منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

دراسة

دور الميثانول منخفض الكربون في التحول الطاقي

دولة الكويت - أغسطس / آب 2025

جميع حقوق الطبع محفوظة، ولا يجوز نسخ أو اقتباس اي جزء من هذه الدراسة أو ترجمتها أو إعادة طباعتها أو نشرها باي صورة دون إذن خطي مسبق من المنظمة، إلا في حالات الاقتباس القصير، مع وجوب ذكر المصدر.

2025

توجه جميع المراسلات على العنوان التالي:

منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

ص.ب 20501 الصفاة الكويت 13066

هاتف: 24959000 (965+) - فاكسميلي: 24959755 (965+)

P.O Box 20501, Safat- Kuwait, 13066

Tel.: (+965) 24959000 - Fax. (+965) 24959755

البريد الإلكتروني: oapec@oapecorg.org

الموقع الإلكتروني: www.oapecorg.org

منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

دور الميثانول منخفض الكربون في التحول الطاقي

إعداد
د، ياسر محمد بغدادي
خبير أول صناعات نفطية

مراجعة
م. عماد ناصيف مكي
مدير إدارة الشؤون الفنية

إعتماد
المهندس جمال عيسى اللوغاني
الأمين العام

مقدمة

في ظل التحديات البيئية المتسارعة وتزايد تداعيات تغير المناخ، لم يعد التحول نحو مصادر طاقة أنظف خيارًا مؤجلًا، بل أصبح ضرورة حتمية تفرضها الحاجة العالمية إلى تحقيق توازن بين النمو الاقتصادي، وأمن الطاقة، وحماية البيئة. وقد أصبحت السياسات والتشريعات البيئية الدولية من أبرز المحركات المؤثرة في إعادة تشكيل خريطة الطاقة، حيث باتت أداة استراتيجية لتوجيه الاستثمارات والابتكار نحو حلول منخفضة الانبعاثات تدعم تحقيق الأهداف المناخية على المستويين الوطني والعالمي.

وفي هذا السياق، تزايد الاعتماد على الوقود البديل كأحد المسارات الحيوية للانتقال إلى اقتصاد منخفض الكربون، ويبرز الميثانول بمختلف أشكاله، لا سيما الأخضر والأزرق كخيار واعد يجمع بين الكفاءة البيئية، والمرونة التقنية، والجدوى الاقتصادية. وقد تبنت العديد من الدول سياسات محفزة لاستخدام هذا الوقود، إدراكًا لدوره في خفض الانبعاثات، وتسهيل التكامل مع البنى التحتية القائمة، مما يجعله ركيزة استراتيجية لتحولات الطاقة المستقبلية.

وتنبع أهمية الميثانول منخفض الكربون من قدرته على أداء دور مزدوج: فمن جهة، يسهم في إزالة الكربون من قطاعات ذات انبعاثات مرتفعة مثل النقل والصناعة، ومن جهة أخرى، يدعم الاقتصاد الدائري من خلال تحسين كفاءة استخدام الموارد وتحقيق الترابط بين سلاسل القيمة في الطاقة والمواد. وفي ضوء هذه الرؤية، تهدف هذه الدراسة إلى تحليل الإمكانات التقنية والاقتصادية للميثانول الأخضر والأزرق، واستكشاف دوره المحوري في دعم مسارات التحول المستدام، بما يتماشى مع الالتزامات المناخية وأهداف التنمية المستدامة.

تتضمن الدراسة ثلاثة فصول، يُركّز كل منها على محور محدد ضمن منظومة إنتاج واستخدام الميثانول منخفض الكربون، من منظور علمي وتقني واستراتيجي متكامل.

يُقدم **الفصل الأول** تحليلًا شاملًا للبصمة الكربونية المرتبطة بمختلف أنواع الميثانول، بما في ذلك الميثانول المنتج من المواد الهيدروكربونية، والميثانول الأخضر بنوعيه: الحيوي المُستخرج من الكتلة الحيوية، والكهربائي المُنتج من مصادر الطاقة المتجددة، إضافة إلى الميثانول الأزرق الذي يعتمد على تقنيات احتجاز الكربون وتخزينه. ويتناول الفصل تقنيات الإنتاج المتاحة، والموارد الأولية اللازمة لكل مسار إنتاجي، مع تقديم تقييم تقني-اقتصادي أولي يُسهم في تحديد الحلول التقنية والتمويلية الأنسب، بالاستناد إلى الإمكانات والموارد المتاحة.

أما **الفصل الثاني**، فيُركّز على استعراض الطاقات الإنتاجية الحالية والمخططة عالميًا للميثانول منخفض الكربون ، لا سيما الميثانول الأخضر بنوعيه، والميثانول الأزرق حتى عام 2030، مع تسليط

الضوء على أبرز المشروعات الدولية الرائدة في هذا المجال. كما يستعرض الفصل المبادرات التقنية والممارسات الابتكارية التي ساهمت في رفع كفاءة الإنتاج وتقليل البصمة الكربونية. ويُولي اهتمامًا خاصًا لواقع صناعة الميثانول منخفض الكربون في **الدول الأعضاء بمنظمة أوابك**، وفرص تعزيز حضورها كمزود مستدام وفاعل ضمن سلاسل إمداد الطاقة النظيفة إقليميًا ودوليًا.

ويستعرض الفصل الثالث دور السياسات البيئية والتقنيات الحديثة في تعزيز استخدام الميثانول منخفض الكربون، مع التركيز على الاستخدامات الصناعية الحالية والمستقبلية، وبالأخص في قطاعات النقل البحري والبري والطيران حيث يبرز كوقود بديل منخفض الانبعاثات يسهم في تحقيق أهداف التحول نحو اقتصاد منخفض الكربون. كما يتناول الفصل دور الميثانول كمادة خام أولية في الصناعات البتروكيميائية والبلاستيكية المستدامة. وتُختتم الدراسة بعدد من الاستنتاجات والتوصيات التي تسلط الضوء على فرص تطوير منظومات تشريعية وتقنية داعمة لتوسيع نطاق استخدام هذا الوقود الواعد.

تتطلع الأمانة العامة لمنظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك) إلى أن تسهم نتائج هذه الدراسة وتحليلاتها في دعم جهود الدول العربية، ولا سيما الدول الأعضاء في منظمة أوابك، نحو تطوير مشروعات إنتاج الميثانول منخفض الكربون، في إطار سعيها لتعزيز حضورها الإقليمي والدولي كلاعب فاعل ضمن منظومة الاقتصاد الأخضر العالمي. كما تأمل أن تساهم مخرجات الدراسة في بناء قاعدة معرفية شاملة وموثوقة، تستند إلى بيانات وإحصاءات فنية دقيقة، تُسلّط الضوء على أبرز التحديات والفرص المرتبطة بتوسيع نطاق إنتاج الميثانول الأخضر والأزرق، بما يُمكّن صُنّاع القرار من وضع سياسات واستراتيجيات قائمة على أسس علمية واقتصادية متينة، تُسهم في تسريع التحول نحو منظومة طاقة نظيفة، وتُحقق التوازن المنشود بين حماية البيئة ومتطلبات التنمية المستدامة.

والله الموفق،،،

الأمين العام

جمال عيسى اللوغاني

قائمة المحتويات

	الموضـوع	رقم الصفحة
	مقدمة	3
	قائمة المحتويات	5
	قائمة الأشكال	7
	قائمة الجداول	8
	المصطلحات والمختصرات	9
	ملخص تنفيذي	10
	الفصل الأول **تقييم البصمة الكربونية والجدوى الاقتصادية** **لإنتاج الميثانول منخفض الكربون**	18
	مقدمة	19
.1.1	أنواع الميثانول وفقًا لمصدر إنتاجه وأثره البيئي	21
.2.1	البصمة الكربونية للميثانول ومنهجية احتسابها	24
.1.2.1	فجوة البيانات وتطور المبادرات الحديثة لتقييم البصمة الكربونية للميثانول	27
.1.1.2.1	تقدير البصمة الكربونية للميثانول من مصادر أحفورية	28
.2.1.2.1	تقدير البصمة الكربونية للميثانول الأخضر	31
.3.1	تقييم تقني - اقتصادي لمسارات إنتاج الميثانول الأخضر	33
.1.3.1	مسار تحويل الكتلة الحيوية إلى ميثانول عبر التغويز	35
.2.3.1	مسار التحويل غير المباشر لثاني أكسيد الكربون إلى ميثانول عبر وسيط الغاز الاصطناعي	37
.3.3.1	مسار التحويل المباشر لثاني أكسيد الكربون إلى ميثانول باستخدام التحليل الكهربائي	38
.4.1	معايير أولويات الاستثمار والتطوير للمسارات المختلفة	40
.1.4.1	معيار الحد الأدنى لسعر البيع للميثانول عبر المسارات المختلفة	40
.2.4.1	معيار كفاءة الكربون في إنتاج الميثانول عبر المسارات المختلفة	44
.3.4.1	معيار كفاءة الطاقة في إنتاج الميثانول عبر المسارات المختلفة	46
.4.4.1	معيار جاهزية التكنولوجيا لإنتاج الميثانول عبر المسارات المختلفة	47
	الفصل الثاني: **إنتاج الميثانول منخفض الكربون بين التجارب الدولية والمبادرات العربية**	50
	مقدمة	51
.1.2	الطاقات الإنتاجية للميثانول الأزرق والأخضر	52
.1.1.2	آفاق، مؤشرات واتجاهات سوق الميثانول منخفض الكربون حتى عام 2050	57
.2.2	نماذج مشروعات إنتاج الميثانول الأخضر والأزرق حول العالم	59
.1.2.2	نماذج مشروعات إنتاج الميثانول الأخضر	59
.1.1.2.2	مشروعات إنتاج الميثانول الحيوي	59
.2.1.2.2	مشروعات إنتاج الميثانول الكهربائي	63
.2.2.2.2	مشروعات إنتاج الميثانول الأزرق	69

تابع قائمة المحتويات

	الموضـوع	رقم الصفحة
.3.2	واقع وآفاق مشروعات إنتاج الميثانول منخفض الكربون في الدول الأعضاء في أوابك	74
.1.3.2	دولة الإمارات العربية المتحدة	75
.2.3.2	مملكة البحرين	76
.3.3.2	الجمهورية الجزائرية الديموقراطية الشعبية	77
.4.3.2	المملكة العربية السعودية	78
.5.3.2	الجمهورية العراقية	80
.6.3.2	دولة قطر	80
.7.3.2	دولة الكويت	81
.8.3.2	جمهورية مصر العربية	82
	الفصل الثالث: **دور السياسات والتقنيات في تعزيز استخدام الميثانول منخفض الكربون في قطاعي النقل والصناعة**	84
	مقدمة	85
.1.3	دور السياسات البيئية والمبادرات الدولية في تعزيز استخدام الوقود منخفض الكربون	87
.1.1.3	دور السياسات البيئة نحو استخدام الميثانول كوقود بحري	89
.1.1.1.3	دور تسعير انبعاثات الكربون في دعم التحول نحو شحن بحري مستدام	92
.2.1.1.3	تكامل البنية التحتية اللوجستية مع توسع استخدام الميثانول كوقود بحري	94
.3.1.1.3	دور الابتكار في المحركات البحرية الحديثة لتعزيز دور الميثانول كوقود بحري	95
.4.1.1.3	التحديات التشغيلية والبيئية لاعتماد الميثانول كوقود بحري	100
.5.1.1.3	مبادرات عالمية لتعزيز استخدام الميثانول كوقود بحري	102
.2.1.3	الآطر التشريعية لتعزيز دور الميثانول كوقود مستدام في قطاع النقل البرين وتجربة الصين كنموذج رائد	107
.2.2.1.3	منظومة تخزين ونقل وتوزيع الميثانول كوقود للسيارات	110
.1.2.2.1.3	التجارب الدولية في مجال منظومة النقل والتوزيع للميثانول كوقود بري	111
.3.1.3	إدماج الميثانول الأخضر والأزرق في منظومة الوقود في قطاع النقل البري	112
.4.1.3	ثنائي ميثيل الإيثر كوقود بديل مستدام لمحركات الديزل	114
.2.3	دور المبادرات والتشريعات البيئية نحو تعزيز استخدام الميثانول كوقود للطيران	116
.1.2.3	الميثانول منخفض الكربون كوقود طيران مستدام	116
3.3	الميثانول: حجر الأساس في الصناعات الكيميائية والتحول المستدام	119
	الاستنتاجات	122
	التوصيات	**123**
	المراجع	125
	Abstract	132
	Executive Summary	134

قائمة الأشكال

رقم الشكل	الشكل	رقم الصفحة
الشكل (1-1):	استخدامات الميثانول المحتملة	19
الشكل (1-2):	المسارات الرئيسية لإنتاج الميثانول الأخضر منخفض الكربون	23
الشكل (1-3):	منهجية حساب انبعاثات غازات الدفيئة لدورة الحياة الكاملة للميثانول	25
الشكل (1-4):	تسلسل عمليات إنتاج الميثانول التقليدي انطلاقًا من الفحم أو الغاز الطبيعي	29
الشكل (1-5):	البصمة الكربونية لمختلف أنواع الميثانول من مصادر مختلفة	33
الشكل (1-6- أ):	مسار تحويل الكتلة الحيوية إلى ميثانول عبر التغويز	36
الشكل (1-6- ب):	مسار التحويل غير المباشر لثاني أكسيد الكربون إلى ميثانول عبر وسيط الغاز الاصطناعي	38
الشكل (1-6- ج):	مسار التحويل المباشر لثاني أكسيد الكربون إلى ميثانول باستخدام التحليل الكهربائي	39
الشكل (1-7):	مقارنة البيع بالحد الأدنى لسعر بيع للميثانول لكل مسار	44
الشكل (2-1):	تطور طاقات مشاريع إنتاج الميثانول (منخفض الكربون، والحيوي، والأخضر)	53
الشكل (2-2):	موقف مشروعات إنتاج الميثانول منخفض الكربون (الأخضر بنوعية، والأزرق) حتى عام 2030	54
الشكل (2-3):	نسب توزع مشروعات إنتاج الميثانول الحيوي، الكهربائي ، والأزرق (منخفض الكربون) حسب المناطق الرئيسية للإنتاج في عام 2024	56
الشكل (2-4):	التوزع الجغرافي لمشروعات إنتاج الميثانول الحيوي، والكهربائي والأزرق	57
الشكل (2-5):	مصنع شركة **Enerkem** لإنتاج الميثانول الحيوي من النفايات البلدية الصلبة	60
الشكل (2-6):	مصنع شركة **BioMCN** لإنتاج الميثانول الحيوي في هولندا	61
الشكل (2-7):	المواد الخام الأولية من النفايات الصلبة البلدية لإنتاج الميثانول الحيوي في إسبانيا	62
الشكل (2-8):	مصدر ثاني أكسيد الكربون من منشأة **Övik Energi** لإنتاج الميثانول الكهربائي	64
الشكل (2-9):	أول مصنع تجاري ضخم لإنتاج الميثانول الكهربائي في مدينة **Kassø**، جنوب الدنمارك	65
الشكل (2-10):	مصنع **TRISKELION** لإنتاج الميثانول الكهربائي في هولندا	66
الشكل (2-11):	موقع بناء مصنع إنتاج الهيدروجين الأخضر والميثانول الكهربائي في إسبانيا	67
الشكل (2-12):	مخطط مشروع **FlagshipONE** لإنتاج الميثانول المنتج كهربائيًا من مصادر متجددة في السويد	69
الشكل (2-13):	ثاني أكبر مصنع في العالم لإنتاج الميثانول الأزرق	70
الشكل (2-14):	منشأة إنتاج الميثانول الأزرق في أيسلندا	71
الشكل (2-15):	مصنع إنتاج الميثانول منخفض الكربون في كندا	72

قائمـة الأشكال

رقم الشكل	الشـكل	رقم الصفحة
الشكل (3-1):	أهداف الاتحاد الأوروبي لخفض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري في قطاع النقل البحري في ظل استراتيجية المنظمة البحرية الدولية 2018	90
الشكل (3-2):	عملية تزويد السفن بالميثانول من البارجة إلى السفينة في ميناء روتردام	95
الشكل (3-3):	مخطط وحدة تزويد الوقود بالميثانول منخفضة الضغط	98
الشكل (3-4):	مخطط وحدة تزويد الوقود بالميثانول عالية الضغط	**99**
الشكل (3-5):	مقارنة سمية أنواع الوقود البحري باستخدام مؤشر التركيز القاتل لنسبة 50 % من مجموعة اسماك	102
الشكل (3-6):	مخططات نظام المحرك ذو الوقود المزدوج ونظام الوقود	103
الشكل (3-7):	العبارة **Stena Germanica**، كأول عبارة تبحر باستخدام الميثانول منخفض الكربون	104
الشكل (3-8):	الناقلة Stena Pro Patria، والتي تستخدم الميثانول كوقود ثنائي	106
الشكل (3-9):	أساطيل السيارات العاملة بالميثانول النقي (**M100**) كوقود في الصين	110
الشكل (3-10):	محطات تموين السيارات بالميثانول في الصين	112
الشكل (3-11):	محطات التزود بمنتج ثنائي الميثيل إيثر في الصين	115
الشكل (3-12):	مصنع شركة OCI لإنتاج الفورمالدهيد من الميثانول الأخضر في هولندا	120

قائمـة الجداول

رقم الجدول	عنوان الجدول	رقم الصفحة
جدول (2-1)	بعض مشاريع إنتاج الميثانول الأزرق المعلن عنها خلال الفترة 2023-2026	73

المصطلحات والمختصرات

Abbreviation	المصطلح
BECCS	الطاقة الحيوية مع التقاط الكربون وتخزينه **(Bioenergy with Carbon Capture and Storage)**
BECCU	الطاقة الحيوية مع التقاط الكربون واستخدامه **(Bioenergy with Carbon Capture and Use)**
DAC	التقاط مباشر من الهواء **(Direct Air Capture)**
FEED	تصميم الهندسة الأولي **(Front-End Engineering Design)**
FT fuels	وقود فيشر-تروبش **(Fischer-Tropsch Fuels)**
MTG	تحويل الميثانول إلى غازولين **(Methanol-to-Gasoline)**
MTO	تحويل الميثانول إلى أوليفينات **(Methanol-to-Olefins)**
WGS	**تفاعل تحويل غاز الماء،** أو **تفاعل التحول الغازي المائي** **(Water Gas Shift)**
DME	ثنائي ميثيل الإيثر **(Dimethyl Ether)**
RED	توجيه الطاقة المتجددة **(Renewable Energy Directive)**
CAPEX	النفقات الرأسمالية
IRR	معدل العائد الداخلي Internal Rate of Return
OPEX	النفقات التشغيلية Operating Expenditures
IMO	International Maritime Organization المنظمة البحرية الدولية
EU	الاتحاد الأوروبي
TEA	التحليل التقني والاقتصادي **Techno-Economic Analysis**
PTL	تحويل الكهرباء إلى سوائل (وقود سائل كهربائي) **Power-to-Liquids**
MSP	الحد الأدنى لسعر البيع **Minimum Selling Price**
FE	الكفاءة الفارادية (كفاءة التفاعل الكهروكيميائية) **Faradaic Efficiency**
TRL	مستوى الجاهزية التكنولوجية **Technology Readiness Level**
LCA	منهجية تقييم دورة الحياة **Life Cycle Assessment**

ملخص تنفيذي

الفصل الأول: تقييم البصمة الكربونية والجدوى الاقتصادية لإنتاج الميثانول منخفض الكربون

في ظل تصاعد الاهتمام العالمي بالتحول إلى مصادر طاقة منخفضة الانبعاثات، يواجه الميثانول التقليدي، المُنتج بشكل رئيسي من الفحم أو الغاز الطبيعي، تحديات بيئية متنامية نتيجة بصمته الكربونية العالية. وتشير تقديرات عام 2024 إلى أن هذا النمط من الإنتاج يساهم بما يقارب 10% من إجمالي انبعاثات قطاعي الكيميائيات والبتروكيماويات عالميًا، بإجمالي انبعاثات سنوية تقارب 0.3 جيجا طن من ثاني أكسيد الكربون، ناتجة عن إنتاج نحو 110 مليون طن من الميثانول سنويًا.

ومع التقديرات المستقبلية التي تُشير إلى إمكانية تضاعف الإنتاج العالمي ليصل إلى 500 مليون طن سنويًا بحلول عام 2050، تتزايد المخاوف من الأثر المناخي لهذا التوسع، لا سيما إذا استمر الاعتماد على المصادر الأولية الأحفورية كمصدر رئيسي للإنتاج. ففي غياب تحول جاد نحو البدائل منخفضة الكربون، قد ترتفع الانبعاثات الناتجة إلى أكثر من 1.5 جيجا طن سنويًا من ثاني أكسيد الكربون، مما يُشكل تهديدًا مباشرًا للجهود الدولية الرامية إلى الحد من ظاهرة الاحتباس الحراري.

في هذا الإطار، يبرز الميثانول منخفض الكربون كأحد الخيارات الاستراتيجية الرامية إلى تقليل الانبعاثات الكربونية وتعزيز الاستدامة في قطاع الطاقة والصناعة. ويندرج هذا النوع ضمن مسارين رئيسيين: حلول انتقالية وأخرى مستدامة. يُمثل الميثانول الأزرق خيارًا انتقاليًا يعتمد على دمج عملية إنتاج الميثانول من الغاز الطبيعي مع تقنيات احتجاز الكربون وتخزينه، مما يُسهم في خفض الانبعاثات مقارنة بالميثانول التقليدي. في المقابل، يُعد الميثانول الأخضر الخيار الأمثل على المدى الطويل، لاعتماده الكامل على مصادر الطاقة المتجددة، سواء من خلال التحليل الكهربائي باستخدام الكهرباء النظيفة لإنتاج الهيدروجين، أو بتحويل الكتلة الحيوية والنفايات إلى ميثانول حيوي.

