحية البيئية، يساهم تجنب تسرب الميثان الناتج عن تحلل المخلفات الزراعية والبلدية والصناعية وتحويله إلى طاقة في الحد من انبعاثات أحد أقوى غازات الدفيئة، كما يسهم في تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، وخفض كثافة الانبعاثات في قطاعات مثل توليد الكهرباء والنقل. كما بينت الدراسة أن استخدام مخلفات الهضم (Digestate) كسماد عضوي يعزز من الاقتصاد الدائري، ويقلل من الحاجة إلى الأسمدة الصناعية، الأمر الذي ينعكس إيجاباً على خفض الانبعاثات غير المباشرة المرتبطة بصناعة الأسمدة.

أما من الجانب الاقتصادي، فتتحسن الجدوى الاقتصادية بشكل ملحوظ في حال توافر مخلفات ذات عائد مرتفع من الميثان، أو في حال وجود حوافز تنظيمية مثل تعرفة التغذية، أو نظم شهادات الكربون. كما أن نماذج الهضم المشترك والمحطات المركزية أسهمت في تحسين اقتصاديات الحجم وخفض تكلفة الوحدة المنتجة.

- **السياسات والاستراتيجيات الدولية الداعمة**

أظهرت الدراسة أن تطور قطاع الغاز الحيوي عالمياً لم يكن ليتحقق دون وجود أطر تنظيمية واضحة، وحوافز اقتصادية داعمة. ففي أوروبا، لعبت أهداف الطاقة المتجددة، وآليات تسعير الكربون، وقضايا أمن الطاقة دوراً محورياً في تحفيز الاستثمار. وفي أمريكا الشمالية، ساهمت برامج معايير الوقود منخفض الكربون، والاعتمادات الضريبية في تعزيز سوق الميثان الحيوي.

كما تبنت بعض الدول الآسيوية استراتيجيات لدمج الغاز الحيوي ضمن خطط إدارة النفايات وتحقيق أمن الطاقة المحلي، خاصة في المناطق الريفية. وأبرزت الدراسة أن المقارنة بين مناطق العالم تبين أن وضوح الأهداف الوطنية، واستمرارية الدعم، وتكامل السياسات بين قطاعات الطاقة والبيئة والزراعة، تمثل عناصر أساسية لنجاح القطاع.

- **توقعات إنتاج الميثان الحيوي بحلول 2030**

توصلت الدراسة إلى أن آفاق نمو إنتاج الميثان الحيوي عالمياً ترتبط بشكل وثيق بالأهداف المعلنة في الخطط الوطنية للطاقة والمناخ، خاصة في الاتحاد الأوروبي وأمريكا الشمالية. وبحسب تقديرات الدراسة، فهناك إمكانية لنمو الإنتاج العالمي بعشرة أمثال الإنتاج الحالي في حال تنفيذ الأهداف المعلنة بالكامل ليصل إلى 109 مليار متر مكعب بحلول عام 2030، أو خمسة أمثاله في حال تحقيق 50% من المستهدف. إلا أن **الدراسة شددت على أن** تحقيق هذه الأهداف يتطلب معالجة عدد من التحديات، أبرزها ضمان استدامة سلاسل الإمداد من المخلفات، وتطوير تقنيات الترقية لخفض التكلفة، وتبسيط الإجراءات التنظيمية الخاصة بربط المشروعات بشبكات الغاز. كما أن استقرار السياسات والحوافز يمثل عاملاً حاسماً في جذب الاستثمارات طويلة الأجل.