وبناءً على مصدر الإنتاج والتقنيات المستخدمة، يُصنَّف الميثانول إلى أربعة أنواع رئيسية تختلف جذريًا في بصمتها الكربونية. يُعد الميثانول البني، المُنتَج من تغويز الفحم، الأسوأ من الناحية

البيئية، حيث تتجاوز انبعاثاته 300 غرام من ثاني أكسيد الكربون لكل ميغا جول من الطاقة. أما الميثانول الرمادي، المُستخلص من الغاز الطبيعي، فيمثل الشكل الأكثر شيوعًا على مستوى العالم، وتتراوح انبعاثاته الكربونية ما بين 103 - 110 غرام/ميغا جول. ويُعد الميثانول الأزرق خيارًا تكنولوجيًا انتقاليًا، إذ يعتمد أيضًا على الغاز الطبيعي، لكنه يُدمج مع تقنيات احتجاز الكربون وتخزينه ، مما يُسهم في تقليل الانبعاثات بأكثر من 50% مقارنة بالميثانول الرمادي. في المقابل، يُصنّف الميثانول الأخضر كالأكثر استدامة، نظرًا لاعتماده على مصادر الطاقة المتجددة أو على تحويل الكتلة الحيوية والنفايات، وتقدَّر انبعاثاته الكربونية بما يتراوح بين 10 -40 غرامًا من ثاني أكسيد الكربون لكل ميغا جول من الطاقة فقط.

وتعتمد تقديرات البصمة الكربونية لمختلف أنواع الميثانول على نماذج تحليلية دقيقة، تأخذ في الاعتبار التوازن الكتلي والطاقي، إلى جانب قياس الانبعاثات المباشرة وغير المباشرة على امتداد سلسلة القيمة الكاملة لعمليات الإنتاج. ويتميّز الميثانول الأخضر بمزايا بيئية بارزة، حيث يمكن أن يُسهم في خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنسبة تصل إلى 95%، وتقليل أكاسيد النيتروجين بنسبة 80%، إلى جانب تقليل شبه تام لانبعاثات الكبريت والجسيمات الدقيقة. وتُعد هذه الخصائص مثالية لتطبيقات الميثانول الأخضر في القطاعات عالية الانبعاثات، مثل قطاعات النقل والصناعة، التي تُعد من أكثر القطاعات صعوبة في إزالة الكربون منها بالوسائل التقليدية.

ومع ذلك، لا يزال إنتاج الميثانول الأخضر في مراحله المبكرة؛ إذ لا يتجاوز إنتاج الميثانول الحيوي عالميًا 0.2 مليون طن سنويًا، فيما تظل مشروعات الميثانول الكهربائي **(E-methanol)** وهو أحد أنواع الوقود الكهربائي الذي يُنتَج بطريقة مستدامة من خلال تفاعل الهيدروجين الأخضر مع ثاني أكسيد الكربون (CO_2) لتوفير مصدر طاقة منخفض أو محايد الكربون – محصورة في نطاق تجريبي محدود، نتيجة ارتفاع تكاليف الإنتاج وتعقيد التقنيات المستخدمة، فإن تسريع نضوج هذا المسار الواعد يتطلب تكثيف جهود **البحث والتطوير**، إلى جانب توفير **الدعم الاستثماري** اللازم لتحقيق الجدوى التجارية وتحفيز استخدامه على نطاق واسع.وفي السياق ذاته، تُظهر التقديرات أن تكلفة إنتاج الميثانول من مصادر متجددة تعتمد بشكل كبير على تكلفة مدخلات الإنتاج، لا سيما ثاني أكسيد الكربون والهيدروجين. وتُعد تكلفة ثاني أكسيد الكربون عاملاً حاسمًا في تحديد الحد الأدنى لسعر البيع. فعند استخدام ثاني أكسيد الكربون المُلتقط من الكتلة الحيوية عبر تقنيات

احتجاز الكربون وتخزينه (**BECCS**)، والتي تتراوح تكلفة التقاط الطن الواحد فيها ما بين 10-50 دولارًا للطن، تتراوح تكلفة إنتاج الميثانول بين 800-1600 دولار للطن. أما إذا تم استخدام تقنية الالتقاط المباشر من الهواء(**DAC**) ، والتي تصل تكلفة التقاط الطن الواحد فيها ما بين 300- 600 دولار، فإن تكلفة إنتاج الميثانول ترتفع لتتراوح بين 1200-2400 دولار للطن، مما يبرز أهمية تقليل تكلفة التقاط الكربون لتحقيق حد أدنى لسعر بيع تنافسي، ودعم مسارات التحول نحو اقتصاد منخفض الكربون.[1]

أما مسار التحويل المباشر لثاني أكسيد الكربون إلى الميثانول –وهو تقنية ناشئة تهدف إلى إنتاج الميثانول مباشرة من غاز CO_2 باستخدام تفاعلات كيميائية محفَّزة مع الهيدروجين الأخضر المستخرج من تحليل الماء بواسطة الكهرباء المتجددة – فيُعد من المسارات الطموحة لإعادة تدوير الكربون وإنتاج وقود منخفض الانبعاثات. ويتيح هذا التوجه تحويل ثاني أكسيد الكربون الملتقط من المصادر الصناعية أو من الهواء إلى مادة كيميائية ذات قيمة مضافة، دون المرور بمراحل وسيطة تقليدية.

ومع ذلك، لا يزال هذا المسار في مرحلة مبكرة جدًا من التطوير التقني والتجريبي، ما ينعكس في تفاوت كبير في التقديرات الأولية لسعر البيع، حيث تُظهر النماذج اختلافات ملحوظة في التكاليف وفقًا لمجموعة من الافتراضات المتعلقة بالكفاءة التكنولوجية، وتكلفة الهيدروجين، وفعالية المحفزات المستخدمة.

ففي أحد سيناريوهات خط الأساس، يبلغ الحد الأدنى لسعر البيع حوالي 11.20 دولارًا للكيلوغرام (أي 11200 دولار للطن)، وتشكل النفقات الرأسمالية اللازمة لتحليل الماء كهربائيًا النسبة الأكبر من إجمالي التكلفة، بنحو 75%. في سيناريو أكثر تحفظًا، حيث تنخفض الانتقائية في إنتاج الميثانول " نسبة تحويل المواد الأولية إلى ميثانول تكون محدودة مقارنة بما يُفقد أو يُحوّل إلى منتجات جانبية "ترتفع تكلفة الإنتاج بشكل كبير لتصل إلى نحو 17.26 دولارًا للكيلوغرام (ما يعادل 17,260 دولارًا للطن)، مما يعكس هشاشة الجدوى الاقتصادية في ظل الكفاءة المنخفضة للعملية. ويُبرز هذا السيناريو أهمية تحسين الانتقائية ورفع كفاءة العمليات الإنتاجية لتحقيق

[1] Bioenergy with Carbon Capture and Storage

مردودية أعلى وتقليل التكاليف، خاصة في المراحل المبكرة من تطوير تقنيات الميثانول منخفض الكربون.

ورغم هذه التحديات، تُشير التوقعات المستقبلية إلى تحسُّن تدريجي في تنافسية الميثانول الأخضر بحلول عام 2050، أو حتى قبله، مدفوعًا بالتطور التكنولوجي، وزيادة الاستثمارات، والدعم السياسي ،والتشريعي. وبذلك، يُمكن للميثانول الأخضر أن يتحول إلى ركيزة أساسية في مزيج الطاقة المستدامة، ويُسهم بشكل ملموس في الجهود العالمية نحو مستقبل منخفض الكربون.

الفصل الثاني: إنتاج الميثانول منخفض الكربون بين التجارب الدولية والمبادرات العربية

يشهد إنتاج الميثانول الأخضر والأزرق توسعًا ملحوظًا عالميًا، مدفوعًا بتسارع الجهود نحو تقليل الانبعاثات الكربونية وبناء اقتصاد طاقة أكثر استدامة. ووفقًا لبيانات حديثة صادرة حتى نوفمبر 2024، قام "معهد الميثانول" بالتعاون مع شركة **GENA Solutions Oy** برصد ما يقرب من **190 مشروعًا** نشطًا حول العالم لتطوير الميثانول منخفض الكربون، تشمل مشروعات الميثانول الحيوي، والميثانول الكهربائي، بالإضافة إلى الميثانول الأزرق. ومن المتوقع أن تصل الطاقة الإنتاجية التراكمية لهذه المشاريع إلى **قرابة 39.9 مليون طن سنويًا بحلول عام 2030**.

تشير التقديرات إلى أن إنتاج الميثانول الكهربائي سيصل إلى نحو **18.7 مليون طن**، في حين تبلغ طاقة الميثانول الحيوي **13.1مليون طن**، أما الميثانول الأزرق فستبلغ قدرته **8.1 مليون طن** بحلول نفس العام. وتُظهر التحليلات أن مشروعات الميثانول الحيوي تتقدم بشكل أسرع من حيث التنفيذ، نظرًا لنضج تقنياتها وانخفاض مستوى التعقيد مقارنةً بالميثانول الأزرق، الذي لا يزال عدد كبير من مشروعاته في مرحلة التصميم والدراسة بسبب التحديات الاستثمارية والفنية.

على الصعيد الجغرافي، تتصدر **الصين** قائمة الدول من حيث عدد المشروعات الجارية، تليها **أوروبا** و**أمريكا الشمالية**، في حين بدأت بعض الدول العربية، مثل **السعودية** و**الإمارات**، ومصر دخول هذا السوق ضمن إطار استراتيجياتها الوطنية لتنويع مصادر الطاقة ودعم التحول نحو الاقتصاد الأخضر.

ومن المتوقع أن يطرأ على سوق الميثانول تغيرات هيكلية كبيرة حتى عام 2050، مع نمو واضح في المسارات الثلاثة الرئيسة لإنتاج الميثانول منخفض الكربون، وهي: الحيوي، الكهربائي، والأزرق. ويرتبط هذا النمو بتطور السياسات البيئية، وتحسين الجدوى الاقتصادية، وتقدم التقنيات.

من المتوقع أن يشهد **الميثانول الحيوي** تقدمًا سريعًا بفضل بساطة سلاسل توريده وانخفاض تكاليفه نسبيًا، مع توقعات بوصول إنتاجه إلى **30-40 مليون طن سنويًا بحلول 2050**، خاصة في أوروبا وأمريكا الشمالية. أما **الميثانول الكهربائي**، فرغم أنه لا يزال في مرحلة تطوير مبكر نسبيًا، إلا أن التوقعات تشير إلى أنه سيصبح الخيار المفضل على المدى الطويل، مع اعتماد متزايد على مصادر الطاقة المتجددة، وإنتاج متوقع يتراوح بين **70-90** مليون طن سنويًا بحلول منتصف القرن، تقوده ألمانيا، الصين، وبعض الدول العربية.

في المقابل، يحتفظ الميثانول الأزرق بدور مرحلي مهم كجسر نحو مستقبل طاقة نظيف، لا سيما في المناطق التي تمتلك بنية تحتية متطورة لإنتاج الغاز الطبيعي وتقنيات احتجاز الكربون. وتشير التقديرات إلى أن إنتاجه سيصل إلى ما بين **40 -50** مليون طن سنويًا بحلول عام 2050، مع بروز دور قيادي لأوروبا الشمالية، والصين، وعدد من الدول الأعضاء في منظمة أوابك.

ومن المتوقع أن تسهم الدول العربية بما يتراوح بين 15 - 20% من الإنتاج العالمي للميثانول الحيوي، مدفوعة بتوفر كميات كبيرة من المخلفات الزراعية والكتلة الحيوية، خاصة في دول مثل مصر والمغرب والسودان، إلى جانب مبادرات وطنية لدعم الوقود الحيوي. أما في مسار الميثانول الكهربائي، فتشير التقديرات إلى أن الدول العربية قد تسهم بما يتراوح بين 50- 60% من الإنتاج العالمي بحلول عام 2050، مستفيدة من وفرة موارد الطاقة المتجددة (الشمسية والرياح) وانخفاض تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر، وهو ما تعكسه مشاريع كبرى مثل مشروع نيوم للهيدروجين الأخضر في السعودية، والمنطقة الاقتصادية في العين السخنة بمصر، ومشاريع الطاقة النظيفة في دولة الإمارات. كذلك، يُتوقع أن تبلغ مساهمة الدول العربية نحو 20 -30% من إنتاج الميثانول الأزرق، بالنظر إلى توفر الغاز الطبيعي والبنية التحتية الملائمة لتقنيات احتجاز الكربون وتخزينه (CCUS)، كما في مشروعات أرامكو السعودية وقطر للطاقة وشركة OQ العُمانية. ويعزز هذا التوجه مجموعة من الاستراتيجيات الوطنية الطموحة، من أبرزها "رؤية المملكة العربية السعودية

2030"، التي تروج لمفهوم الاقتصاد الدائري للكربون، و"استراتيجية الإمارات للطاقة 2050"، التي تستهدف رفع مساهمة الطاقة النظيفة إلى 50% من مزيج الطاقة، بالإضافة إلى خطة مصر الوطنية للهيدروجين الأخضر التي تمهد لإنتاج مشتقات صناعية منخفضة الكربون، من بينها الميثانول منخفض الكربون.

الفصل الثالث: دور السياسات والتقنيات في تعزيز استخدام الميثانول منخفض الكربون في قطاعي النقل والصناعة

في ظل الزخم العالمي المتزايد نحو تفعيل اتفاقيات المناخ، مثل اتفاق باريس، وتعزيز تنفيذ أهداف التنمية المستدامة، شهد قطاع **النقل البحري** تحولات جوهرية، أبرزها التوجه لاعتماد وقود منخفض الانبعاثات. وقد استحوذ الميثانول على اهتمام خاص باعتباره وقودًا ذا بصمة كربونية أقل، مع قابلية عالية للامتزاج في الأنظمة القائمة. فعلى خلاف بدائل مثل الغاز الطبيعي المسال أو الأمونيا، لا يتطلب الميثانول تغييرات كبيرة في أنظمة الدفع، ويمكن تخزينه في درجات حرارة وضغوط معتدلة نسبيًا، مما يسهّل عملية التبني. من الناحية البيئية، يتيح استخدام الميثانول خفض انبعاثات **أكاسيد الكبريت** إلى مستويات شبه معدومة، وتقليص **أكاسيد النيتروجين** والجسيمات الدقيقة، وهو ما يتماشى مع متطلبات **اتفاقية ماربول (Annex VI)** التي وضعت حدودًا صارمة لهذه الانبعاثات.

أما في قطاع **النقل البري**، فقد شكّلت المعايير الأوروبية الصارمة مثل **Euro 6 و Euro 7** دافعًا كبيرًا للابتكار في تكنولوجيا المحركات. وقد فرضت هذه المعايير خفضًا تدريجيًا للانبعاثات الضارة، خصوصًا الجسيمات الصلبة وأكاسيد النيتروجين، ما دفع الشركات المصنّعة إلى اعتماد تقنيات مثل **أنظمة إعادة تدوير العادم (EGR)** و**التحفيز الانتقائي (SCR)**، إلى جانب البحث عن وقود أنظف. ويبرز الميثانول هنا كوقود بديل قادر على التكيف مع هذه المعايير، إما من خلال **مزجه مع الغازولين** بنسب تتراوح من M15 إلى M85 ، أو استخدامه كوقود تام **(Neat Methanol)** في محركات معدّلة. وتُظهر التجربة الصينية مثالًا رائدًا، حيث تم تنفيذ برنامج حكومي موسع لاستخدام الميثانول في المركبات، مما ساعد في تقليل مستويات التلوث الحضري وتحقيق نتائج بيئية واقتصادية مشجعة.

وفيما يتعلق بقطاع **النقل الجوي**، يتسم التوجه نحو إزالة الكربون بتحديات أكبر نظرًا لمتطلبات الطاقة العالية والسلامة، إلا أن هناك مسارًا واعدًا للميثانول يتمثل في استخدامه كمادة وسيطة في إنتاج الوقود الاصطناعي للطيران .فباستخدام تقنيات التحويل الكيميائي، مثل **Fischer-Tropsch** أو **(Methanol to Gasoline)**، يمكن تحويل الميثانول المشتق من الهيدروجين الأخضر وثاني أكسيد الكربون إلى **كيروسين اصطناعي** يتوافق مع مواصفات وقود الطيران. هذا الاتجاه تدعمه برامج تنظيمية دولية مثل **CORSIA** التابع لمنظمة الطيران المدني الدولي، ومبادرة **ReFuelEU Aviation** التي تفرض نسبًا إلزامية لاستخدام الوقود المستدام في الرحلات داخل أوروبا.

من الناحية **التشغيلية والتقنية**، يتميز الميثانول بتركيبه الكيميائي الذي يحتوي على نسبة عالية من الأكسجين (حوالي 50% من وزنه الجزيئي)، مما يساهم في احتراق أنظف داخل المحرك ويُنتج مستويات منخفضة من أول أكسيد الكربون والهيدروكربونات غير المحترقة. إلا أن تحديات الكثافة الطاقية المنخفضة تبقى قائمة، إذ يحتوي الميثانول على حوالي نصف الطاقة الكامنة في البنزين لكل وحدة حجم، مما يتطلب زيادة حجم الخزانات أو تحسين الكفاءة الحرارية للمحركات لتعويض هذا الفرق. كما أن سميته النسبية، وقابلية امتصاصه للرطوبة، تتطلبان اعتبارات فنية إضافية في النقل والتخزين.

أما في قطاع الكيمياويات والبتروكيماويات، فإن الميثانول يُعد حجر زاوية في إنتاج العديد من المركبات الكيميائية الأساسية، مثل **حمض الخليك، الفورمالديهايد، ميثيل ثالثي بيوتيل إيثر (MTBE)**، والأوليفينات عبر تقنية تحويل الميثانول إلى أوليفينات **(Methanol to Olefins)** . هذه المنتجات تدخل في صناعات رئيسية مثل البلاستيك، الألياف الصناعية، المواد اللاصقة، والراتنجات. ويُعد الاعتماد على الميثانول منخفض الكربون في هذه الصناعات خطوة مهمة نحو تقليل الانبعاثات في سلاسل التوريد، ودعم التحول نحو اقتصاد دائري للمواد والطاقة.

في ضوء ما تقدم، يتضح أن الميثانول منخفض الكربون يُمثل خيارًا متكاملًا يدعم أهداف إزالة الكربون، ويحقق توازنًا بين الجدوى الاقتصادية، التوافق التقني، والاستدامة البيئية .وتكمن القيمة المضافة له في أنه لا يقتصر على كونه وقودًا بديلًا، بل يمثل استراتيجية كيميائية متعددة الاستخدامات قادرة على المساهمة في تحولات كبرى تشمل الطاقة، الصناعة، والنقل.

الاستنتاجات والتوصيات:

1. **ارتفاع البصمة الكربونية للميثانول التقليدي** يجعله مصدرًا رئيسيًا لانبعاثات غازات الدفيئة في قطاع الكيميائيات والبتروكيماويات، مما يستدعي التحول نحو بدائل منخفضة الكربون لتجنب تصاعد الانبعاثات في المستقبل.
2. **الميثانول منخفض الكربون** (بنوعيه الأخضر والأزرق) يمثل خيارًا استراتيجيًا لتحقيق تحوّل طاقي مستدام، مع تفاوت واضح في الانبعاثات والتكاليف بين كل نوع، مما يتطلب تقييمًا دقيقًا لاختيار الحلول الأنسب لكل دولة أو قطاع.
3. يمتلك الميثانول منخفض الكربون إمكانات **كبيرة كوقود بديل** في قطاعات النقل البحري والبري والطيران ، مع ضرورة مرافقة ذلك بتطوير البنية التحتية والتقنيات الداعمة لتمكين الاستخدام الآمن والفعال.
4. يتيح استخدام الميثانول منخفض الكربون في صناعة البتروكيماويات فرصًا حقيقية لتعزيز **استدامة سلاسل القيمة في قطاع البتروكيماويات**، بفضل دوره كمادة وسيطة صديقة للبيئة.
5. لا يزال **الميثانول الكهربائي** في مراحل مبكرة من التطوير، لكنه يشكل مسارًا واعدًا على المدى الطويل، مدعومًا بالتطور التكنولوجي المتوقع في تقنيات التحليل الكهربائي واحتجاز الكربون.
6. تُشكّل القوانين والتنظيمات الدولية، مثل تلك الصادرة عن منظمة **IMO** ومنظمة **ICAO** والاتحاد الأوروبي، **عاملًا مهمًا في دفع التحول نحو استخدام الوقود النظيف**، ويُعتبر **الميثانول منخفض الكربون** من أبرز الخيارات القابلة للتطبيق لتلبية هذه المتطلبات البيئية.
7. بدأت **بعض الدول الأعضاء في أوابك** بالفعل في تبني توجهات عملية لتطوير إنتاج واستخدام الميثانول منخفض الكربون، من خلال مبادرات وسياسات وطنية تهدف إلى تنويع مزيج الطاقة وتقليل الانبعاثات.