- **الغاز الحيوي في الدول العربية والدوافع للاستثمار**

توصلت الدراسة إلى أن الدول العربية تمتلك مقومات ودوافع يمكن البناء عليها لتطوير قطاع الغاز الحيوي، تشمل وفرة المخلفات الزراعية والبلدية، والنمو السكاني والحضري الذي يؤدي إلى زيادة كميات النفايات، إضافة إلى توافر بنية تحتية متطورة للغاز الطبيعي في عدد من الدول، ما يتيح إمكانية حقن الميثان الحيوي في الشبكات

القائمة. كما أن التزامات العديد من الدول العربية بخفض الانبعاثات (وبالأخص الميثان) وتحقيق مستهدفات الاستدامة توفر دافعاً إضافياً للاستثمار في هذا القطاع. ويمكن للغاز الحيوي أن يسهم في معالجة تحديات إدارة النفايات، وتقليل الانبعاثات من مرادم النفايات، وتعزيز أمن الطاقة المحلي، خاصة في المناطق الريفية أو الصناعية.

في المقابل، يتطلب تطوير القطاع في الدول العربية وضع أطر تنظيمية واضحة، وتوفير حوافز استثمارية، إضافة إلى بناء القدرات الفنية وتعزيز الشراكات مع الشركات العالمية ذات الخبرة. كما أن تبني نماذج تجارية مبتكرة، مثل الشراكات بين القطاعين العام والخاص، يمكن أن يسرّع من وتيرة التنفيذ.

التوصيات والإجراءات المقترحة

لضمان نجاح مشاريع تطوير الغاز الحيوي وتعزيز دوره كأداة لإدارة النفايات، وتوفير مصدر للطاقة منخفضة الكربون، والحد من انبعاثات الميثان، فإن الدراسة توصي بتطبيق حزمة من الإجراءات ذات أبعاد سياسية وتشريعية وفنية واستراتيجية وذلك على النحو التالي:

➢ الإجراءات السياسية والتشريعية

- **استمرار وضع أطر تنظيمية واضحة:** صياغة سياسات وتشريعات وطنية تشجع على إنتاج واستخدام الغاز الحيوي والميثان الحيوي، مع تقديم حوافز ضريبية أو دعم مالي للمستثمرين الراغبين في دخول هذا النشاط.
- **إدراج الغاز الحيوي في خطط الطاقة:** دمج مشاريع الغاز الحيوي ضمن الاستراتيجيات الوطنية للطاقة المتجددة والمساهمات المحددة وطنياً (NDCs) لخفض الانبعاثات.
- **تفعيل معايير إدارة النفايات:** تطبيق قوانين صارمة تمنع الحرق المكشوف للمخلفات الزراعية أو الدفن غير الصحي للنفايات البلدية. على أن يتم توجيه تلك المخلفات في وحدات الهضم اللاهوائي، لاستغلالها في إنتاج الغاز الحيوي.

➢ الإجراءات الفنية والتكنولوجية

- **الاستثمار في تقنيات "الترقية" (Upgrading):** من خلال تشجيع التحول من إنتاج الغاز الحيوي التقليدي إلى "الميثان الحيوي" الأعلى قيمة لتمكين حقنه في شبكات الغاز القائمة.
- **دعم البحث والتطوير:** التركيز على تحسين كفاءة أجهزة الهضم لزيادة الإنتاجية، وتحسين ناتج الميثان.

- **تعظيم الاستفادة من المنتجات الثانوية:** التوسع في استخدام "مخلفات الهضم" (Digestate) كسماد عضوي بديلاً عن الأسمدة الكيماوية، مما يعزز الاقتصاد الدائري في القطاع الزراعي.

➢ التوصيات الاقتصادية والاستثمارية

- **تشجيع الشراكات بين القطاعين العام والخاص:** تحفيز القطاع الخاص على الدخول في مشاريع معالجة النفايات وإنتاج الطاقة من خلال مشاريع استثمارية.
- **الاستفادة من أسواق الكربون:** تمويل مشاريع الغاز الحيوي عبر إصدار شهادات خفض الكربون (Carbon Credits) نظراً لدور هذه المشاريع في تقليل انبعاثات الميثان.
- **تطوير المشاريع الصغيرة والمتوسطة:** دعم إنشاء وحدات غاز حيوي صغيرة في المناطق الريفية والقرى لتمكين المجتمعات المحلية من تحقيق الاكتفاء الذاتي من الطاقة.