منظمة الأقطار
العربية المصدرة
للبترول (أوابك)

الفصل الأول:

تقييم البصمة الكربونية والجدوى الاقتصادية لإنتاج الميثانول منخفض الكربون

الفصل الأول

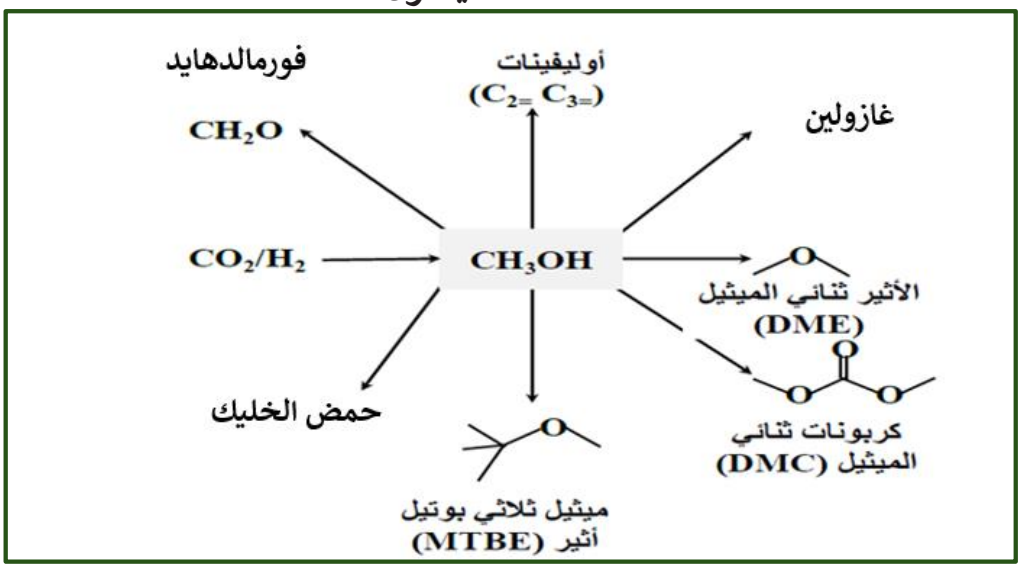
تقييم البصمة الكربونية والجدوى الاقتصادية لإنتاج الميثانول منخفض الكربون

مقدمة

يُعد الميثانول (CH_3OH) من الركائز الأساسية في الصناعات الكيميائية والبتروكيماوية، حيث يُخصص نحو **70%** من الإنتاج العالمي في إنتاج مواد كيميائية متنوعة، على رأسها الفورمالدهيد وحمض الخليك، اللذين يشكلان مكونات أساسية في صناعة البلاستيك، والأصباغ، والمواد اللاصقة، والمنسوجات. من جهة أخرى، يعد الميثانول مركبًا وسطيًا هامًا في مسارات تحويلية متقدمة، أبرزها تقنية تحويل الميثانول إلى هيدروكربونات (MTH)، والتي تشمل تقنية تحويل الميثانول إلى أوليفينات (MTO) لإنتاج الإيثيلين والبروبيلين. كما يمكن تعديل هذه التقنية لإنتاج الغازولين (MTG) . بالإضافة إلى ذلك، يُستخدم الميثانول لإنتاج مشتقات مهمة مثل ميثيل ثلاثي بوتيل الإيثر (MTBE) ، الذي يُضاف إلى الغازولين لرفع رقم الأوكتان، وثنائي ميثيل الإيثر (DME)، الذي يُعد بديلاً واعدًا لغاز البترول المسال. أما النسبة المتبقية والتي تمثل بنحو **30%** من الإنتاج العالمي، فتُستخدم كوقود للسفن والمركبات، والطائرات. يبين **الشكل (1-1)** استخدامات الميثانول المحتملة.

الشكل (1-1)

استخدامات الميثانول المحتملة



المصدر: Quadrelli et al.2011

تتصاعد المخاوف البيئية بالتزامن مع الاعتماد المتزايد على الميثانول المنتج من مصادر أحفورية مثل الفحم والغاز الطبيعي، نظرًا للانبعاثات الكربونية الكبيرة المصاحبة لعمليات إنتاجه. ويُصنف الميثانول الأحفوري حسب مصدره إلى نوعين رئيسيين: "**الميثانول البني**" المنتج من الفحم، و"**الميثانول الرمادي**" المنتج من الغاز الطبيعي. وتشير بيانات عام 2024 إلى أن الإنتاج العالمي من هذا النوع بلغ نحو 110 مليون طن، مما أدى إلى انبعاث قدرت بنحو 0.3 جيجا طن من ثاني أكسيد الكربون سنويًا، أي ما يعادل حوالي 10% من إجمالي الانبعاثات الناتجة عن قطاعي الكيميائيات والبتروكيماويات على مستوى العالم.

ومن المتوقع أن يشهد إنتاج الميثانول نموًا كبيرًا ليصل إلى نحو 500 مليون طن سنويًا بحلول عام 2050، مدفوعًا بزيادة الطلب عليه كوقود بديل منخفض الانبعاثات، إضافة إلى دوره المحوري كمادة أولية في العديد من الصناعات الكيميائية والبتروكيماوية. إلا أن استمرار هذا النمو بالاعتماد على المصادر الأحفورية قد يؤدي إلى انبعاث ما يقارب 1.5 جيجا طن من ثاني أكسيد الكربون سنويًا، مما يشكل تحديًا بيئيًا كبيرًا ويزيد من صعوبة جهود المجتمع الدولي في مواجهة تغيّر المناخ.

في ضوء هذه التحديات البيئية المتزايدة، تبرز الحاجة الملحة إلى تبني إنتاج بدائل أكثر استدامة. ويُعد الميثانول منخفض الكربون، الذي يشمل كلًا من الميثانول الأزرق والميثانول الأخضر، من الحلول الواعدة التي تسعى لتحقيق توازن بين التوسع الصناعي وخفض الانبعاثات الكربونية.

فالميثانول الأزرق يُنتج من الغاز الطبيعي عبر عملية إعادة تشكيل البخار، مع تطبيق تقنيات احتجاز الكربون التي تساهم بشكل كبير في تقليل البصمة الكربونية. وتكمن أهمية هذا الخيار في إمكانية دمجه ضمن البنية التحتية الحالية، مما يجعله حلاً عمليًا وفعّالًا على المدى القصير والمتوسط، حتى تتوفر بدائل خضراء بالكامل.

أما **الميثانول الأخضر**، فيتجسد في شكلين رئيسيين يعكسان التطور التكنولوجي في هذا المجال؛ الأول هو **الميثانول الحيوي**، الذي يُنتج من مواد حيوية مثل الكتلة الحيوية، النفايات العضوية، الغاز الحيوي، والسائل الأسود الناتج عن صناعة الورق، ويتميز هذا المسار بالاستدامة

والحياد الكربوني، إلا أن إنتاجه العالمي لا يزال محدودًا، إذ لا يتجاوز حاليًا نحو 0.2 مليون طن سنويًا، مما يعكس الفجوة بين الإمكانات النظرية والتطبيق العملي.

أما الشكل الثاني فهو **الميثانول الكهربائي (E-Methanol)** ، الذي يُنتج من تفاعل الهيدروجين الأخضر الناتج عبر التحليل الكهربائي باستخدام مصادر الطاقة المتجددة، مع ثاني أكسيد الكربون الملتقط من الهواء أو من العمليات الصناعية. ورغم توافق هذا المسار مع أهداف الحياد الكربوني طويلة الأمد، إلا أنه ما يزال في مراحل تجريبية بسبب ارتفاع التكاليف وتعقيد التكنولوجيا.

ورغم هذه التحديات، بدأت تلوح بوادر مشجعة على انتقال إنتاج الميثانول منخفض الكربون من مرحلة البحث إلى التطبيق التجاري، مدعومة بالتقدم التكنولوجي، وتوسع مصادر الطاقة المتجددة، إلى جانب الدعم السياسي والتحفيز المالي في عدد من الدول. وتعد هذه المؤشرات خطوات أولية نحو نضوج سلاسل القيمة الخاصة بالميثانول منخفض الكربون، مما يمهد الطريق لدمجه تدريجيًا في الأسواق العالمية. ومن المتوقع أن تساهم هذه التطورات في خفض تكاليف الإنتاج بمرور الوقت. وتشير التقديرات إلى إمكانية تحسن تنافسيته بحلول عام 2050، أو قبل ذلك، شريطة توفر استثمارات كافية، وتطوير البنية التحتية، وتبني تشريعات داعمة تُسرّع من تبنيه[2].

1.1. أنواع الميثانول وفقًا لمصدر إنتاجه وأثره البيئي

يعود استخدام **الميثانول**، المعروف أيضًا باسم الكحول الخشبي، إلى العصور الوسطى، حيث كان يُنتج من خلال عملية **التقطير الجاف للأخشاب**، وهي تقنية تعتمد على تسخين الخشب في غياب الأكسجين، مما يؤدي إلى تحلله الحراري وإطلاق مزيج من المركبات، من أبرزها الميثانول، الفحم النباتي، القطران، وخل الخشب. وقد استُخدمت هذه الطريقة على نطاق واسع لعدة قرون، وشكّلت مصدرًا مبكرًا للعديد من المركبات العضوية المستخدمة في التطبيقات اليومية، رغم غياب الفهم العلمي الكامل لتركيبها في ذلك الوقت.

شكّل عام **1834**، نقطة تحوّل مهمة، حيث أمكن لأول مرة **عزل الميثانول كمركب نقي** وتحديد صيغته الكيميائية، مما مهّد الطريق أمام تطوير طرق إنتاج أكثر دقة وتنظيمًا على أسس علمية.

[2] IRENA – Innovation Outlook: Renewable Methanol, 2021

ومع تطور التكنولوجيا ودخول الثورة الصناعية، تحوّل إنتاج الميثانول تدريجيًا من خلال عمليات صناعية معقدة تعتمد على **إنتاج الغاز الاصطناعي** من مواد أولية مختلفة مثل **الغاز الطبيعي، الفحم، أو الكتلة الحيوية** .ويُحوَّل هذا الغاز لاحقًا إلى ميثانول عبر تفاعلات كيميائية باستخدام محفزات معدنية تحت ضغط وحرارة محددين.

ويُعد **مصدر المادة الأولية** عاملًا حاسمًا في تحديد **البصمة الكربونية للميثانول** .فالمنتَج من الفحم، المعروف باسم **الميثانول البني**، يُعد الأكثر تلويثًا بسبب الانبعاثات العالية المصاحبة لعملية التغويز، ورغم ذلك ما تزال بعض الدول مثل **الصين** تعتمد عليه نظرًا لتوفر الفحم وتكلفته الاقتصادية المنخفضة[3].

أما **الميثانول الرمادي**، المُنتج من الغاز الطبيعي، فهو أقل انبعاثًا من البني، إلا أنه لا يزال مرتبطًا بالوقود الأحفوري، وبالتالي يُنتج كميات ملحوظة من ثاني أكسيد الكربون.

وفي ظل التوجه العالمي نحو خفض الانبعاثات الكربونية وتعزيز استدامة الطاقة، ظهر **الميثانول الأزرق** كخيار انتقالي واعد، يتم إنتاجه من الغاز الطبيعي أيضًا، ولكن مع تطبيق تقنيات احتجاز واستخدام أو تخزين الكربون، حيث يُلتقط ثاني أكسيد الكربون الناتج من العمليات الصناعية ويتم إما إعادة استخدامه في عمليات صناعية أخرى أو تخزينه بشكل آمن في باطن الأرض.[4] ويُعد هذا الخيار حلًا عمليًا لتقليل الانبعاثات دون الحاجة إلى تعديلات جوهرية في البنية التحتية، مما يجعله ملائمًا للدول التي تسعى لتحقيق تقدم سريع في مسارات الاقتصاد منخفض الكربون.

ومع تصاعد الزخم العالمي لتحقيق **الحياد الكربوني بحلول عام 2050**، يُنظر إلى **الميثانول الأخضر** بوصفه الحل الأكثر استدامة على المدى الطويل.

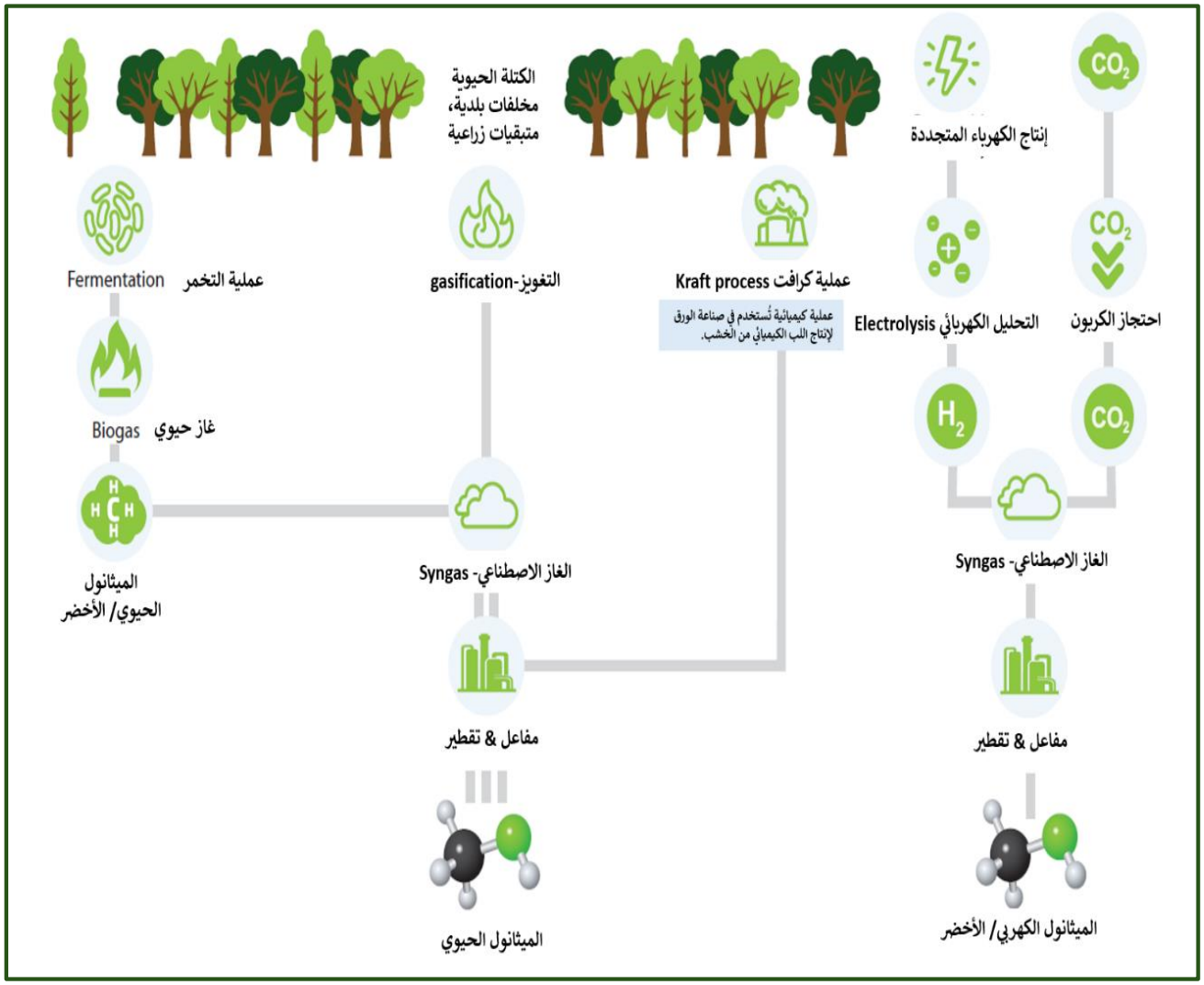
ويأخذ الميثانول الأخضر شكلين رئيسيين يعكسان التطور التكنولوجي في هذا المجال. يتمثل المسار الأول في الميثانول **الكهربائي (E-Methanol)**، والذي يُنتَج من تفاعل **الهيدروجين الأخضر** –المستخلص عبر التحليل الكهربائي للمياه باستخدام مصادر طاقة متجددة مثل الشمس أو الرياح – مع **ثاني أكسيد الكربون المُلتقط** من الهواء الجوي أو من الانبعاثات الصناعية.

[3] IEA – Methanol from Coal in China
[4] Methanol Institute – Methanol Production Pathways

أما المسار الثاني، فيتعلق بإنتاج **الميثانول الحيوي**، الذي يعتمد على معالجة مواد أولية عضوية مثل الكتلة الحيوية، والنفايات الصلبة، والغاز الحيوي، والسائل الأسود الناتج عن صناعة الورق، مما يُوفر حلًا مستدامًا لإعادة تدوير النفايات وتحويلها إلى طاقة نظيفة. تُعتبر النفايات الصلبة البلدية **(MSW)** من المصادر الواعدة لإنتاج الميثانول الحيوي، حيث يُقدّر حجمها عالميًا بنحو 1.3 مليار طن متري سنويًا. ومن هذه الكمية، يُمكن استغلال حوالي 420 مليون طن[5] من المواد العضوية القابلة للتحويل لإنتاج مجموعة من الكيماويات المتجددة، على رأسها الميثانول. يبين **الشكل (1-2)** المسارات الرئيسية لإنتاج الميثانول الأخضر منخفض الكربون.

الشكل (1-2)

المسارات الرئيسية لإنتاج الميثانول الأخضر منخفض الكربون



المصدر: The Methanol Institute and QAFAQ

[5] تجدر الإشارة إلى أن هذه الكمية تمثل المادة الأولية المحتملة، وليس كل هذه الكتلة تتحول فعليًا إلى ميثانول، نظرًا لفقدان الكفاءة في عمليات التحويل وتقلبات التكنولوجيا المستخدمة

2.1. البصمة الكربونية للميثانول ومنهجية احتسابها

تمثل **البصمة الكربونية** للميثانول مؤشرًا كميًا لقياس إجمالي انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون المكافئ (**CO_2e**) المرتبطة بدورة حياته الكاملة، بدءًا من استخراج المواد الخام، مرورًا بعمليات التصنيع والمعالجة، وانتهاءً بالاستخدام النهائي[6]. ويشمل هذا التقييم الانبعاثات المباشرة، الناتجة عن التفاعلات الكيميائية أو احتراق الوقود داخل المنشأة. إضافة إلى الانبعاثات غير المباشرة، مثل تلك المرتبطة بإنتاج الكهرباء أو المواد الوسيطة.

يُستخدم منهج التوازن الكتلي للكربون لتقدير الانبعاثات بدقة من خلال حساب كمية الكربون الداخلة إلى وحدة الإنتاج عبر المواد الخام والوقود، ومقارنتها بكمية الكربون المحتوية في الميثانول المنتج والانبعاثات الصادرة. ويفترض أن الفرق بين المدخلات والمخرجات يعكس كمية الكربون المنبعثة إلى الهواء الجوي على شكل ثاني أكسيد الكربون ، مما يتيح حسابًا دقيقًا للبصمة الكربونية لعملية الإنتاج.

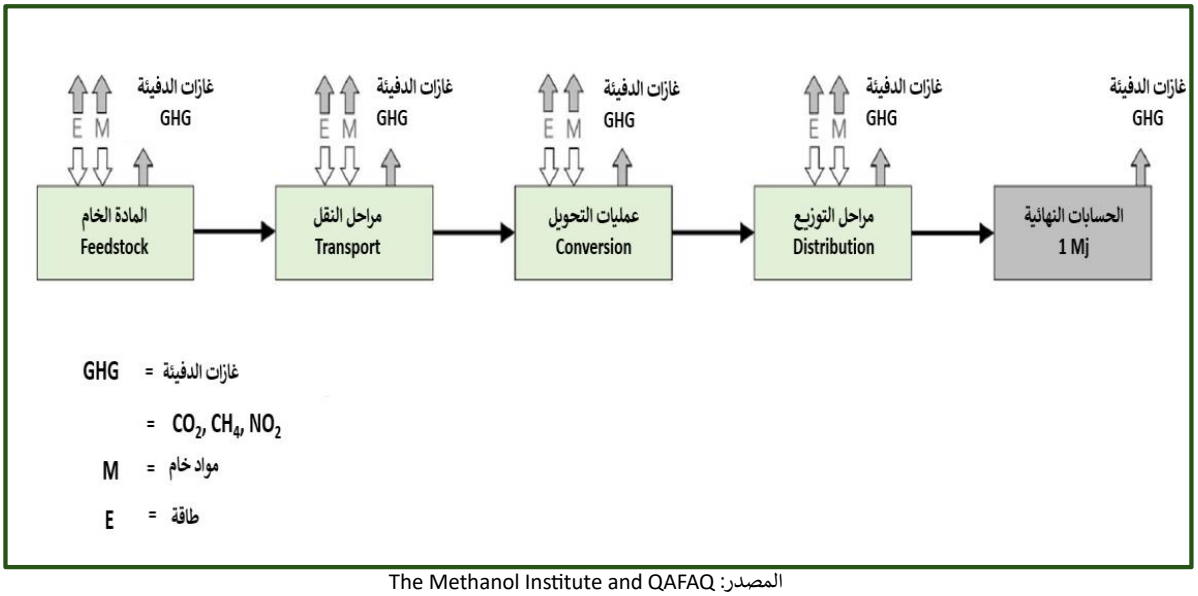
تُحتسب البصمة الكربونية للميثانول على مستوى كل منشأة إنتاج بشكل مستقل، بما يضمن تمثيلًا واقعيًا ودرجة عالية من الشفافية. ويأخذ هذا التقييم في الاعتبار اختلاف نوعية المدخلات، وكفاءة العمليات، ومزيج الطاقة المستخدم، إضافة إلى التقنيات المعتمدة للحد من الانبعاثات. ويُشابه هذا المنهج ما يُعتمد في تقييم البصمة الكربونية لأنواع الوقود الأخرى مثل الغازولين، والديزل، والهيدروجين، مما يسمح بإجراء مقارنات عادلة وموثوقة بين مختلف أنواع الميثانول، سواء المنتجة من مصادر أحفورية أو متجددة أو منخفضة الكربون[7].يبين **الشكل (1-3)** منهجية حساب انبعاثات غازات الدفيئة لدورة الحياة الكاملة للميثانول.

[6] كما هو متعارف عليه في منهجية cradle-to-grave.

[7] MI, Carbon footprint of methanol for: Methanol Institute,2022

شكل (1-3)

منهجية حساب انبعاثات غازات الدفيئة لدورة الحياة الكاملة للميثانول



المصدر: The Methanol Institute and QAFAQ

يعزز هذا الأسلوب إمكانية التحقق من الامتثال للمعايير الدولية، مثل البروتوكولات المعتمدة في الاتحاد الأوروبي، إضافة إلى المبادئ التوجيهية لمنهجيات تحليل دورة الحياة **LCA**. كما يُستخدم كأساس لمنح الاعتمادات البيئية أو احتساب نسب خفض الانبعاثات ضمن نظم تداول الكربون والمبادرات الطوعية لتقليل البصمة الكربونية. لذلك، لا تُعتبر البصمة الكربونية للميثانول مجرد مؤشر عام، بل أداة دقيقة لتقييم الأثر البيئي لكل منشأة على حدة[8].

وفي هذا السياق، تشير الأدبيات العلمية إلى وجود فجوة واضحة في البيانات المحدثة حول البصمة الكربونية للميثانول، مما استدعى الحاجة إلى إطلاق تقييمات أكثر دقة تواكب التحولات المتسارعة في قطاع الاستدامة.

استجابةً لهذا التحدي، أطلق معهد الميثانول في فبراير 2022 مشروعًا مشتركًا مع شركة الاستشارات المستقلة **Gear Up**، لتقييم دورة حياة الميثانول باستخدام بيانات حقيقية تغطي مجموعة متنوعة من المواد الخام ومسارات الإنتاج.

[8] International Council on Clean Transportation (ICCT) – "Carbon Intensity of Methanol" (2021)

وقد استند المشروع إلى بيانات مستمدة من 12 شركة تغطي طيفًا واسعًا من منشآت إنتاج الميثانول حول العالم، شملت منشآت قائمة وأخرى قيد الإنشاء. وتضمنت هذه البيانات معلومات تفصيلية حول نوعية المدخلات، وطرق التصنيع، واستهلاك الطاقة، وخصائص المخرجات، مما أتاح تطبيق منهجية تقييم دورة الحياة بدقة وموثوقية. وركّز التقييم على قياس انبعاثات غازات الدفيئة الرئيسية، مثل ثاني أكسيد الكربون، والميثان، وأكسيد النيتروز، مع تحويلها إلى وحدة موحدة "مكافئ ثاني أكسيد الكربون (**CO_2-eq**) " ، الأمر الذي يتيح مقارنة دقيقة وعادلة للبصمة الكربونية بين مختلف تقنيات الإنتاج ومصادر الانبعاث.

لتوحيد الحسابات وتبسيطها، تم اعتماد منهجية التوجيه الأوروبي للطاقة المتجددة[9] . وعلى الرغم من أنها صُممت أصلاً لتقييم الوقود الحيوي، إلا أنها تتميز بمرونة عالية تتيح تطبيقها على مجموعة واسعة من المواد الخام والطُرُق الإنتاجية. وفي هذا الإطار، طورت شركة **Gear Up** أداة حسابية متقدمة تستند إلى التوجيه الأوروبي للطاقة المتجددة ، تُسهم بشكل كبير في تسريع وتسهيل عمليات التقييم الميداني للبصمة الكربونية على مستوى المنشآت. وبذلك، يُمكن استخدام هذه الأداة لضمان **توحيد المنهجية ودقة حساب الانبعاثات**، مما يُسهم في تعزيز إمكانية مقارنة النتائج بين مختلف منشآت الإنتاج، ويضمن توافقها مع المعايير الأوروبية، الأمر الذي يدعم تحقيق أهداف الاستدامة والامتثال البيئي بكفاءة أكبر.

في موازاة ذلك، يُستخدم في الولايات المتحدة نموذج **GREET**، المطور من قبل مختبر **Argonne** الوطني، لتقييم الأثر البيئي لمختلف مسارات إنتاج الوقود، لا سيما الميثانول المنتج من الغاز الطبيعي، الكتلة الحيوية، أو الفحم. ويُعتبر نموذج **GREET** أداة رائدة عالميًا وقادرة على تحليل سيناريوهات متعددة ومتنوعة، إلا أنه يواجه تحديات تتطلب تحديثه، خاصةً لعدم شمولية مسارات إنتاج الميثانول من مصادر الطاقة المتجددة أو النماذج الإنتاجية الهجينة التي تعتمد على أكثر من مادة خام في منشأة واحدة.

تُبرز هذه الحاجة الملحة أهمية تطوير واستخدام منهجيات وأدوات حديثة، مثل تلك المبنية على التوجيه الأوروبي وأداة **Gear Up**، التي تقدم تغطية أشمل لمسارات الإنتاج المتجددة والهجينة.

[9] RED II

وبدورها، تعزز هذه الأدوات دقة وموثوقية تقييم البصمة الكربونية، مما يسهم بشكل فاعل في دعم جهود الانتقال نحو اقتصاد منخفض الكربون[10] .

1.2.1. فجوة البيانات وتطور المبادرات الحديثة لتقييم البصمة الكربونية للميثانول

تُظهر المقارنة بين منهجيات تقييم دورة الحياة، لكل من منهجية توجيهات الطاقة المتجددة الأوروبية، والنموذج الأمريكي (GREET) ، بعض الفروقات الجوهرية في طريقة التعامل مع المنتجات الثانوية الناتجة خلال عملية الإنتاج. ففي حين تعتمد منهجية التوجه الأوروبي للطاقة المتجددة على مبدأ توزيع التأثيرات المناخية بالتساوي بين جميع المنتجات، بما فيها المنتجات الثانوية[11]، تأخذ منهجية GREET نهجًا مختلفًا، حيث يُفترض أن بعض المنتجات الثانوية قد تُستخدم كبدائل لمنتجات أخرى في السوق، مما يسمح بخصم ما يُعرف بالانبعاثات المتجنبة من الحصيلة الإجمالية لانبعاثات المنتج الرئيسي.

ورغم هذا التباين، فإن كلا المنهجيتين تستندان إلى المعايير الدولية ISO 14040 و ISO 14044، التي توفر إطارًا مرنًا ومتكاملًا لتقييم دورة الحياة، يسمح باختيار الطريقة الأنسب لمعالجة المنتجات الثانوية، وفقًا لطبيعة العمليات والمنتجات قيد الدراسة. وبذلك تضمن هذه المعايير تحقيق تقييم دقيق وشفاف يتوافق مع أفضل الممارسات الدولية، مع إمكانية التكيف بحسب متطلبات السوق والبيئة.

وبما أن عملية إنتاج الميثانول لا تسفر عادةً عن منتجات ثانوية ذات تأثير كبير على البصمة الكربونية، تكون نتائج تقييم دورة الحياة غالبًا متقاربة عند استخدام نفس البيانات الأساسية، سواء في نموذج التوجيه الأوروبي أو نموذج GREET . هذا التقارب في النتائج يعزز من موثوقية المقارنة بين المنهجيتين، ويجعلها قابلة للاعتماد في عمليات صنع القرار، سواء على مستوى السياسات العامة أو الاستثمارات الخاصة في مشروعات إنتاج الميثانول منخفض الكربون أو المتجدد.

10 carbon footprint of methanol

11 إذا كان مصنع ما ينتج ميثانولً وينتج في نفس الوقت منتجًا ثانويًا مثل حرارة فائضة أو مادة كيميائية يمكن استخدامها كوقود أو مادة خام بديلة، فإن هذه المنتجات الثانوية يمكن أن تقلل من الحاجة لإنتاج نفس المنتجات أو المواد في مصانع أخرى باستخدام مصادر طاقة أو مواد خام مختلفة، ربما أكثر تلويثًا أو استهلاكًا للموارد.

وفي هذا السياق، يُعد إنتاج الميثانول الأخضر فرصة حقيقية لتقليل الانبعاثات الكربونية بشكل ملموس، بل وقد يُحقق في بعض السيناريوهات انبعاثات كربونية سالبة، حيث تستهلك العملية كميات من ثاني أكسيد الكربون تفوق ما تطلقه، مما يجعل هذا الخيار محوريًا في خطط الانتقال نحو اقتصاد خالٍ من الانبعاثات.

1.1.2.1. تقدير البصمة الكربونية للميثانول من مصادر أحفورية

يعتمد إنتاج الميثانول التقليدي بشكل أساسي على مواد أولية أحفورية، وفي مقدمتها الغاز الطبيعي والفحم. وتتم العملية من خلال سلسلة صناعية تبدأ بتحويل هذه المواد إلى غاز اصطناعي **Syngas**.

عند استخدام الغاز الطبيعي كمادة خام، يتم إنتاج الغاز الاصطناعي عادةً عن طريق إعادة التشكيل البخاري **Steam Reforming**، حيث يتم تمرير البخار الساخن على الهيدروكربونات لتفكيكها إلى مكوناتها الغازية. هذه الطريقة توفر نسبًا مرتفعة من الهيدروجين مقارنة بأول أكسيد الكربون، ما يجعلها مناسبة لإنتاج الميثانول.

أما في حالة استخدام الفحم كمادة أولية، فيُعتمد على تقنية **التغويز (Gasification)**، حيث يُعالَج الفحم بالبخار مع الأوكسجين أو الهواء لإنتاج خليط الغاز الاصطناعي الذي يتكوّن بشكل رئيس من أول أكسيد الكربون والهيدروجين. ولرفع نسبة الهيدروجين في هذا الخليط وتحقيق التكوين المرغوب منه، تُدرج ضمن العملية خطوة تفاعل تحويل غاز الماء **Water-Gas Shift Reaction**، الذي يُحوّل جزءًا من أول أكسيد الكربون عبر تفاعله مع بخار الماء إلى هيدروجين وثاني أكسيد الكربون. وتُعد هذه المنظومة أكثر تعقيدًا من حيث المتطلبات التقنية والتكلفة التشغيلية، كما أنها ترتبط بانبعاثات كربونية مرتفعة نسبيًا، مما يستدعي تطبيق تقنيات فعالة لاحتجاز الكربون وتخزينه أو معالجته بطرق أخرى تحدّ من الأثر البيئي للعملية.

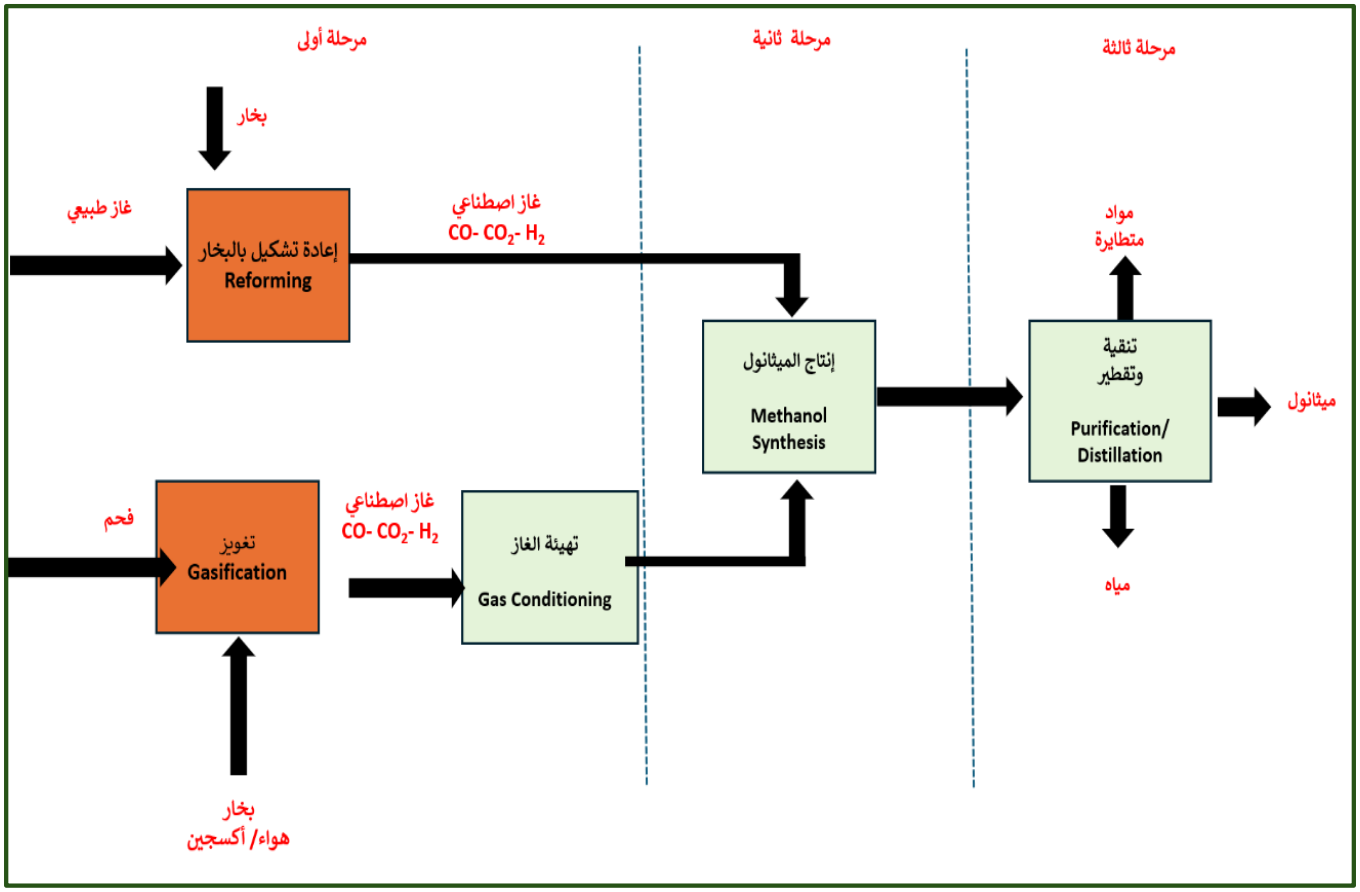
بعد الحصول على الغاز الاصطناعي بالمواصفات المطلوبة، تبدأ مرحلة **الإنتاج التحفيزي للميثانول**، حيث يتفاعل أول أكسيد الكربون والهيدروجين باستخدام محفز معدني [12]، تحت ضغط مرتفع ودرجة حرارة تتراوح بين 200-300 مْ. يُنتج هذا التفاعل ميثانول خامًا يحتوي على شوائب.

[12] (غالبًا مزيج من النحاس والزنك والألومنيوم)

ثم تأتي مرحلة **التنقية**، التي تتم عادةً باستخدام عمود واحد إلى ثلاثة أعمدة تقطير، تبعًا لمستوى النقاء المطلوب. العمود الأول يُستخدم لفصل الغازات الطيّارة مثل غاز ثاني أكسيد الكربون والميثان، بينما تُخصص الأعمدة اللاحقة لإزالة الماء والشوائب العضوية.[13] ويُنتج عن ذلك نوعان رئيسيان من الميثانول، **الميثانول الكيميائي (Grade AA)** ، والذي يتميز بنقاء يصل إلى **99.85%**، ويُستخدم في الصناعات الكيميائية والدوائية، ويتطلب مستويات منخفضة للغاية من الشوائب (مثل الماء والكحوليات الأخرى). أو **ميثانول الوقود**، والذي يُستخدم كوقود في محركات الاحتراق أو كمادة مضافة للوقود، بنقاء يقارب **97%**، ويحتوي على 1% ماء، و1.5% كحوليات، و0.5% زيوت عملية[14]. يبين **الشكل (1-4)** تسلسل عمليات إنتاج الميثانول التقليدي انطلاقًا من الفحم أو الغاز الطبيعي، مع توضيح مراحل تكوين الغاز الاصطناعي، التخليق، والتنقية.

الشكل (1-4)

تسلسل عمليات إنتاج الميثانول التقليدي انطلاقًا من الفحم أو الغاز الطبيعي



المصدر: Feasibility Study of Green Methanol Production in the Port of Egersund, 2024

[13] مثل الهيدروكربونات غير المرغوب فيها، القطران، المركبات العطرية، والأملاح العضوية، التي يمكن أن تؤثر سلبًا على جودة المنتج أو فعالية المحفزات المستخدمة في التفاعل.

[14] هي الزيوت التي تُستخدم أثناء عمليات التصنيع أو التكرير والإنتاج الصناعي، والتي قد تلوث المنتج النهائي بكميات صغيرة غير مرغوب فيه.

وفي هذا السياق، يُعد **الميثانول البني** المنتج من الفحم الأعلى من حيث البصمة الكربونية بين أنواع الميثانول التقليدي، حيث تشير التقديرات إلى أن مراحل إنتاجه – بدءًا من تعدين الفحم، مرورًا بتغويزه، وانتهاءً بتحويله إلى غاز اصطناعي – تؤدي إلى انبعاثات قد تصل إلى 300جرام مكافئ ثاني أكسيد الكربون لكل ميجا جول من الطاقة الحرارية. وتُعزى هذه النسبة المرتفعة إلى مزيج من الانبعاثات المباشرة الناتجة عن التفاعلات الكيميائية، والانبعاثات غير المباشرة الناتجة عن استخدام الطاقة الأحفورية لتشغيل المنشآت الصناعية.

ورغم هذه القيمة المرتفعة، فإن هناك إمكانات واضحة لتقليل الانبعاثات الكربونية المرتبطة بإنتاج الميثانول البني، من خلال تحسين إدارة الكربون داخل المنشآت. وتشمل هذه التحسينات استخدام تقنيات إعادة تدوير ثاني أكسيد الكربون داخل الحلقة الإنتاجية، أو الاعتماد على تقنيات احتجاز وتخزين الكربون، وهو ما يمكن أن يؤدي إلى خفض الانبعاثات إلى مستويات أقرب للمعايير البيئية المقبولة. كما أن دمج مصادر الطاقة المتجددة في أجزاء من العملية، مثل تشغيل وحدات التحويل بالكهرباء من مصادر متجددة، يتيح تحقيق خفض إضافي في البصمة الكربونية.

وفي المقابل، يُظهر **الميثانول الرمادي** المنتج من الغاز الطبيعي أداءً أفضل نسبيًا من حيث الكفاءة والانبعاثات، حيث تُقدَّر البصمة الكربونية لإنتاجه في المنشآت الحديثة بحوالي **110** جرام مكافئ ثاني أكسيد الكربون لكل ميجا جول من الطاقة الحرارية. ويمثل ذلك ارتفاعًا نسبيًا عن التقديرات السابقة التي كانت تُقَدَّر بنحو **97** جرام مكافئ ثاني أكسيد الكربون لكل ميجا جول من الطاقة الحرارية، وهو ما يعكس تطور أدوات القياس وزيادة دقة احتساب الانبعاثات، لا سيما غير المباشرة منها. وتتباين هذه القيم حسب نوعية الغاز الطبيعي المستخدم وظروف معالجته المسبقة[15]، حيث يمكن أن تنخفض إلى **103** جرام مكافئ ثاني أكسيد الكربون لكل ميجا جول من الطاقة الحرارية في حال استخدام غاز منخفض الكربون.

وتشير دراسات الجدوى إلى أن إعادة تدوير جزء من غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج عن التفاعل وإعادة حقنه في مفاعل إنتاج الميثانول يُساهم في خفض الانبعاثات إلى نطاق يتراوح بين

[15] يُقصد بالغاز الطبيعي منخفض الكربون أو المعالج مسبقًا ذلك الغاز الذي يتميز بانخفاض محتواه من الكربون الكلي أو خضوعه لمعالجة أولية لإزالة الشوائب الكربونية مثل ثاني أكسيد الكربون والمركبات العضوية الثقيلة قبل استخدامه في العمليات الصناعية. ويكمن الفرق بينهما في أن الغاز منخفض الكربون هو بطبيعته غني بالهيدروجين ونقي نسبيًا من المكونات الكربونية، بينما الغاز المعالج مسبقًا قد يكون في الأصل غازًا غنيًا بالكربون، لكن تتم معالجته لتقليل محتواه الكربوني. ويُسهم كلا النوعين في تقليل البصمة الكربونية النهائية للمنتجات، بما في ذلك الميثانول، من خلال تقليل الانبعاثات الناتجة أثناء الإنتاج وتحسين كفاءة التفاعل الكيميائي.

101-93 جرام مكافئ ثاني أكسيد الكربون لكل ميجا جول من الطاقة الحرارية. ويُعرف الميثانول المنتج بهذه الطريقة، الذي يتميز بانخفاض انبعاثاته من خلال احتجاز ثاني أكسيد الكربون، بـ **الميثانول الأزرق.** وتتزايد فرص تحسين الأداء البيئي حين يُدمج في العملية الهيدروجين الأخضر أو الكهرباء المتجددة، مما يعزز من توافق إنتاج الميثانول القائم على الغاز الطبيعي مع توجهات الحياد الكربوني .وبذلك، يمكن لهذا النوع من الميثانول أن يشكل خيارًا مرحليًا واعدًا نحو سلاسل إمداد كيميائية منخفضة الكربون، خاصة في القطاعات التي يصعب فيها التحول الكامل إلى البدائل المتجددة على المدى القصير.

2.1.2.1. تقدير البصمة الكربونية للميثانول الأخضر

يمثل الميثانول الأخضر مجموعة من المسارات الإنتاجية منخفضة الكربون، والتي تعتمد على مصادر متجددة لتحقيق انبعاثات أقل بكثير من نظيرتها الأحفورية. ويُعد الميثانول الحيوي أحد المسارات الرئيسية لإنتاج هذا النوع من الميثانول، إلى جانب الميثانول المنتج كهربائيًا من الهيدروجين الأخضر وثاني أكسيد الكربون المحتجز.

يُنتج **الميثانول الحيوي** من مواد عضوية متجددة تشمل الميثان الحيوي، والكتلة الحيوية، والنفايات البلدية الصلبة، حيث تُظهر معظم هذه المسارات انبعاثات كربونية منخفضة تتراوح بين 10-40 جرامًا مكافئًا لثاني أكسيد الكربون لكل ميجا جول من الطاقة الحرارية .وفي بعض السيناريوهات، قد تحقق هذه التقنية انبعاثات كربونية سالبة تصل إلى (-)55 جرامًا مكافئًا لثاني أكسيد الكربون لكل ميجا جول من الطاقة الحرارية، كما هو الحال عند استخدام الميثان الحيوي المستخلص من روث الحيوانات، مما يُعزز من جدواها البيئية في سياق التحول إلى مصادر طاقة مستدامة.

وتُعد منشآت الهضم اللاهوائي إحدى الركائز الأساسية لهذا المسار، حيث يُستخدم غاز الميثان الحيوي الناتج عن الهضم في وحدات إنتاج الميثانول، معتمدًا على نفس التقنيات الحرارية والتوازنات المادية والحرارية المستخدمة في إنتاج الميثانول من الغاز الطبيعي، ولكن مع بصمة كربونية أقل بكثير.