➢ التوصيات الإقليمية (للدول العربية)

- **التعاون العربي:** تبادل الخبرات والتجارب الناجحة بين الدول العربية في مجال استخدام الغاز الحيوي.
- **استغلال البنية التحتية القائمة:** دراسة إمكانية ربط محطات الميثان الحيوي الكبرى بشبكات نقل الغاز المحلية لتقليل تكاليف التوزيع.
- **التوعية والتدريب:** إطلاق برامج توعوية لأصحاب المصانع والمزارع حول الجدوى الاقتصادية والبيئية لتدوير المخلفات العضوية.

المراجع

[1] United States Environmental Protection Agency (EPA); Anaerobic Digester/Biogas System Operator Guidebook"; November 2020.

[2] IEA Energy Technology Network;" A Joint Study by IEA Bioenergy Task 40 and Task 37"; September 2014.
https://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/Technical%20Brochures/biomethane-status-2014.pdf

[3] Inoplex, Energy in Biogas, available at:
https://inoplex.com.au/information/how-much-energy-is-in-biogas/#:~:text=One%20cubic%20meter%20of%20natural,of%2021.5%20MJ%20per%20Nm3.

[4] Biogas Portal Info;" Guide to Biogas: from production to use"; supported by German Federal Ministry of Food, Agriculture, and Consumer Protection.

[5] The Official Information Portal on Anaerobic Digestion, Feedstocks.
Available at: https://www.biogas-info.co.uk/about/feedstocks/

[6] University of Southampton; Bio Energy and Organic Resources Research Group;" Database of crop methane potentials".
Available at: https://borrg.soton.ac.uk/resources/database/

[7] IEA Bioenergy: T37;" Biogas Production and Utilisation", 2005.

[8] University of California Davis (UCDAVIS);" Biogas Production Technologies"; June 2012.

[9] ClarkeEnergy;" Using Biogas for Combined Heat and Power"; 2012.
https://www.clarke-energy.com/2012/using-biogas-for-combined-heat-and-power/

[10] https://www.clarke-energy.com/applications/biogas/

[11] نفس المصدر رقم 4.

[12] نفس المصدر رقم 7.

[13] Dynamic Biogas;" Simplified Diagram: How does a biogas plant work?, available at :
https://dynamicbiogas.com/proces-produkcji/uproszczony-schemat/
[14] Biogas Association;" Digestate as driver of the Agroecological Transition in Europe"; April 6, 2022.

https://www.europeanbiogas.eu/news/digestate-as-driver-of-the-agroecological-transition-in-europe/

[15] نفس المصدر رقم 5

[15] Anaerobic Digestion Portal;" What is Digestate? Find Out More About This Natural Fertilizer"; July 2020, 2022.
https://anaerobic-digestion.com/digestate/

[17] US EPA (United States Environmental Protection Agency);" Anaerobic Digester/Biogas System Operator Guidebook"; November 2020.

[18] IEA Bio Energy;" Process Monitoring in Biogas Plant: Technical Brochure"; 2013.

[19] The Coalition of Renewable Natural Gas and Guidehouse; "RNG Market Today: A Primer"

[20] California Biomass Collaborative. January 2017. Renewable Energy Resource, Technology, and Economic Assessments. Appendix H—Task 8: Comparative Assessment of Technology Options for Biogas Clean-Up. CEC-500-2017-007-APH.
https://cwec.ucdavis.edu/wp-content/uploads/03-16-2017-CEC-500-2017-007.pdf

[21] Jemena Gas Network;" Malabar Biomethane Injection Project (MBIP): Commissioning Report"; June 2015.