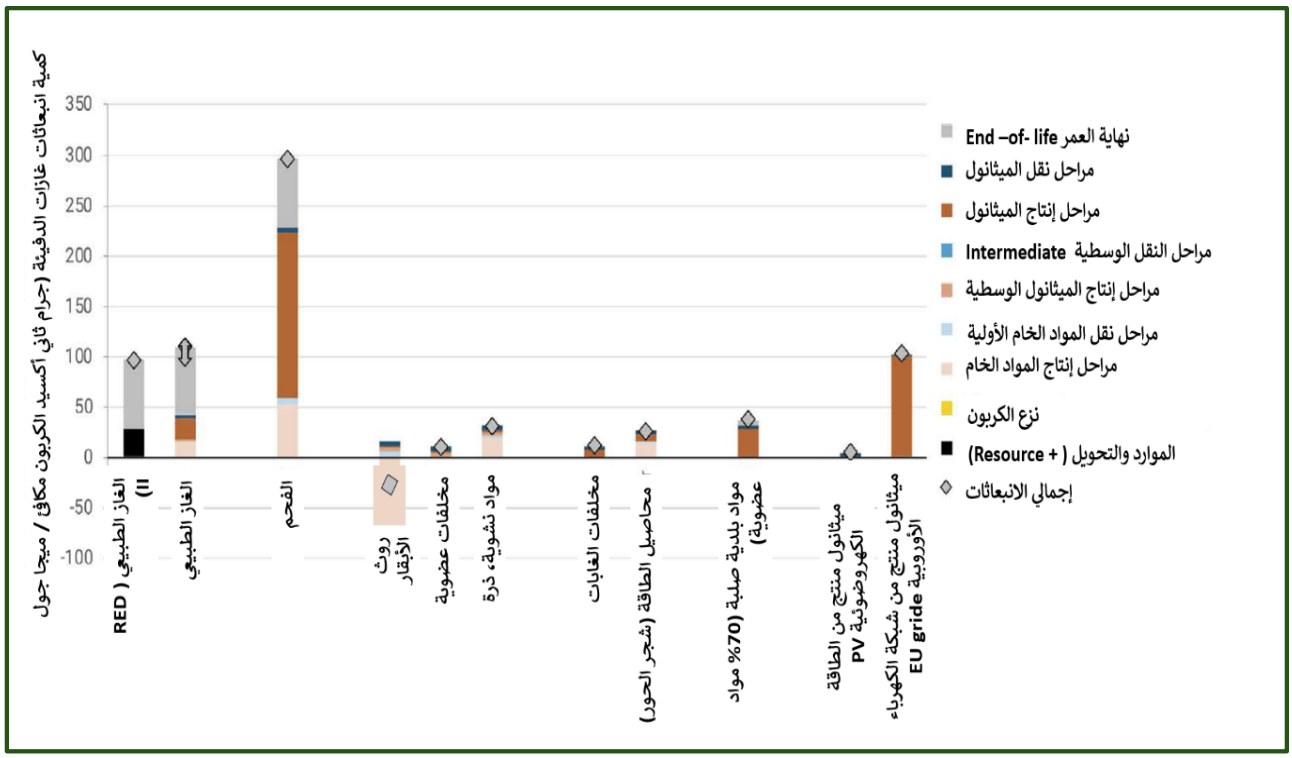
وتتضمن دورة الإنتاج الحيوي مراحل مثل **التغويز أو التخمر في بيئات خالية من الأوكسجين**، تليها تحويل الغازات الناتجة إلى ميثانول باستخدام تقنيات حرارية تقليدية. وتمتاز هذه الدورة بأن **انبعاثات نهاية العمر تُعد صفرية**، حيث إن الكربون المنبعث عند استخدام الميثانول قد تم امتصاصه مسبقًا خلال نمو الكتلة الحيوية، مما يُحقق توازنًا كربونيًا في دورة الحياة.

في المقابل، يُنتج **الميثانول الكهربائي** عبر تفاعل ثاني أكسيد الكربون مع الهيدروجين الأخضر، الذي يتم الحصول عليه من خلال التحليل الكهربائي للماء باستخدام كهرباء مولّدة من مصادر طاقة متجددة مثل الرياح أو الطاقة الشمسية. وتشير التقديرات الحديثة إلى أن هذا المسار يمكن أن يحقق انبعاثات تتراوح بين **16-8.7** جرامًا مكافئًا لثاني أكسيد الكربون لكل ميجا جول من الطاقة الحرارية، مما يجعله خيارًا منخفض الانبعاثات الكربونية مقارنةً بالميثانول الأحفوري[16]. إلا أن هذه القيم قد ترتفع إلى نحو **26** جرامًا مكافئًا لكل ميجا جول من الطاقة الحرارية إذا تم استخدام مزيج من الكهرباء المتجددة والتقليدية في عملية الإنتاج[17]. يبين الشكل (1-5) البصمة الكربونية لمختلف أنواع الميثانول من مصادر مختلفة.

[16] Emma Beroskeon, Carbon footprint calculation of e-methanol,2024.
[17] Life cycle assessment of e-/bio- methanol and e-/grey-/blue- ammonia for maritime transport,2025.

الشكل (1-5)

البصمة الكربونية لمختلف أنواع الميثانول من مصادر مختلفة



المصدر: Carbon Footprint Of Methanol

3.1. تقييم تقني - اقتصادي لمسارات إنتاج الميثانول الأخضر

على الرغم من أن الميثانول الأخضر، سواء الحيوي أو المُنتَج كهربائيًا من مصادر متجددة، يقدم فوائد بيئية كبيرة عبر تقليل الانبعاثات الكربونية، فإن التكلفة المرتفعة لإنتاجه تُعد من أبرز التحديات التي تحول دون اعتماده على نطاق تجاري واسع . حاليًا، تتراوح تكلفة إنتاج هذا النوع من الميثانول بين **3-4** أضعاف تكلفة إنتاج الميثانول التقليدي من الغاز الطبيعي أو الفحم، والتي تُقدَّر عمومًا بين 100-250 دولارًا أمريكيًا للطن[18] .وتُعزى هذه التكلفة العالية إلى تعقيد تقنيات الإنتاج، وندرة البنى التحتية المخصصة، وارتفاع تكلفة المواد الأولية وإنتاج الطاقة المتجددة[19].

ومع ذلك، فإن هناك إمكانات كبيرة لتقليص هذه الفجوة من خلال تحسين تقنيات تغويز الكتلة الحيوية، ومعالجة النفايات الصلبة، والاعتماد على مدخلات منخفضة التكلفة مثل النفايات

[18] CH2ARGE, Green Methanol 2023

[19] IRENA, Innovation Outlook, Renewable Methanol,2022

الزراعية أو الحضرية .كما أن تطور الاقتصاد الدائري وتطبيقاته في قطاع الطاقة يمكن أن يسهم في تعزيز الجدوى الاقتصادية لهذه التقنيات.

وفي هذا السياق، تتسارع الجهود العالمية لتطوير مسارات إنتاج الميثانول الأخضر، لا سيما في مجال **الهدرجة التحفيزية** لثاني أكسيد الكربون[20] باستخدام الهيدروجين المتجدد. ويحظى هذا المسار باهتمام علمي متزايد كونه يوفّر حلاً مزدوجًا، فمن جهة يُسهم في إعادة تدوير انبعاثات الكربون، ومن جهة أخرى يدعم استخدام الهيدروجين الأخضر المُنتج من مصادر متجددة، مما يُعزز التكامل مع تقنيات احتجاز الكربون واستخدامه، ويساهم في بناء اقتصاد منخفض الكربون.

إلى جانب ذلك، تواصل التقنيات الأكثر نضجًا مثل **تحويل الكتلة الحيوية** إلى ميثانول حيوي إثبات جدواها التقنية، حيث تعتمد على تحويل المواد العضوية إلى غاز اصطناعي ثم إلى ميثانول، وهو نهج مجرَّب نسبيًا. بينما تظهر تقنيات ناشئة **كعملية التحليل الكهربائي المباشر** كخيارات واعدة، إذ تسعى إلى إنتاج الميثانول مباشرة من ثاني أكسيد الكربون والماء باستخدام الكهرباء المتجددة، دون الحاجة إلى خطوات وسيطة، رغم أنها لا تزال في مراحل التطوير الأولية.

وبهدف تقييم الجدوى التجارية والتنافسية لهذه المسارات مقارنةً بالميثانول الأحفوري، تم تحليل **ثلاث مسارات رئيسية لإنتاج الميثانول الأخضر**:

1. **مسار تحويل الكتلة الحيوية إلى ميثانول عبر التغويز** :يُعد هذا المسار من الخيارات التي تعتمد على موارد متجددة مثل المخلفات الزراعية، حيث تُحوَّل الكتلة الحيوية إلى غاز اصطناعي يُستخدم كمادة وسيطة لإنتاج الميثانول.
2. **مسار التحويل غير المباشر لثاني أكسيد الكربون إلى ميثانول** :يعتمد هذا النهج على إنتاج غاز اصطناعي كوسيط، ثم يُحوَّل لاحقًا إلى ميثانول، ويُعد حلاً مرنًا لتحسين كفاءة إعادة تدوير الكربون.
3. **مسار التحويل المباشر لثاني أكسيد الكربون إلى ميثانول باستخدام التحليل الكهربائي** :وهو أحد الابتكارات الحديثة التي تعتمد على استخدام التحليل الكهربائي للماء لإنتاج الهيدروجين

[20] تعد الهدرجة التحفيزية عملية كيميائية يتم فيها **دمج ثاني أكسيد الكربون (CO_2) مع الهيدروجين (H_2) في وجود عامل مساعد أو محفّز** –عادة ما يكون معدنًا مثل النحاس أو الزنك – لإنتاج مركبات مفيدة مثل الميثانول. تُجرى هذه التفاعلات تحت **درجات حرارة وضغوط معينة**، حيث يعمل المحفز على **تسريع التفاعل دون أن يستهلك**، ويؤدي إلى تحسين كفاءة تحويلCO_2 ، الذي يُعد غازًا ضارًا من حيث الانبعاثات، إلى وقود سائل نظيف يُمكن استخدامه في مجالات النقل والصناعة والطاقة.

الأخضر، الذي يدخل في تفاعل مباشر مع غاز ثاني أكسيد الكربون لإنتاج الميثانول، ويتميز هذا المسار بإمكاناته العالية في حال توفر طاقة كهربائية متجددة ومنخفضة التكلفة.

ولتوفير رؤية شاملة لجدوى هذه المسارات من النواحي الاقتصادية والبيئية، يوفّر التقييم متعدد الأبعاد أداة فعالة لتحديد مسارات الإنتاج الأكثر كفاءة واستدامة. ويساعد ذلك في توجيه الاستثمارات المستقبلية نحو خيارات واقعية تدعم التحول التدريجي نحو اقتصاد منخفض الكربون.

وفي هذا السياق، تم اعتماد أربعة معايير رئيسية للمقارنة بين تقنيات إنتاج الميثانول المتجدد ونظيراتها الأحفورية، وشملت:

1. **الحد الأدنى لسعر البيع Minimum Selling Price** : والذي يُستخدم كمؤشر على القدرة التنافسية الاقتصادية في السوق العالمية.
2. **كفاءة الكربون Carbon Efficiency** :التي تقيس مدى خفض الانبعاثات الكربونية مقارنة بالمدخلات، وهو عامل محوري في التقييم البيئي والاستدامة.
3. **كفاءة الطاقة Energy Efficiency** :التي تُحدد مدى فعالية استخدام الموارد والطاقة في العملية الإنتاجية.
4. **مستوى الجاهزية التقنية Technology Readiness Level – TRL**: ويشير إلى مدى تطور التقنية وقربها من مرحلة التطبيق التجاري الواسع.

1.3.1. مسار تحويل الكتلة الحيوية إلى ميثانول عبر التغويز

حظيت عملية تغويز الكتلة الحيوية **Biomass Gasification** لإنتاج الميثانول بدراسات واسعة وتم تشغيلها في بعض الحالات على المستوى التجاري. يتم في هذا المسار معالجة الكتلة الحيوية اللجنوسليلوزية مسبقًا وتغذيتها إلى جهاز تغويز غير مباشر **Indirect Gasifier** مع البخار. حيث تتحلل الكتلة الحيوية إلى غاز اصطناعي، وقطران **Tar**، وفحم نباتي **Chars**.

يُستخدم القطران والفحم كمصدر رئيسي للحرارة اللازمة لجهاز التغويز، الذي يعمل عند درجة حرارة 867 °م، وضغط 2.4 جوي. يتم توجيه الغاز الاصطناعي إلى مرحلة التنظيف والتبريد "**Cleanup and Quench Step**". بعد مرحلة التنظيف، يُرسل الغاز الاصطناعي إلى وحدة إزالة الغازات الحمضية حيث يتم تقليل تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون إلى حوالي 5%. تتم عملية إنتاج

الميثانول عند درجة حرارة ثابتة تبلغ 250°م، وضغط 49.7 ضغط جوي باستخدام محفز تجاري من أكسيد النحاس/الزنك/الألومينا.

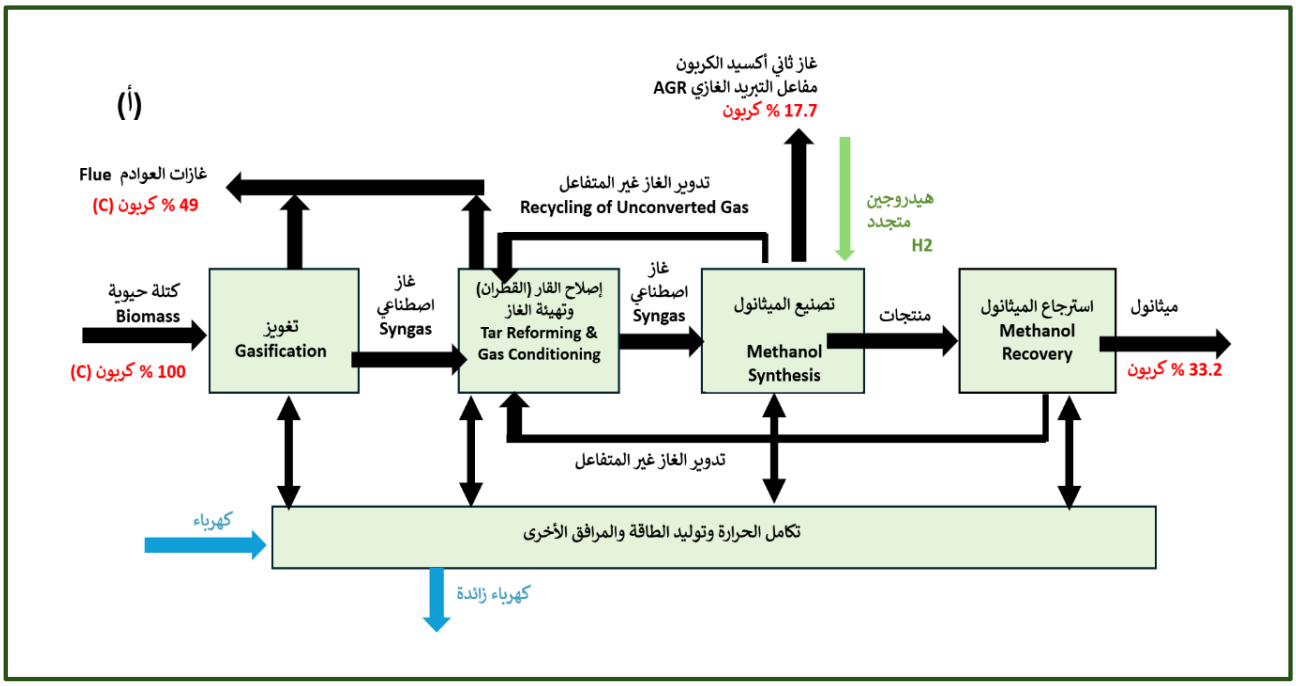
تم إضافة سيناريوهات إضافية لدراسة إمكانية زيادة كفاءة الكربون في العملية. تتضمن السيناريوهات كل من استيراد الكهرباء المتجددة الهيدروجين المتجدد مع استخدام ثاني أكسيد الكربون[21]. يهدف سيناريو استيراد الكهرباء المتجددة إلى تقليل الاعتماد كمية الغاز الاصطناعي المخصص كوقود للعملية، مما قد يزيد من كفاءة الكربون، كما هو موضح في الشكل 1-6- أ.

أما السيناريو الآخر، هو الخاص باستخدام ثاني أكسيد الكربون، فيتجنب خطوة إزالة الغازات الحمضية ويستورد الهيدروجين المتجدد لتضمين تفاعل عكسي لتحويل الغاز المائي[22] **RWGS**إعادة دمج الكربون الذي يُفقد عادةً على شكل انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون، طبقًا للمعادلة التالية:

$$CO_2+H_2 \leftrightarrow CO+H_2O$$

الشكل (1-6-أ) [23]

مسار تحويل الكتلة الحيوية إلى ميثانول عبر التغويز



المصدر: A Comparative Techno-Economic Analysis of Renewable Methanol Synthesis Pathways from Biomass and CO2,2020.

[21] renewable electricity import case, and a renewable H2 import and CO2 utilization case.

[22] reverse water-gas shift

[23] أ: مسار إنتاج الميثانول من الكتلة الحيوية،
ب: التحليل الكهربائي المركب لثاني أكسيد الكربون وأكسدة المياه لتحويل الغاز الصناعي إلى ميثانول (التحليل الكهربائي غير المباشر) ،
ج: التحليل الكهربائي المباشر لثاني أكسيد الكربون إلى ميثانول.

2.3.1. مسار التحويل غير المباشر لثاني أكسيد الكربون إلى ميثانول عبر وسيط الغاز الاصطناعي

يعتمد مسار التحويل غير المباشر لثاني أكسيد الكربون إلى الميثانول على نهج هجين، يجمع بين التحليل الكهربائي منخفض الحرارة لثاني أكسيد الكربون وتقنيات التصنيع التقليدية للميثانول. في هذا الإطار، يتم تحويل ثاني أكسيد الكربون كهربائيًا إلى أول أكسيد الكربون باستخدام خلايا تحليل كهربائي متقدمة تعتمد على محفزات من الفضة المطعّمة بأنابيب الكربون النانوية[24]، مما يسمح بتحقيق كفاءة تيار[25] تصل إلى 98 %عند فولتية خلية تبلغ 3 فولت .يُخلط أول أكسيد الكربون الناتج مع الهيدروجين – المُستورد عادةً من وحدات التحليل الكهربائي للماء أو من مصادر متجددة أخرى – لتكوين خليط الغاز الاصطناعي، ثم يُعالج هذا الخليط وفقًا لظروف الحرارة والضغط المعتادة في مفاعلات إنتاج الميثانول.

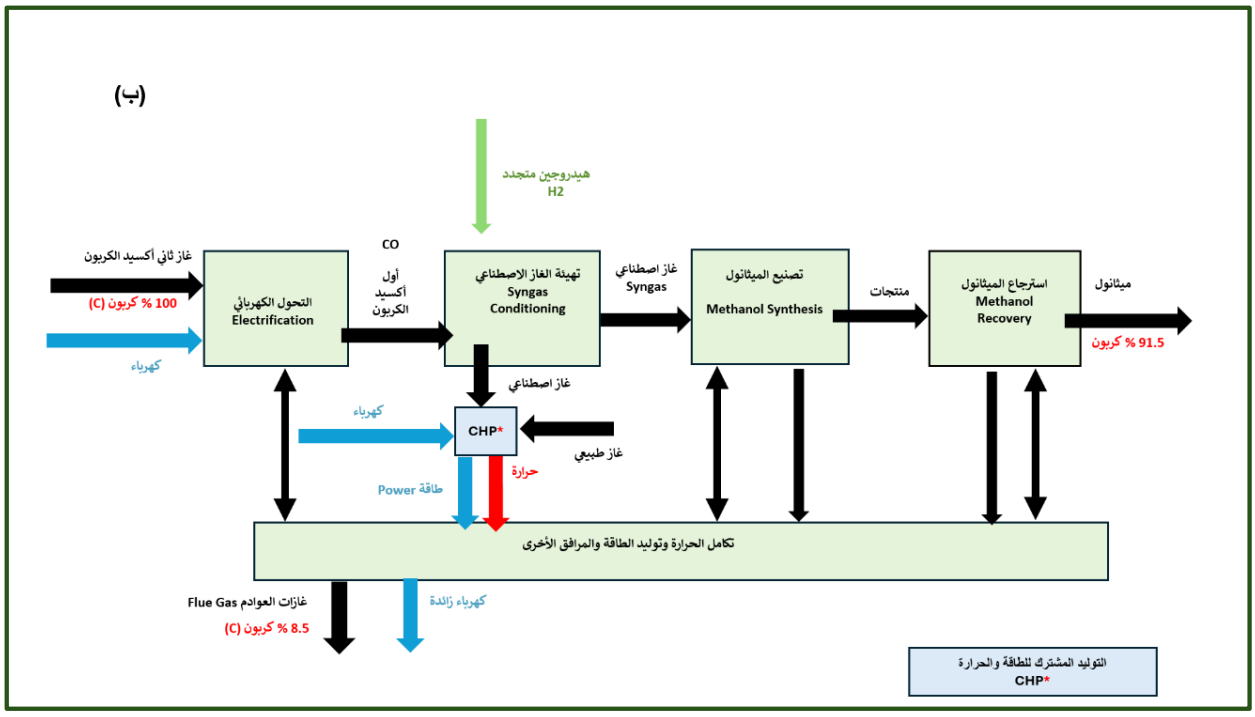
وبالنظر إلى أن تقنية التحليل الكهربائي لثاني أكسيد الكربون لا تزال في مراحلها الأولى، فقد تناولت بعض الدراسات سيناريو مستقبليًا يُفترض فيه خفض فولتية الخلية[26] إلى 2 فولت مع الحفاظ على كفاءة تيار بحدود 95%، مما يعزز من كفاءة الطاقة ويقلل من الفاقد الكهربائي.

في كلا السيناريوهين، تُستكمل الدورة الإنتاجية بمرحلة تحويل الغاز الاصطناعي إلى ميثانول باستخدام نفس تقنيات التفاعل والتنقية التقليدية المعتمدة في صناعة الميثانول الأحفوري، ما يُوفر مرونة أكبر من حيث تكامل التكنولوجيا وخفض الانبعاثات الكربونية، مع إمكانية التوسع تدريجيًا في دمج الطاقة المتجددة ضمن هذه السلسلة. يبين الشكل (1-6-ب) مسار التحويل غير المباشر لثاني أكسيد الكربون إلى ميثانول عبر وسيط الغاز الاصطناعي.

[24] carbon nanotube doped Ag electrocatalyst
[25] faradaic efficiency
[26] cell voltage

الشكل (1-6-ب)

مسار التحويل غير المباشر لثاني أكسيد الكربون إلى ميثانول عبر وسيط الغاز الاصطناعي



المصدر: A Comparative Techno-Economic Analysis of Renewable Methanol Synthesis Pathways from Biomass and CO2,2020

3.3.1. مسار التحويل المباشر لثاني أكسيد الكربون إلى ميثانول باستخدام التحليل الكهربائي

يعتمد مسار التحويل المباشر لثاني أكسيد الكربون إلى الميثانول على اختزال الغاز في خطوة واحدة باستخدام محفزات كهروكيميائية، أبرزها محفز سيلينيد النحاس، وذلك تحت ظروف تفاعل معتدلة قريبة من الضغط الجوي.

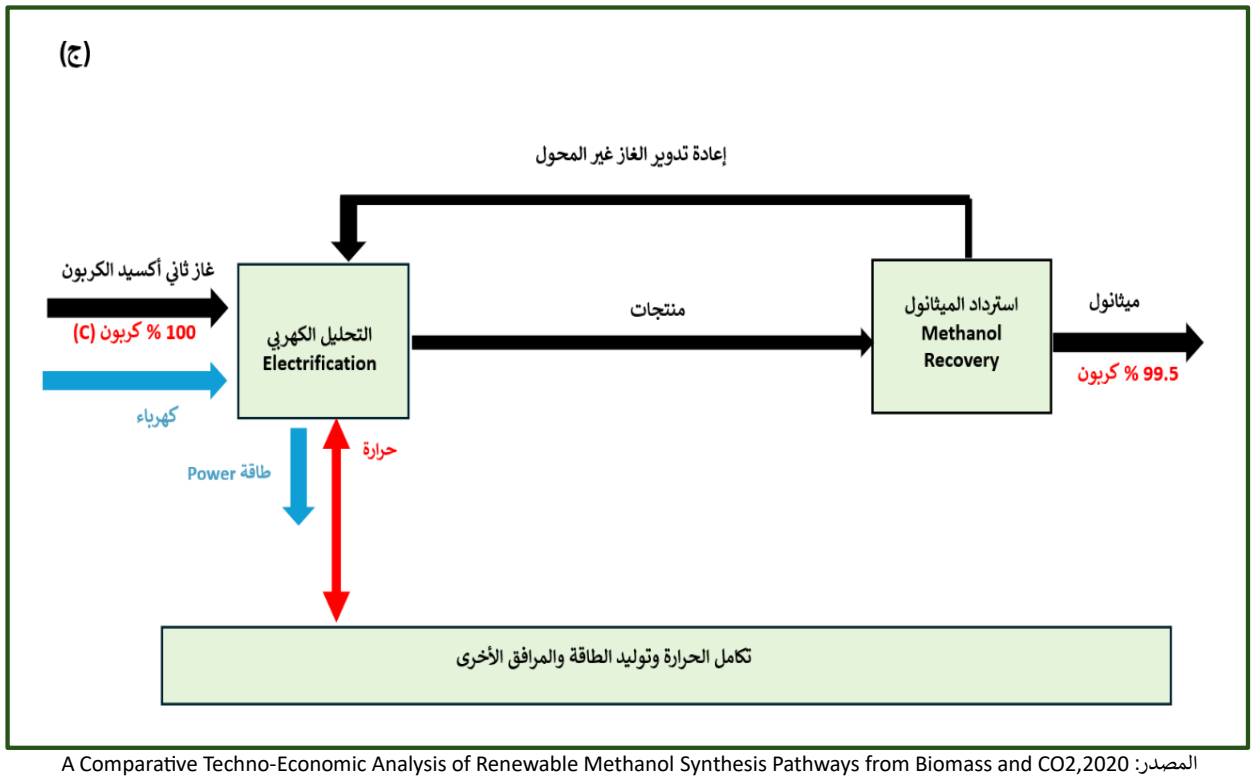
في هذه العملية، يُحوَّل ثاني أكسيد الكربون مباشرة إلى ميثانول داخل خلية تحليل كهربائي، مما يُلغي الحاجة إلى إنتاج أول أكسيد الكربون والهيدروجين كوسيطين منفصلين، ويُسهم في تبسيط سلسلة الإمداد وخفض الفاقد الطاقي.

إلى جانب الميثانول، تُنتَج بعض المركبات الثانوية مثل الهيدروجين، وأول أكسيد الكربون، وحمض الفورميك، والتي يتم فصلها واستردادها لاحقًا من خلال وحدات الامتزاز المتأرجح بالضغط (PSA) وتقنيات التقطير[27]، مما يُتيح إعادة استخدامها أو بيعها كمُنتجات ذات قيمة اقتصادية.

ورغم أن تقنية التحويل المباشر لا تزال في مراحلها المبكرة من التطوير ولم تصل بعد إلى درجة النضج التجاري، إلا أن الآفاق المستقبلية واعدة، خصوصًا في ظل التقدم المستمر في هندسة المواد والمحفزات، والذي من شأنه أن يُحسّن الكفاءة والانتقائية ويُقلل من تكاليف التشغيل، ما يجعل هذا المسار خيارًا استراتيجيًا طويل الأمد في إطار إنتاج الميثانول منخفض الكربون. يبين الشكل (1-6-ج) مسار التحويل المباشر لثاني أكسيد الكربون إلى ميثانول باستخدام التحليل الكهربائي.

الشكل (1-6-ج)

مسار التحويل المباشر لثاني أكسيد الكربون إلى ميثانول باستخدام التحليل الكهربائي



المصدر: A Comparative Techno-Economic Analysis of Renewable Methanol Synthesis Pathways from Biomass and CO2,2020

[27] purified via pressure swing adsorption and distillation stages

4.1. معايير أولويات الاستثمار والتطوير للمسارات المختلفة

مع تنوع مسارات إنتاج الميثانول من مصادر غير تقليدية، تبرز الحاجة إلى اعتماد مجموعة من المعايير الفنية والاقتصادية الواضحة لتوجيه أولويات التطوير والاستثمار، وتعزيز فرص الانتشار التجاري لتقنيات الإنتاج منخفضة الكربون، سواء على المدى القريب أو البعيد. وتُعد أربعة معايير رئيسية من أبرز المحددات في هذا السياق، وهي:

1. **الحد الأدنى لسعر البيع (MSP)**، والذي يعكس القدرة التنافسية للمسار مقارنة ببدائل الوقود الكربوني التقليدية؛
2. **كفاءة الكربون (Carbon Efficiency)**، التي تُبيّن مدى احتفاظ العملية بالكربون داخل المنتج النهائي بدلاً من إطلاقه في صورة انبعاثات؛
3. **الكفاءة الطاقية (Energy Efficiency)**، التي تُظهر مدى فاعلية استخدام الطاقة في العملية الإنتاجية، وتُعد مؤشرًا مهمًا في سياق التكامل مع مصادر الطاقة المتجددة؛
4. **مستوى الجاهزية التقنية (TRL – Technology Readiness Level)**، والذي يُحدد مدى قرب التقنية من التطبيق التجاري ودرجة نضجها التكنولوجي.

ويُعد تقييم هذه المؤشرات بشكل متكامل أداة حيوية لصناع القرار، سواء في مجال السياسات العامة أو الاستثمارات الخاصة، بما يسهم في توجيه الموارد نحو الخيارات الأكثر جدوى واستدامة، ضمن إطار التحول المنهجي نحو اقتصاد منخفض الكربون.

1.4.1. معيار الحد الأدنى لبيع الميثانول عبر المسارات المختلفة

يُعد الحد الأدنى لسعر البيع مؤشرًا اقتصاديًا محوريًا لتقييم القدرة التنافسية لمسارات إنتاج الميثانول المتجدد، مقارنةً بالميثانول الأحفوري في الأسواق العالمية .وفي هذا السياق، تم تطوير نماذج تقنية واقتصادية لثلاثة مسارات إنتاج تعتمد على مصادر متجددة، باستخدام برنامج المحاكاة الهندسية **Aspen Plus**، وذلك ضمن تصميم لمصنع افتراضي متكامل.

واستندت الحسابات إلى بيانات تدفقات الكتلة والطاقة المستخرجة من نماذج المحاكاة، بهدف تقدير كل من النفقات الرأسمالية (**CAPEX**) والنفقات التشغيلية (**OPEX**) بدقة عالية.

ولضمان اتساق النتائج وقابليتها للمقارنة بين مختلف المسارات، تم توحيد الطاقة الإنتاجية السنوية لجميع النماذج لتبلغ نحو 96 مليون جالون من الميثانول (ما يعادل نحو 316 ألف طن سنويًا)، مع اعتماد معدل تغذية ثابت من الكتلة الحيوية اللجنوسليلوزية يصل إلى 2000 طن جاف يوميًا. يسهم هذا التوحيد في خلق أساس مشترك للمقارنة الموضوعية بين المسارات، وتحديد مستويات الجدوى الاقتصادية لكل منها وفق سيناريوهات السوق المختلفة.

تعتمد تكلفة إنتاج **الميثانول الحيوي** على عدة عوامل رئيسية، منها تكلفة المواد الخام، والاستثمارات الرأسمالية، وكفاءة تقنيات التحويل المستخدمة. وتُقدّر التكلفة حاليًا بين 320-770 دولارًا أمريكيًا للطن[28]، مع توقعات بانخفاضها مستقبلاً بفضل تحسين العمليات التقنية والاستفادة من إعادة استخدام النفايات الصناعية، مثل "الليكر الأسود" الناتج من مصانع الورق.

في هذا السياق، يُظهر مسار إنتاج الميثانول من الكتلة الحيوية قدرة تنافسية ملحوظة مقارنة بالإنتاج التجاري للميثانول التقليدي، حيث تبلغ التكلفة الأساسية نحو 0.39 دولار لكل كيلوجرام (390 دولار للطن). ويعزز من جدوى هذا المسار إمكانية تخفيض إضافي في التكلفة من خلال استغلال ثاني أكسيد الكربون المعاد تدويره لتعزيز عملية الإنتاج، مما يخفض الحد الأدنى لسعر البيع إلى حوالي 0.35 دولار لكل كيلوجرام (350 دولار للطن). مع ذلك، تظل التكلفة مرتبطة ارتباطًا وثيقًا بأسعار استيراد الهيدروجين المتجدد، إذ أن زيادة تكلفة هذا المكون تؤدي إلى ارتفاع الحد الأدنى لسعر البيع بنسبة تصل إلى 28% مقارنة بالسيناريو الأساسي.

وعلى الرغم من الجدوى الاقتصادية لهذا المسار، إلا أنه يواجه تحديات تقنية تتعلق بكفاءة استغلال الكربون والطاقة. إذ يتم فقدان نحو 31% من الكربون على شكل قطران ورماد خلال عملية التغويز، مما يؤثر على الكفاءة الكلية. ومن بين الحلول المطروحة لمواجهة هذه المشكلة، رفع درجات حرارة التشغيل بهدف تقليل تكوين الرماد، إلا أن هذا الإجراء يتطلب توفير مصدر خارجي للطاقة، الأمر الذي قد يؤثر سلبًا على الكفاءة الطاقية للعملية بشكل عام.

أما فيما يخص مسار **التحويل غير المباشر لثاني أكسيد الكربون** إلى الميثانول، فتشير التقديرات إلى أن الحد الأدنى لسعر البيع يبلغ حوالي 0.90 دولار/كجم (أي 900 دولار/طن). ويُعد خفض جهد الخلية الكهربائية مع الحفاظ على كفاءة فارادية مستقرة من أهم العوامل المؤثرة في

[28] IRENA, ENABLING GLOBAL TRADE IN RENEWABLE HYDROGEN AND DERIVATIVE COMMODITIES,2024

تقليل التكلفة؛ إذ أن تقليل الجهد من 3 فولت إلى 2 فولت يمكن أن يُخفض الحد الأدنى لسعر البيع بنسبة تصل إلى نحو 8%.

ويمتاز هذا المسار بكفاءة كربونية عالية تتجاوز 90%، بفضل الانتقائية العالية لعملية التحليل الكهربائي، إلا أن تكاليف التشغيل المرتفعة تُعتبر تحديًا رئيسيًا، وتشمل بشكل رئيسي استهلاك الطاقة الكهربائية الكبير اللازم لتشغيل خلايا التحليل الكهربائي، بالإضافة إلى تكاليف الصيانة المستمرة للأنظمة والمحفزات الخاصة. وبالرغم من ذلك، فإن المستوى المتقدم من الجاهزية التكنولوجية لهذا المسار مقارنة بالتحويل المباشر يجعله خيارًا واعدًا على المدى المتوسط، مع الحاجة إلى المزيد من الاستثمارات في البحث والتطوير لتعزيز الجدوى الاقتصادية والتجارية.

وفي السياق ذاته، تُظهر التقديرات أن تكلفة إنتاج الميثانول من مصادر متجددة تعتمد بشكل كبير على تكلفة مدخلات الإنتاج، لا سيما ثاني أكسيد الكربون والهيدروجين. وتُعد تكلفة ثاني أكسيد الكربون عاملاً حاسمًا في تحديد الحد الأدنى لسعر البيع. فعند استخدام ثاني أكسيد الكربون المُلتقط من الكتلة الحيوية عبر تقنيات احتجاز الكربون وتخزينه[29] (**BECCS**) ، والتي تتراوح تكلفة التقاط الطن الواحد فيها ما بين 10-50 دولارًا للطن، تتراوح تكلفة إنتاج الميثانول بين 800-1600 دولار للطن.

أما إذا تم استخدام تقنية الالتقاط المباشر من الهواء(**DAC**) ، والتي تتراوح تكلفة التقاط الطن الواحد فيها ما بين 300–600 دولار، فإن تكلفة إنتاج الميثانول ترتفع لتتراوح بين 1200-2400 دولار للطن[30].

أما مسار **التحويل المباشر** لثاني أكسيد الكربون إلى الميثانول، فلا يزال في مرحلة مبكرة جدًا من التطوير، وهو ما ينعكس في تباين واضح في تقديرات الحد الأدنى لسعر البيع، حيث تُظهر النماذج الأولية تفاوتًا كبيرًا في التكلفة بناءً على مجموعة من الافتراضات التقنية. ففي أحد سيناريوهات خط الأساس، يبلغ الحد الأدنى لسعر البيع حوالي 11.20 دولارًا للكيلوغرام (أي 11200 دولار للطن)، وتشكل النفقات الرأسمالية اللازمة لتحليل الماء كهربائيًا النسبة الأكبر من إجمالي التكلفة، بنحو

[29] Bioenergy with Carbon Capture and Storage
هذه التكنولوجيا تعتمد على استخدام الكتلة الحيوية (مثل الأخشاب، المحاصيل الزراعية، أو النفايات العضوية) لإنتاج الطاقة (مثل الكهرباء أو الوقود الحيوي) ومن ثم احتجاز ثاني أكسيد الكربون المنبعث أثناء عملية الاحتراق أو التحويل.

[30] IRENA, Innovation outlook renewable methanol,2021.

75%. وفي سيناريو آخر أكثر تحفظًا يعتمد على انخفاض الانتقائية تجاه إنتاج الميثانول، ترتفع التكلفة لتصل إلى حوالي 17.26 دولارًا للكيلوغرام (17260 دولارًا للطن)، ما يعكس هشاشة الجدوى الاقتصادية في الوضع الحالي.

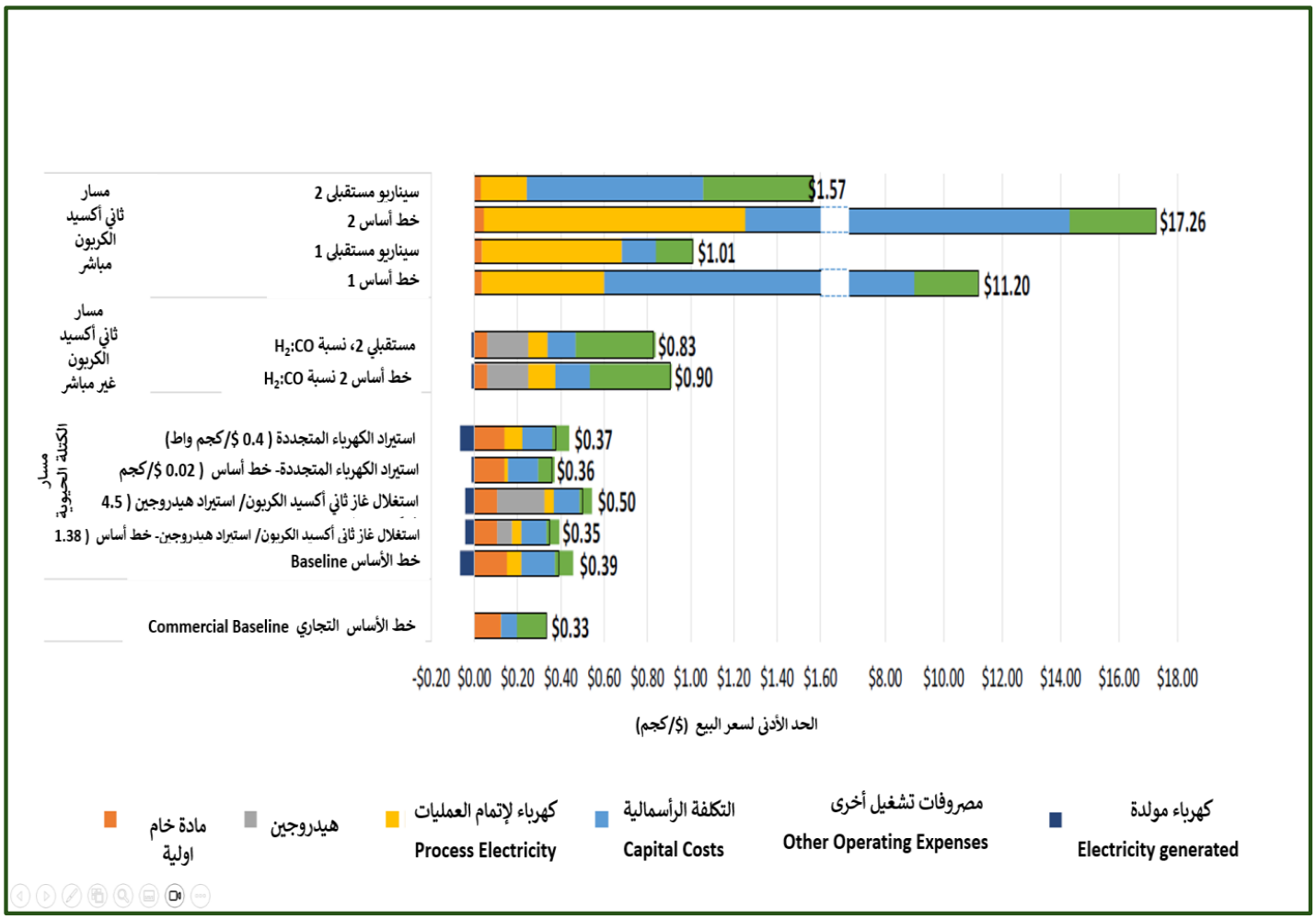
ورغم أن هذا المسار يُظهر كفاءة طاقية مرتفعة نسبيًا، إلا أنه يعاني من انخفاض مستوى الجاهزية التكنولوجية (**TRL=1**)، مما يعني أن تقنياته لا تزال في المراحل المعملية الإختبارية المبكرة، ويحتاج إلى تحسينات كبيرة في كثافة التيار الكهربائي وانتقائية المنتج الكيميائي من أجل تقليل التكاليف وتعزيز فرص التطبيق التجاري. لذلك، فإن تحقيق الجدوى الاقتصادية لهذا المسار يتطلب استثمارات بحثية مكثفة وتطوير طويل الأجل، مما يجعله خيارًا بعيد المدى يمكن أن يكتسب أهمية مستقبلية إذا ما أُحرز تقدم تقني كبير.

وفي إطار السيناريوهات المستقبلية المحسّنة، تشير التقديرات إلى إمكانية خفض الحد الأدنى لسعر البيع إلى مستويات أكثر تنافسية في حال تم تحسين كثافة التيار وتقليل النفقات الرأسمالية. ففي أحد هذه السيناريوهات، يمكن أن ينخفض سعر البيع إلى نحو 1.01 دولار للكيلوغرام (1001 دولار للطن)، وهو ما يمثل نحو 3 أضعاف سعر السوق العالمي الحالي للميثانول التقليدي، بينما تشير تقديرات سيناريو مستقبلي آخر إلى تكلفة تقارب 1.57 دولار للكيلوغرام (1570 دولارًا للطن)، مما يدل على استمرار وجود فجوة كبيرة بين التكاليف المتوقعة والتنافسية السوقية، وهي فجوة لا يمكن خفضها إلا عبر تقدم ملحوظ في الكفاءة والابتكار التقني. يبين الشكل (1-7)، مقارنة البيع بالحد الأدنى لسعر البيع الميثانول لكل مسار.[31]

[31] يبلغ متوسط تكلفة إنتاج الميثانول التقليدي على النطاق التجاري حوالي **0.33$ /كجم** "330 دولا / طن".

الشكل (1-7)

مقارنة البيع بالحد الأدنى لسعر البيع للميثانول لكل مسار



المصدر: A Comparative Techno-Economic Analysis of Renewable Methanol Synthesis Pathways from Biomass and CO2,2020

2.4.1. معيار كفاءة الكربون في إنتاج الميثانول عبر المسارات المختلفة

تُعد كفاءة الكربون[32] مؤشرًا محوريًا لفهم الأداء البيئي والاقتصادي لمسارات إنتاج الميثانول، حيث تبرز من خلالها القيود التقنية الكامنة في كل مسار، مثل الفقد الكربوني الناتج عن انخفاض

[32] بشكل مبسط، كفاءة الكربون تعني :من بين كل 100 ذرة كربون دخلت في المواد الخام، كم ذرة منها انتهت داخل الميثانول المنتج؟ فلو كانت الكفاءة 90%، فهذا يعني أن 90 ذرة كربون من أصل 100 تم حفظها في الميثانول، و10 ذرات ضاعت في شكل نفايات أو غازات.
مثال: إذا بدأنا بـ 100 طن من الكربون في صورة ثاني أكسيد الكربون، واستطعنا إنتاج ميثانول يحتوي على 90 طن كربون، فالكفاءة = 90%.
أما إذا حصلنا فقط على 33 طن داخل الميثانول، فالكفاءة = 33%، وهذا يُشير إلى فقدان كبير في الكربون خلال التفاعل، وهو ما حدث في مسار الكتلة الحيوية.

الانتقائية الكيميائية[33]، التحديات المتعلقة بالمواد الخام، وحدود العائد النظري[34] الممكن تحقيقه. ويُقاس هذا المؤشر من خلال مقارنة كمية الكربون الداخل إلى العملية – والذي يأتي من المواد الخام – مع كمية الكربون الخارج على شكل ميثانول منتج. يوضح الشكل (1-6 ب، ج) تدفقات الكربون في مختلف السيناريوهات، حيث تعكس كمية الميثانول المنتج بدقة مدى كفاءة استخدام الكربون في كل حالة.