[22] Prodeval;" CN'GREEN - CNG distribution station"; Available at:
https://www.prodeval.com/en/ngv-natural-gas-vehicle/cngreen-stations

[23] Bioenergy Insight;" Wärtsilä to build major bio-LNG plant in Germany"; April 27, 2025.
https://www.bioenergy-news.com/news/wartsila-to-build-major-bio-lng-plant-in-germany/

[24] Bioenergy Insight, "King of the Netherlands opens country's first bio-LNG plant"; Oct 15, 2021.
https://www.bioenergy-news.com/news/king-of-the-netherlands-opens-countrys-first-bio-lng-plant/

[25] Bioeconomy News;" Shell starts bio-LNG production on the Rhine"; May 13, 2024.
https://biooekonomie.de/en/news/shell-starts-bio-lng-production-rhine

[26] Offshore Energy;" Dutch project for producing bio-LNG awarded $4.8M in funding"; December 13, 2021.
https://www.offshore-energy.biz/dutch-project-for-producing-bio-lng-awarded-4-8m-in-funding/

[27] Biogas Market Place;" G / Biomethane Tube Trailer 4650m3 capacity"; available at:
https://www.biogasmarketplace.co.uk/product/cng-biomethane-tube-trailer-4650m3-capacity-250-bar-next-periodic-inspection-2034-copy/
[28] World Biogas Association; "Global potential of biogas"; June 2019.

[29] نفس المصدر السابق

[30] EBA;" EBA Statistical Report 2025"; December 10, 2025.
https://www.europeanbiogas.eu/news/eba-statistical-report-2025/#:~:text=The%20report%20reveals%20modest%20growth,plants%20producing%20electricity%20and%20heat.

[31] https://www.rngcoalition.com/infographic

[32] Bioenergy Insight:" RNG Coalition celebrates 500 operational RNG facilities across North America"; June 19, 2025.
https://www.bioenergy-news.com/news/rng-coalition-celebrates-500-operational-rng-facilities-across-north-america/

[33] Bioenergy;" ENGIE Mexico signs agreement to promote biomethane projects in Nuevo Leon"; June 7, 2024.
https://www.bioenergy-news.com/news/engie-mexico-signs-agreement-to-promote-biomethane-projects-in-nuevo-leon/#:~:text=ENGIE%20Mexico%27s%20biomethane%20projects%20will,of%20many%20achievements%20to%20come.%22

[34] IDC;" 31 Jan New energy plant launched in Cape Town"; Januay 25, 2017
https://www.idc.co.za/new-energy-plant-launched-in-cape-town/

[35] US EIA: Office of Critical Minerals and Energy Innovation"; Natural Gas Vehicles.
https://afdc.energy.gov/vehicles/natural-gas

[36] The Transport Project;" Close to 1,400 Natural Gas Stations Set to Service Clean Transport Industry in 2026"; December 15, 2025.
https://transportproject.org/2025/12/15/close-to-1400-natural-gas-stations-set-to-service-clean-transport-industry-in-2026/

[37] برنامج الأمم المتحدة للبيئة، " تجاوز عصر النفايات: تحويل القمامة إلى موارد قابلة للاستخدام"، الموجز التنفيذي للوقعات العالمية لإدارة النفايات لعام 2024.

[38] RNG Coalition;" Understanding renewable natural gas"; March 2025.

[39] WBA;" Biogas Insight 1: Delivering the Global Methane Pledge"; 2022.

[40] BIP Europe;" Insights into the current cost of Biomethane Production from real industry data"; October 2023, prepared by task force 4.2.

[41] https://www.europeanbiogas.eu/news/commission-announces-groundbreaking-biomethane-target-repowereu-to-cut-dependence-on-russian-gas/

[42] European Commission;" Communication from the commission to the European parliament, the council, the european economic and social committee and the committee OF the regions: EU-wide assessment of the final updated national energy and climate plans Delivering the Union's 2030 energy and climate objectives"; May 25, 2025.
https://commission.europa.eu/document/download/97168210-2a5c-4d1a-9ed8-6a063e011537_en?filename=COM_2025_274_1_EN_ACT_part1_v6.pdf

[43] US EIA;" the U.S. National Blueprint for Transportation Decarbonization: A Joint Strategy to Transform Transportation"; 2023.
https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-01/the-us-national-blueprint-for-transportation-decarbonization.pdf

[44] Ministry of Petroleum;" Government announces mandatory blending of Compressed Bio-Gas in CNG (Transport) & PNG (Domestic) segments of CGD Sector"; 25 NOV 2023.
https://www.pib.gov.in/PressReleaseIframePage.aspx?PRID=1979705&reg=3&lang=2

[45] Cedigaz;" Global Biomethane Market 2025 Assessment"; April 2025.