وبالعودة إلى المسارات التجارية التقليدية، نجد أن كفاءة الكربون فيها تتراوح عادةً بين 68-75%، مما يوفّر معيارًا مرجعيًا لتقييم المسارات المتقدمة. ومن خلال هذا المنظور، يُظهر مسار تحويل الكتلة الحيوية إلى ميثانول أدنى كفاءة كربونية بين جميع الحالات الأربع المدروسة، حيث لم تتجاوز الكفاءة في الحالة الأساسية نسبة 33.2%، وهو ما يُعد أقل بكثير من المعايير التجارية. ويرجع هذا الانخفاض إلى الفاقد الكبير في الكربون أثناء العمليات، سواء من خلال الانبعاثات أو المنتجات الجانبية. غير أن إدخال الهيدروجين المستورد إلى عملية التوليف[35] يُمكن أن يحسّن الكفاءة إلى 46.6%، إذ يُستخدم الهيدروجين في دمج الكربون المفقود – عادة على هيئة ثاني أكسيد الكربون – ضمن العملية، مما يعزز الاستفادة من الكربون الكلي في النظام. كذلك، فإن استخدام الكهرباء المتجددة في العملية يُظهر تحسنًا طفيفًا، حيث ارتفعت الكفاءة إلى 36.1% فقط، ما يدل على أن هذا المسار لا يزال يواجه قيودًا جوهرية في فعالية استخدام الكربون.

على الجانب الآخر، تُظهر مسارات **تحويل ثاني أكسيد الكربون إلى الميثانول** –سواء عبر **المسار المباشر** أو **غير المباشر** –أداءً جيدًا من حيث **خفض الانبعاثات الكربونية**، حيث تجاوزت **الكفاءة الكربونية** في كلا المسارين 90%. فعلى سبيل المثال، يُسجل المسار غير المباشر كفاءة تصل إلى **91.5%**، وهو مستوى مرتفع يُعزى إلى **الانتقائية العالية للتفاعلات الكيميائية**، بالإضافة إلى

---

[33] هي مقياس لمدى قدرة التفاعل الكيميائي على إنتاج المادة المرغوبة (مثل الميثانول) دون تكوين منتجات جانبية غير مرغوبة. كلما كانت الانتقائية عالية، زادت كمية المنتج المستهدف (الميثانول مثلًا) وقلّت النفايات أو المنتجات الثانوية.

[34] هو **الحد الأقصى** من كمية المنتج الكيميائي (مثل الميثانول) التي يمكن الحصول عليها من كمية معينة من المواد الخام **بناءً على المعادلة الكيميائية المثالية**، إذا تمت العملية بكفاءة كاملة وبدون أي فاقد.

[35] (دائرة/حلقة التوليف) **Synthesis loop** هو مصطلح يُستخدم في الصناعات الكيميائية، خاصة في إنتاج الأمونيا أو الميثانول، ويُشير إلى **الدورة المغلقة التي يتم فيها إعادة تدوير الغازات غير المتفاعلة** بعد مرورها في المفاعل، بهدف زيادة كفاءة التفاعل وتحقيق أقصى استفادة من المواد الأولية.

إعادة تدوير معظم تيارات الكربون ضمن حلقة التوليف الصناعية، مما يُسهم في تقليل الفاقد وتحسين الاستفادة من المواد الأولية.

ورغم وجود بعض الفاقد الكربوني الناتج عن تيارات جانبية " الهيدروكربونات الخفيفة أو كميات صغيرة غير مستردة من الميثانول " إلا أن هذا الكربون لا يُهدر، بل يُعاد توجيهه إلى نظام التوليد المشترك للطاقة والحرارة (CHP) ، حيث يُستخدم كوقود لدعم متطلبات التشغيل. وتُعد هذه الميزة من أبرز عناصر التكامل في تصميم هذه المسارات، إذ لا تقتصر على تحسين الكفاءة الكربونية فحسب، بل تساهم أيضًا في تحسين الجدوى الاقتصادية والاستدامة البيئية.

3.4.1. معيار كفاءة الطاقة في إنتاج الميثانول عبر المسارات المختلفة

تُظهر نتائج تقييم كفاءة الطاقة لمسارات إنتاج الميثانول المختلفة تباينًا ملحوظًا، حيث تتراوح كفاءة الطاقة ما بين 41-65% بناءً على السيناريو التقني والافتراضات المرتبطة بكل مسار. ويُلاحظ أن المسارات المتجددة، رغم أهميتها البيئية، لا تزال أقل كفاءة من المسارات التقليدية المعتمدة على الفحم والغاز الطبيعي.

في المسارات التقليدية، تحقق إنتاج الميثانول من الغاز الطبيعي كفاءة طاقة مرتفعة نسبيًا، تتراوح عادة بين 60-65%، بسبب العمليات المحسنة والتقنيات الناضجة المستخدمة، بينما تقل كفاءة إنتاج الميثانول من الفحم إلى حدود 50-55%، نظراً لفقد الطاقة المرتبط بعمليات التغويز والتكرير الأكثر تعقيدًا.

أما في المسارات المتجددة، فقد حقق **المسار المباشر لتحويل ثاني أكسيد الكربون إلى الميثانول** أعلى كفاءة طاقية بين الخيارات المتجددة، حيث تتراوح كفاءته بين 56.1-57.8%، يليه مسار **الميثانول الحيوي** الذي سجل كفاءة بين 47.8% -51.1%. ويرجع انخفاض كفاءة مسار الكتلة الحيوية بشكل خاص إلى فقد الطاقة الكيميائية المخزنة في المادة العضوية خلال عمليات التحويل، بالإضافة إلى استهلاك طاقة مرتفع في العمليات المساندة مثل معالجة القطران وإزالة الغازات الحمضية. على الرغم من إدخال الكهرباء المتجددة في بعض السيناريوهات لتحسين الأداء، لم تتجاوز الكفاءة الطاقية القصوى 51.1%، ما يسلط الضوء على الحاجة الماسة لتطوير تصميم

العمليات واسترداد الطاقة لتعزيز كفاءة هذا المسار. أما المسار غير المباشر لتحويل ثاني أكسيد الكربون فكان الأقل كفاءة، بتراوح بين 41.0% -47.1%.

4.4.1. معيار جاهزية التكنولوجيا لإنتاج الميثانول عبر المسارات المختلفة

يُعد **مستوى الجاهزية التكنولوجية (TRL)** عاملاً حاسمًا في تقييم مسارات إنتاج الميثانول، حيث تُعتبر تقنيات تحويل الفحم إلى غاز (**Gasification**) من التقنيات المثبتة والراسخة، مع وجود وحدات تشغيل كبيرة ومتعددة على نطاق تجاري واسع وكفاءة طاقية عالية. في المقابل، لا تزال تطبيقات تحويل أنواع مختلفة من الكتلة الحيوية والنفايات البلدية الصلبة في مراحلها الأولى من التسويق التجاري، مما يتطلب المزيد من التطوير والبحث للوصول إلى تشغيل تجاري كامل وفعال.

من الناحية الاقتصادية، يمكن للميثانول الحيوي في أفضل الظروف أن يقترب من المنافسة مع الميثانول الأحفوري من حيث التكلفة، لكنه في غالبية الحالات يظل أكثر تكلفة، حيث يُقدَّر سعر إنتاجه تقريبًا بنحو ضعف تكلفة الميثانول الأحفوري. وبما أن تكلفة المواد الخام من الكتلة الحيوية من المتوقع أن تبقى مرتفعة وثابتة نسبيًا، يصبح خفض النفقات الرأسمالية **(CAPEX)** هو المفتاح الأساسي لتقليل تكلفة الإنتاج.ويُتحقق ذلك من خلال تعظيم اقتصاديات الحجم عبر زيادة حجم الإنتاج، تحسين كفاءة العمليات التشغيلية، وتطوير تصميمات أكثر فاعلية لتكوينات المصانع.

من جهة أخرى، يعتمد الإنتاج الواسع النطاق للميثانول الكهربائي بشكل رئيسي على مدى توفر هيدروجين أخضر منخفض التكلفة وغاز ثاني أكسيد الكربون، بالإضافة إلى التكاليف الرأسمالية للمصنع. وتُعد تكلفة الطاقة المتجددة اللازمة لإنتاج الهيدروجين وكفاءة استغلال المصنع، لا سيما أجهزة التحليل الكهربائي (**Electrolyzers**)، من أبرز العوامل المؤثرة في التكلفة الإجمالية لهذا المسار.

وعلى الرغم من أن إنتاج الميثانول الكهربائي لا يزال حاليًا مكلفًا، فإن انخفاض تكلفة الكهرباء المتجددة الناتجة من مصادر الرياح والطاقة الشمسية - والتي أصبحت تنافسية بالفعل مقارنة بالكهرباء المولدة من الوقود الأحفوري في العديد من الأسواق - يُتوقع أن يستمر في الانخفاض خلال

العقود القادمة. هذا الانخفاض المرتقب، إلى جانب وفورات الحجم والابتكار في تقنيات أجهزة التحليل الكهربائي، سيؤدي إلى تقليل كبير في تكلفة إنتاج الميثانول الكهربائي.

ومن جانب أخر، يمكن الحصول على ثاني أكسيد الكربون اللازم لهذا المسار من مصادر متعددة مثل محطات توليد الطاقة وانبعاثات الصناعات الثقيلة كالصناعات الحديدية والصلب والأسمنت، مع ضرورة ضمان استدامة مصدر ثاني أكسيد الكربون عبر الاعتماد على مصادر متجددة كاحتراق الكتلة الحيوية والغاز الحيوي. ورغم أن استخدام ثاني أكسيد الكربون المتجدد من المصادر الأقل تكلفة - وإن كانت محدودة - قد يواجه منافسة مع تطبيقات أخرى لتخزين واستخدام الكربون، إلا أن التقاط ثاني أكسيد الكربون مباشرة من الهواء يُعتبر الخيار الأوفر حظًا على المدى البعيد، مع أهمية خفض تكلفة هذه التقنية لتحقيق الجدوى الاقتصادية.

يوفر الجمع بين إنتاج الميثانول الحيوي والميثانول المنتج كهربائيًا من مصادر متجددة في منشأة هجينة فرصة كبيرة لتعزيز التكامل وكفاءة الموارد، حيث يمكن استغلال ثاني أكسيد الكربون الزائد الناتج عن الميثانول الحيوي كمصدر أساسي لثاني أكسيد الكربون المطلوب للإنتاج الكهربائي باستخدام الهيدروجين الأخضر.

تم تقييم مستوى الجاهزية التكنولوجية لكل مسار باستخدام دليل تقييم الجاهزية التكنولوجية الصادر عن وزارة الطاقة الأمريكية، والذي يُعد أداة نوعية تعكس الحالة الراهنة للبحث والتطوير وتساعد في تقدير الزمن اللازم لتحقيق التسويق التجاري. وتشير مستويات الجاهزية التكنولوجية المنخفضة إلى حاجة ملحة لجهود تطويرية مكثفة للوصول إلى الجاهزية التجارية.

في هذا السياق، يتمتع مسار تغويز الكتلة الحيوية بمستوى جاهزية تقني مرتفع يتراوح بين **7 - 9**، إذ تمتد التجارب التجارية لهذا المسار منذ أوائل التسعينيات وتشمل مراحل تجريبية وتجارية.

أما المسار غير المباشر لتحويل ثاني أكسيد الكربون إلى ميثانول فيعتمد على ثلاث تقنيات رئيسية: اختزال ثاني أكسيد الكربون إلى أول أكسيد الكربون، والتحليل الكهربائي للماء لإنتاج الهيدروجين، وتحويل الغاز الاصطناعي إلى الميثانول. وبينما تُعتبر التقنيتان الأخيرتان ناضجتين تجاريًا، فإن تقنية اختزال ثاني أكسيد الكربون إلى أول أكسيد الكربون لا تزال أقل تطورًا، بمستوى جاهزية يبلغ حوالي **4**، مما يشكل عقبة رئيسية أمام الجاهزية التجارية لهذا المسار.

أما المسار المباشر لتحويل ثاني أكسيد الكربون إلى الميثانول، فيعتمد على بيانات تجارب صغيرة النطاق ولا يزال في المراحل الأولى من البحث، حيث يبلغ مستوى جاهزيته التكنولوجية **1**، مما يعني حاجة كبيرة للبحث والتطوير قبل تحقيق النضج التجاري.

ختامًا، تُعتبر مسارات تحويل الكتلة الحيوية إلى ميثانول عبر التغويز هي الأكثر نضجًا وتجارية في الوقت الحالي، إذ تتميز بتكاليف منخفضة نسبيًا ومستوى جاهزية تكنولوجية مرتفع، مع تحقيق كفاءة متوسطة في استخدام الطاقة وتقليل الانبعاثات الكربونية، مما يجعلها الخيار الأكثر واقعية وقربًا للتطبيق التجاري على المدى القصير.

بالمقابل، توفر مسارات التحويل غير المباشر لثاني أكسيد الكربون إلى ميثانول عبر الغاز الاصطناعي كفاءة عالية في استغلال الكربون والطاقة، لكنها تواجه تحديات كبيرة تتعلق بالتكاليف المرتفعة، مما يعيق جاهزيتها التجارية ويجعلها أقل تنافسية في الوقت الراهن.

أما مسار التحويل المباشر لثاني أكسيد الكربون إلى ميثانول باستخدام التحليل الكهربائي، فيمثل خيارًا واعدًا على المدى الطويل، لا سيما مع التطورات المتوقعة في تقنيات التحليل الكهربائي وانخفاض تكاليف الطاقة المتجددة، غير أنه لا يزال بحاجة إلى استثمارات كبيرة في البحث والتطوير لتحقيق مستوى جاهزية تجارية يعتمد عليها.

منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

الفصل الثاني:

إنتاج الميثانول منخفض الكربون بين التجارب الدولية والمبادرات العربية

الفصل الثاني
إنتاج الميثانول منخفض الكربون
بين التجارب الدولية والمبادرات العربية

مقدمة

تتجه الاستثمارات العالمية بوتيرة متسارعة نحو تطوير مشاريع الميثانول منخفض الكربون، مع تنوع ملحوظ في مراحل التنفيذ، إذ تشمل مشروعات دخلت حيز التشغيل التجاري، وأخرى قيد الإنشاء أو التطوير، إلى جانب عدد من المشاريع التي لا تزال في مرحلة التصاميم الهندسية الأولية (FEED) . ويعكس هذا الزخم تنامي الوعي العالمي بمرونة هذا الوقود وإمكاناته في تقليل الانبعاثات في قطاعات حيوية مثل النقل البحري والصناعات الكيماوية.

أما فيما يتعلق بتوزيع الطاقات الإنتاجية لمشروعات الميثانول منخفض الكربون، فتشير التقديرات إلى أن السعة الإجمالية لمشروعات الميثانول الكهربائي (e-methanol) ستبلغ نحو 10.7 مليون طن سنويًا بحلول عام 2027، مقابل 8.7 مليون طن لمشروعات الميثانول الحيوي، ونحو 4.7 مليون طن لمشروعات الميثانول الأزرق. وبحلول عام 2030، يُتوقع أن تسجل هذه الطاقات نموًا ملموسًا، حيث يُنتظر أن ترتفع السعة الإنتاجية لمشروعات الميثانول الكهربائي إلى نحو 18.7 مليون طن سنويًا، في حين تصل طاقة الميثانول الحيوي إلى قرابة 13.1 مليون طن، بينما تُقدّر الطاقة الإنتاجية للميثانول الأزرق بحوالي 8.1 مليون طن.

في هذا السياق، تبرز مساهمة الدول العربية الأعضاء في منظمة أوابك من خلال تبنّي مشاريع طموحة مدعومة برؤى واستراتيجيات وطنية تسعى إلى تنويع مصادر الطاقة وخفض الانبعاثات. وتستفيد هذه الدول من توفر موارد الطاقة الشمسية والرياح، واحتياطيات الغاز الطبيعي، إلى جانب البنية التحتية المتطورة والدعم المؤسسي المتزايد للتقنيات النظيفة.

وتُعد مبادرات مثل "رؤية المملكة العربية السعودية 2030"، و"استراتيجية الإمارات للطاقة 2050"، وخطة مصر الوطنية للهيدروجين الأخضر، نماذج بارزة على توجه الدول العربية نحو دمج الميثانول منخفض الكربون في استراتيجياتها للطاقة المستدامة. ويسهم هذا التوجه في

تعزيز الحضور العربي ضمن أسواق الطاقة منخفضة الكربون، ويفتح المجال أمام فرص استثمارية وشراكات تقنية إقليمية ودولية واعدة.

1.2. الطاقات الإنتاجية للميثانول الأزرق والأخضر

شرعت العديد من الشركات والمؤسسات في تنفيذ مشروعات طموحة لإنتاج هذا النوع من الميثانول، بينما تواصل جهات أخرى الاستثمار في مجالات البحث والتطوير لتحسين الجدوى الاقتصادية ورفع كفاءة تقنيات الإنتاج، خصوصًا في مجالات الهيدروجين الأخضر واحتجاز الكربون وتخزينه .

وفي إطار دعم هذا التحول، قام معهد الميثانول بالتعاون مع شركة **GENA Solutions Oy** الفنلندية بإنشاء قاعدة بيانات متخصصة تهدف إلى رصد وتوثيق مشروعات الميثانول الأزرق والأخضر على المستوى العالمي. ووفقًا لتحديث نوفمبر 2024، تضم القاعدة ما يقرب من 190 مشروعًا نشطًا حول العالم، منها حوالي 14 مشروعًا مخصصًا لإنتاج الميثانول الأزرق، وهو ما يعكس الزخم الكبير الذي يشهده هذا القطاع، والاستثمارات المتنامية التي تُضخ فيه كبنية تحتية للانتقال إلى اقتصاد منخفض الكربون.

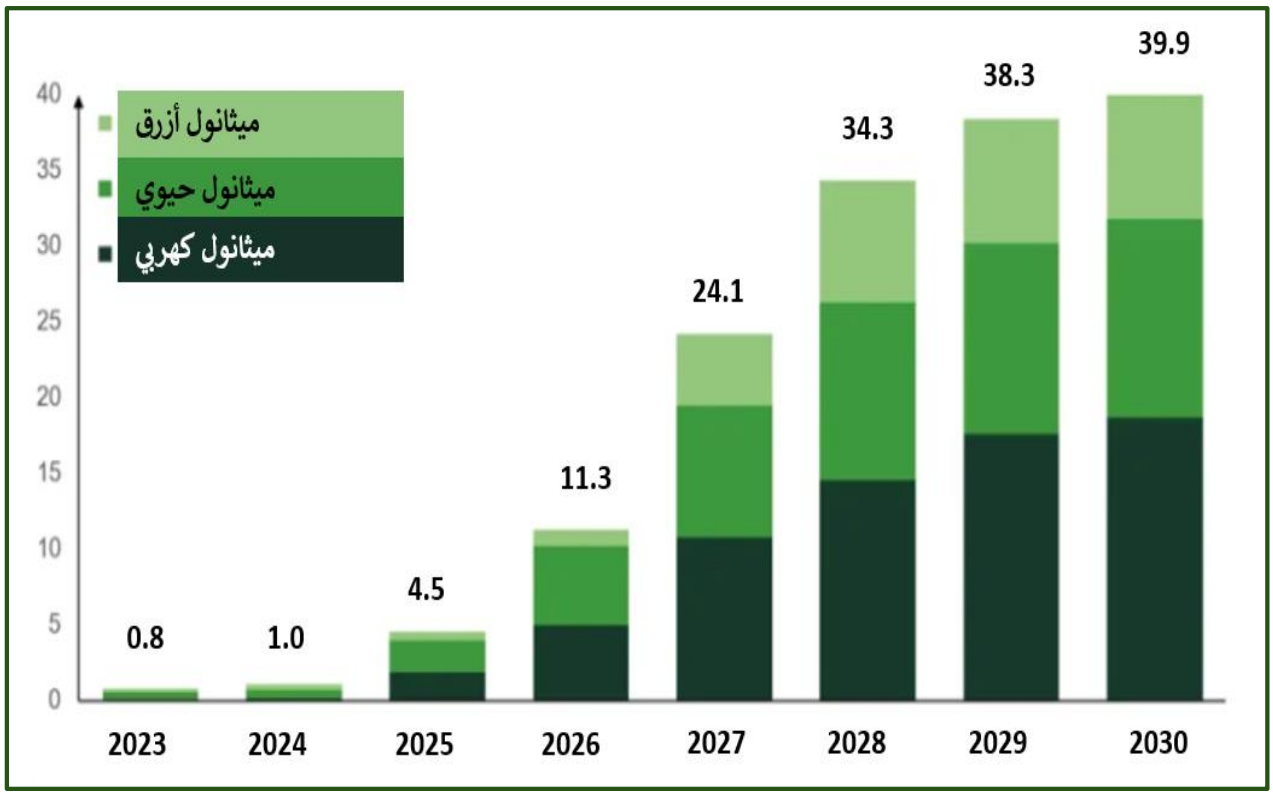
وتُظهر البيانات المتاحة أن الطاقات الإنتاجية لهذه المشروعات تتطور بشكل تصاعدي خلال السنوات القادمة. ففي أفق عام 2027، يُتوقع أن تصل السعة الإنتاجية لمشروعات الميثانول الكهربائي إلى نحو 10.7 مليون طن سنويًا، تليها مشروعات الميثانول الحيوي بطاقة تبلغ حوالي 8.7 مليون طن، في حين يُقدّر إنتاج الميثانول الأزرق بنحو 4.7 مليون طن. هذا النمو يعكس بداية تحول تدريجي في البنية التحتية للطاقة، واعتماد الأسواق على وقود منخفض الانبعاثات.