[46] Varo;" VARO acquires Renewable Energy Services (RES) and expands biogas trading capabilities across 10 European countries"; June 15, 2023
https://www.varopreem.com/en/news-and-media/articles/varo-acquires-renewable-energy-services-res-and-expands-biogas-trading-capabilities-across-10-european-countries/

[47] BioEnergy Insight;" Repsol acquires 40% stake in Genia Bioenergy"; April, 10, 2024.
https://www.bioenergy-news.com/news/repsol-acquires-40-stake-in-genia-bioenergy/

[48] Total Energies;" Poland: TotalEnergies Invests in Renewable Energies with Biogas and Solar Projects"; March, 6, 2023.
https://totalenergies.com/news/press-releases/poland-totalenergies-invests-renewable-energies-biogas-and-solar-projects

[49] TotalEnergies;" TotalEnergies and Vanguard Renewables, a Portfolio Company of BlackRock's Diversified Infrastructure Business, Join Forces to Develop Renewable Natural Gas in the United States"; April, 24, 2024
https://totalenergies.com/news/press-releases/totalenergies-and-vanguard-renewables-portfolio-company-blackrocks-diversified

[50] Global Methane;" Green Energy: Landfill Gas Capture and Utilization".
https://globalmethane.org/challenge/greenenergy.html

[51] Mele;" mele Biogas GmbH builds innovative biogas plant in the Middle East: Project Profile", November 2022.
https://www.german-energy-solutions.de/GES/Redaktion/EN/Publications/GermanEnergySolutions/2022/fs-res-vae.pdf?__blob=publicationFile&v=2

[52] https://alrawabidairy.com/sustainability/

[53] حكومة دبي، بلدية دبي،

[54] IDOM; " Using the Biogas of the Al-Ghabawi landfill for energy"; November 25, 2019.
https://www.idom.com/en/new/using-the-biogas-of-the-al-ghabawi-landfill-for-energy-commissioning-the-plant/#:~:text=landfill%20for%20energy.-,Commissioning%20the%20plant,degasification%20and%20power%20generation%20facilities.

[55] وزارة الإسكان والمرافق والمجتمعات العمرانية، الجهاز التنفيذي لمياه الشرب والصرف الصحي، "محطة معالجة الصرف الصحي بالجبل الأصفر"
https://capw.gov.eg/el-gabal-el-asfar #/

[56] [56] وزارة الإسكان والمرافق والمجتمعات العمرانية، الجهاز التنفيذي لمياه الشرب والصرف الصحي، "محطة معالجة الصرف الصحي أبو رواش"
https://capw.gov.eg/abu-rawash/#:~:text=%D9%8A%D8%AE%D8%AF%D9%85%20%D8%A7%D9%84%D9%85%D8%B4%D8%B1%D9%88%D8%B9%20%D8%AD%D9%88%D8%A7%D9%84%D9%8A%209%20%D9%85%D9%84%D8%A7%D9%8A%D9%8A%D9%86,%D9%81%D9%8A%20%D8%B8%D9%84%20%D8%A7%D9%84%D8%B2%D9%8A%D8%A7%D8%AF%D8%A9%20%D8%A7%D9%84%D8%B3%D9%83%D8%A7%D9%86%D9%8A%D8%A9%20%D8%A7%D9%84%D9%85%D8%AA%D8%B5%D8%A7%D8%B9%D8%AF%D8%A9.

[57] شركة المياه الوطنية السعودية،" المياه الوطنية تنجح في إنتاج طاقة نظيفة من محطّتي هيت وأجيال": 8 ديسمبر 2024.

https://www.nwc.com.sa/AR/MediaCenter/News/pages/heet-and-ajyal.aspx

منظمة الأقطار
العربية المصدرة
للبترول(أوابك)