وبحلول عام 2030، من المتوقع أن تسجل هذه المشروعات نموًا ملحوظًا في قدراتها الإنتاجية، لتصل الطاقة الإجمالية إلى نحو 39.9 مليون طن سنويًا، موزعة على نحو 18.7 مليون طن من الميثانول الكهربائي، و13.1 مليون طن من الميثانول الحيوي، إلى جانب حوالي 8.1 مليون طن من الميثانول الأزرق. ويؤكد هذا التصاعد في الطاقات الإنتاجية الموقع المتقدم الذي بات يحتله الميثانول منخفض الكربون كركيزة مركزية في خريطة الوقود المستدام، ودوره المتزايد في

تحقيق أهداف خفض الانبعاثات وتعزيز أمن الطاقة. يبين الشكل (2-1) تطور إنتاج الميثانول منخفض الكربون خلال الفترة 2023-2030.

الشكل (2-1)

تطور طاقات مشاريع إنتاج الميثانول (منخفض الكربون، والحيوي، والأخضر)



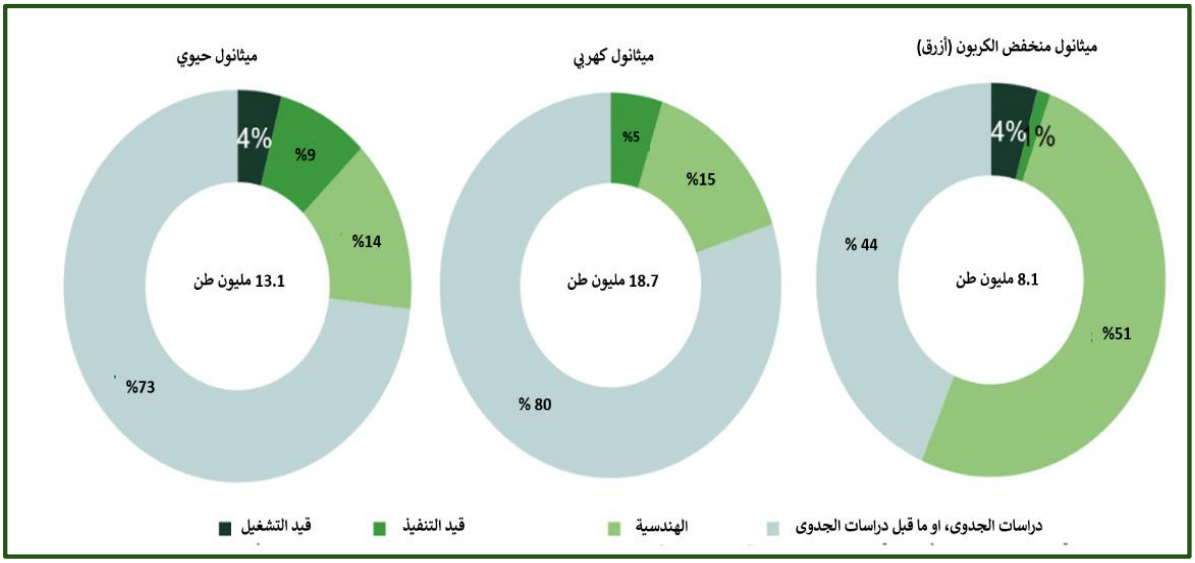
المصدر: GENA solution , November 2024

وفي سياق موقف مشروعات إنتاج الميثانول حتى عام 2030، نجد أن صناعة إنتاج الميثانول منخفض الكربون، سواء الأزرق أو الأخضر بنوعيه الحيوي والكهربائي، تشهد تطورًا مرحليًا يعكس التوسع العالمي المتسارع في هذا القطاع الحيوي. تتوزع المشروعات على أربع مراحل رئيسية بحسب مستوى التقدم في التنفيذ والاستعداد. تبلغ الطاقة الإنتاجية للمشروعات التي دخلت حيز التشغيل الفعلي حوالي **0.8** مليون طن سنويًا، بينما تصل الطاقة الإنتاجية للمشروعات قيد التنفيذ " التي بدأت أعمال الإنشاء وتنتظر التشغيل " إلى نحو **2.2** مليون طن سنويًا. أما في مرحلة الهندسة، التي تشمل المشروعات التي أنهت دراسات الجدوى وشرعت في التصميمات الفنية دون بدء التنفيذ، فتبلغ الطاقة الإنتاجية حوالي **8.8** مليون طن سنويًا. وتُقدر الطاقة الإنتاجية المستقبلية للمشروعات التي لا تزال في مرحلة دراسات الجدوى أو التقييم المسبق بنحو **28.1** مليون طن سنويًا.

يعكس هذا التوزيع المرحلي الزخم الاستثماري الكبير والنمو المتوقع في إنتاج الميثانول منخفض الكربون خلال السنوات القادمة، مما يؤكد أهمية هذا القطاع كركيزة أساسية في التحول إلى اقتصاد طاقي منخفض الانبعاثات. يبين الشكل (2-2) موقف مشرعات إنتاج الميثانول منخفض الكربون (الأخضر بنوعية والأزرق) حتى عام 2030.

الشكل (2-2)

موقف مشرعات إنتاج الميثانول منخفض الكربون (الأخضر بنوعية والأزرق) حتى عام 2030



المصدر: GENA solution، November 2024

وتشير البيانات التفصيلية إلى أن قطاع **الميثانول الحيوي** يشهد تقدمًا ملحوظًا على مستوى مراحل التنفيذ؛ إذ تمثل الطاقة الإنتاجية للمشروعات المشغّلة نحو 4% فقط من إجمالي المشروعات، بينما تبلغ نسبة المشاريع قيد التنفيذ حوالي 9%، وترتفع حصة المشروعات في المرحلة الهندسية إلى 14%، ليصل إجمالي الطاقة الإنتاجية في المراحل المتقدمة إلى نحو 27%.

أما بالنسبة لمشروعات الميثانول الكهربائي، فتمثل أكبر عدد من مشروعات إنتاج الميثانول منخفض الكربون قيد التطوير عالميًا، حيث لا تزال الغالبية العظمى منها، بنحو 80%، في مراحل أولية من دراسات الجدوى أو التخطيط المبكر، ما يعكس التوجه المتزايد نحو تطوير حلول طاقة خضراء ومستدامة، رغم أن العديد منها لم يصل بعد إلى مرحلة النضج الاستثماري. في المقابل، تبلغ حصة المشروعات قيد التنفيذ نحو 5% فقط، بينما تمثل المشروعات التي دخلت مرحلة

التصميمات الهندسية حوالي 15% من الإجمالي، وهو ما يشير إلى أن هذا المسار لا يزال في طور التهيئة والتخطيط الاستراتيجي، تمهيدًا لانطلاقة أوسع خلال السنوات القادمة.

على الجانب الآخر، يتركز نشاط مشروعات **الميثانول الأزرق** بشكل رئيسي في المراحل المبكرة، حيث تمثل مشروعات المرحلة الأولية نحو 44% من الإجمالي، فيما تتركز نحو 51% من المشروعات في مرحلة التصميم الهندسي، ما يعكس التردد النسبي في اتخاذ قرارات الاستثمار النهائي حتى الآن[36].

وعلى صعيد التوزيع الجغرافي، تكشف البيانات عن تباين واضح في حجم الاستثمارات وتطور مشروعات إنتاج الميثانول منخفض الكربون بين المناطق العالمية، وذلك وفقًا لنوع الوقود واتجاهات النمو. فيما يتعلق بمشروعات **الميثانول الحيوي**، تتصدر **الصين** القائمة بنسبة تبلغ نحو **44%** من إجمالي هذه المشروعات، تليها **أوروبا** بنسبة **34%**، ثم **أمريكا الشمالية** بنسبة **13%**، في حين تسجل **الشرق الأوسط** نسبة أقل نسبيًا، مع وجود مشاريع قيد التخطيط في السعودية والإمارات. أما بالنسبة لمشروعات **الميثانول الكهربائي** ، تحتفظ **الصين** كذلك بالمركز الأول بنسبة **42%**من إجمالي المشروعات، تليها **أوروبا** بنسبة **24%**، ثم **أمريكا الشمالية** بنسبة **17%**، في حين تشهد منطقة **الشرق الأوسط** حضورًا متناميًا في هذا المجال ضمن استراتيجيات التحول الطاقي.

وفيما يخص مشروعات **الميثانول الأزرق**، تختلف خريطة التوزيع؛ إذ تتصدر **أمريكا الشمالية** هذا القطاع بشكل واضح، بنسبة تصل إلى **95%** من إجمالي المشروعات قيد الإنشاء، تليها **الصين** بحصة صغيرة نسبيًا تبلغ نحو **5%**بينما لا تزال مساهمات المناطق الأخرى، بما في ذلك أوروبا والشرق الأوسط، محدودة في هذا النوع من المشروعات. تعكس هذه التوزيعات تباين الأولويات التقنية والسياسات الطاقية بين المناطق، كما تبرز الدور الريادي للصين في أغلب مسارات الميثانول منخفض الكربون، إلى جانب استمرار تفوق أمريكا الشمالية في مسار الميثانول الأزرق القائم على الغاز الطبيعي وتقنيات احتجاز الكربون.

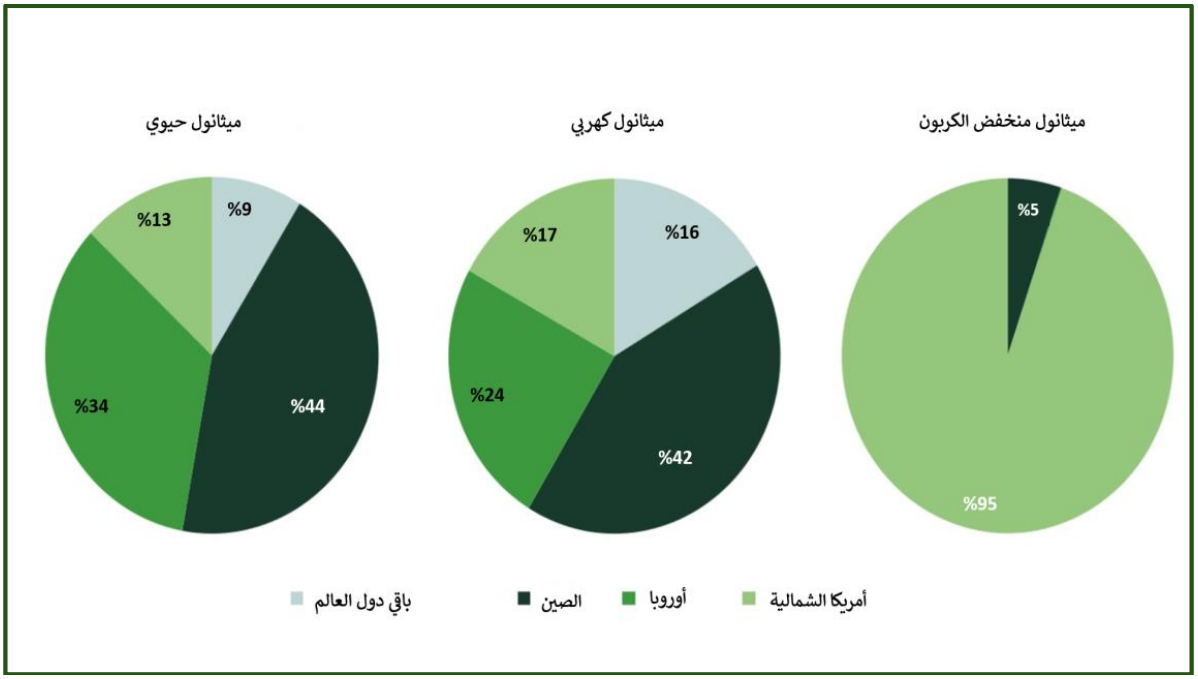
في منطقة الشرق الأوسط، بدأت دول مثل المملكة العربية السعودية والإمارات العربية المتحدة دخول هذا المجال بفعالية، ضمن جهودها الرامية إلى تنويع مصادر الطاقة وتعزيز التحول نحو اقتصاد منخفض الكربون.يوضح الشكل (2-3) نسب توزع مشروعات إنتاج الميثانول الحيوي،

36 GENA, Renewable methanol update, May 2024.

الكهربائي ، والأزرق (منخفض الكربون) حسب المناطق الرئيسية للإنتاج في عام 2024[37] . بينما يبين الشكل (2-4) التوزع الجغرافي التفصيلي لمشروعات إنتاج الميثانول الحيوي، والكهربائي، والأزرق[38] .

الشكل (2-3)

نسب توزع مشروعات إنتاج الميثانول الحيوي، الكهربائي ، والأزرق (منخفض الكربون) حسب المناطق الرئيسية للإنتاج في عام 2024



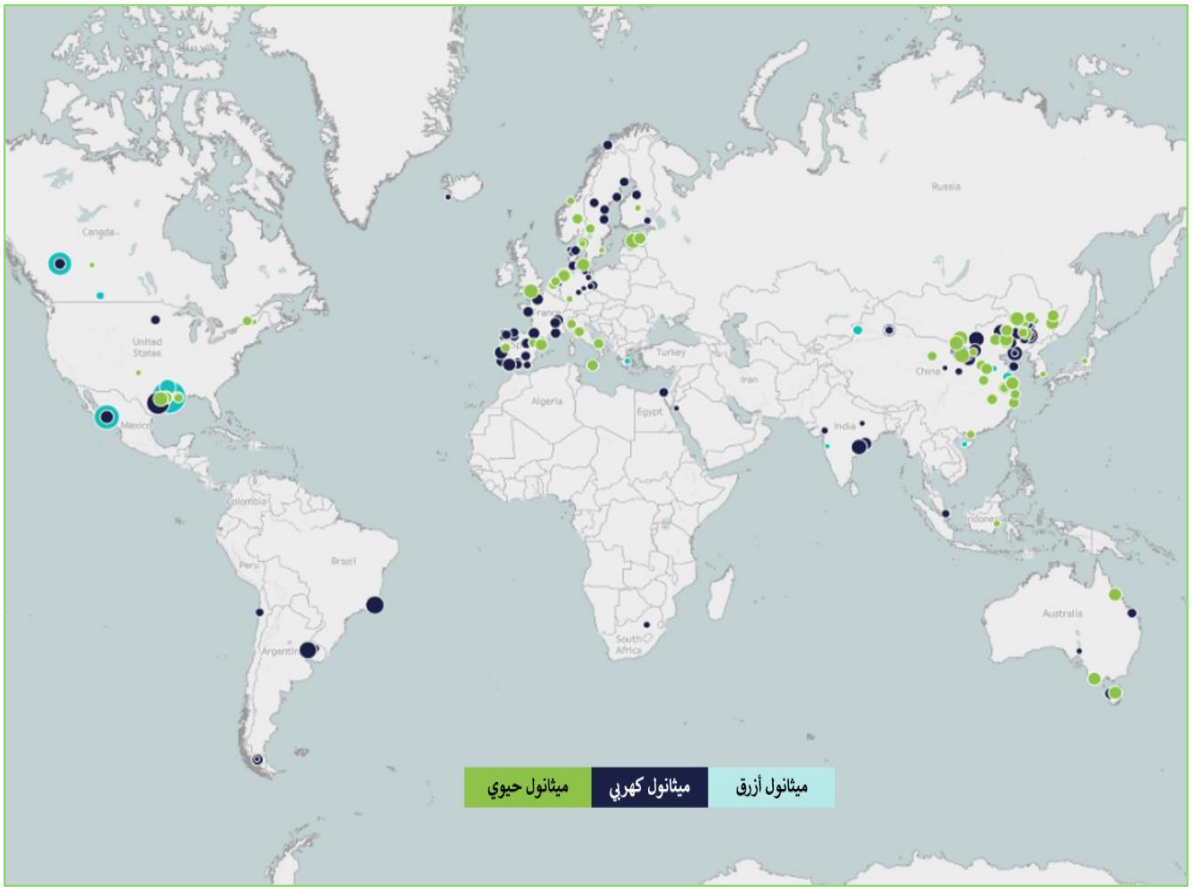
المصدر: GENA solution، November 2024

37 Gena, renewable methanol update, May 2024.

38 Renewable Methanol, https://www.methanol.org/renewable/

الشكل (2-4)

التوزع الجغرافي التفصيلي لمشروعات إنتاج الميثانول الحيوي، والكهربائي والأزرق



المصدر: Methanol institute, Renewable Methanol,2024

1.1.2. آفاق، مؤشرات واتجاهات سوق الميثانول منخفض الكربون حتى عام 2050

تشير التقديرات إلى أن سوق الميثانول العالمي يتجه نحو تحولات هيكلية عميقة بحلول عام 2050، مدفوعة بالزخم المتنامي نحو الاستدامة، وتغير أنماط الإنتاج والتوزيع، وتطور تقنيات الطاقة منخفضة الكربون. ويرتكز هذا التحول على ثلاث مسارات رئيسية لإنتاج الميثانول منخفض الكربون: الميثانول الحيوي، الميثانول الكهربائي، والميثانول الأزرق، حيث يعكس كل منها توازنًا مختلفًا بين النضج التكنولوجي، والسياسات البيئية، والجدوى الاقتصادية.

على المدى القريب والمتوسط، يُتوقع أن يواصل الميثانول الحيوي التقدم بفضل انخفاض تكاليف إنتاجه ونضجه التكنولوجي، ما يجعله خيارًا مرنًا للدول الراغبة في تقليل الانبعاثات الكربونية دون استثمارات ضخمة في البنية التحتية. وتشير التقديرات إلى أن إنتاجه قد يبلغ بين **30 -40** مليون طن سنويًا بحلول عام 2050، أي ما يعادل **10–15%** من السوق العالمي. وتعد أوروبا وأمريكا

الشمالية أبرز المناطق المنتجة، فيما تبرز دول عربية مثل مصر والمغرب بفضل وفرة الكتلة الحيوية والمخلفات الزراعية[39] .

أما الميثانول الكهربائي، فهو يُعد ركيزة استراتيجية على المدى البعيد في مسار التحول الطاقي، مدعومًا بانخفاض تكلفة الطاقة المتجددة، وتقدم تقنيات التحليل الكهربائي لإنتاج الهيدروجين الأخضر. وتُقدّر مساهمته المستقبلية بين **70 -90** مليون طن سنويًا، أي نحو **20–25%** من إجمالي السوق العالمي بحلول 2050. وتُظهر البيانات تصدّر أوروبا الشمالية والصين لهذا التوجه، بينما تمضي دول عربية مثل السعودية والإمارات بخطى متسارعة في تطوير مشروعات كبرى للهيدروجين الأخضر، في حين تخطو مصر والمغرب خطوات واثقة في هذا الاتجاه بدعم من شراكات دولية.

ويحافظ الميثانول الأزرق على أهميته كحل مرحلي لتقليل الانبعاثات في ظل استمرار الاعتماد على الوقود الأحفوري، إذ يعتمد على الغاز الطبيعي مقرونًا بتقنيات التقاط الكربون وتخزينه. وتُقدّر مساهمته في السوق العالمي بين **40 -50** مليون طن سنويًا بحلول عام 2050، أي بنسبة تقارب **10–15%**. وتتصدر الولايات المتحدة وكندا هذا المجال، بينما تلعب السعودية وقطر والإمارات دورًا مهمًا في العالم العربي مستفيدة من وفرة الغاز الطبيعي والبنية التحتية الملائمة لتطبيق تقنيات التقاط الكربون، إلى جانب جهود سلطنة عمان في هذا الإطار[40].

في هذا السياق، تبرز مساهمة الدول العربية الأعضاء في منظمة أوابك من خلال تبنّي مشاريع طموحة مدعومة برؤى واستراتيجيات وطنية تهدف إلى تنويع مصادر الطاقة وخفض الانبعاثات الكربونية، مستفيدة من وفرة موارد الطاقة المتجددة، واحتياطيات الغاز الطبيعي، والبنية التحتية المتطورة، إلى جانب الدعم المؤسسي المتزايد لتبني التقنيات النظيفة. وتشير التقديرات إلى أن هذه الدول مرشحة للإسهام بشكل ملحوظ في سوق الميثانول منخفض الكربون عالميًا، بنسبة قد تصل إلى **15–20%** من الإنتاج العالمي للميثانول الحيوي، و**50–60%** من الميثانول الكهربائي، ونحو **20–30%** من إنتاج الميثانول الأزرق، مما يعكس دورها المتنامي في دعم التحول العالمي نحو أنظمة طاقة أكثر استدامة.

39 International Energy Agency. (2023). World Energy Outlook 2023: Energy Trends and Technologies. Retrieved from https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023

40 United Nations. (2022). The Role of Methanol in Sustainable Energy Systems. Energy for All Report. Retrieved from https://www.seforall.org

وتعكس مبادرات مثل "رؤية المملكة العربية السعودية 2030"، و"استراتيجية الإمارات للطاقة 2050"، وخطة مصر الوطنية للهيدروجين الأخضر، توجهًا متسارعًا لدمج الميثانول منخفض الكربون في استراتيجيات الطاقة المستدامة، وتعزيز الحضور العربي في سلاسل القيمة الخضراء. كما تتيح هذه المشاريع فرصًا واسعة للشراكات التقنية والاستثمارية، وتُرسّخ مكانة الميثانول كمكون محوري في مزيج الطاقة العربي، وأداة استراتيجية لدعم الانتقال إلى اقتصاد عالمي منخفض الانبعاثات وأكثر استدامة.

2.2. نماذج مشروعات إنتاج الميثانول الأخضر والأزرق حول العالم

في ظل تزايد الطلب العالمي على وقود نظيف وفعّال، خصوصًا في قطاعات النقل والصناعة، شرعت العديد من الدول في تطوير مشروعات رائدة تعتمد على تقنيات مبتكرة تدعم التحول نحو أنظمة طاقة أكثر استدامة. وتعكس هذه المبادرات تنامي الجهود الدولية لإعادة تشكيل سلاسل الإمداد الطاقي والصناعي، عبر استثمارات ضخمة في البنية التحتية والبحث والتطوير، استعدادًا لتلبية الاحتياجات المستقبلية حتى عام 2050. وفي هذا الإطار، تبرز أهمية دراسة أبرز المشروعات العالمية والإقليمية، لفهم آفاق النمو المستقبلية.

1.2.2. نماذج مشروعات إنتاج الميثانول الأخضر

برزت مشروعات إنتاج **الميثانول الأخضر** كأحد المسارات الواعدة لتحقيق أهداف الحياد الكربوني. وتتنوع هذه المشروعات بين مسارين رئيسيين: الأول هو **الميثانول الحيوي** الذي يُنتَج من مصادر الكتلة الحيوية أو النفايات، والثاني هو **الميثانول الكهربائي** المعتمد على الهيدروجين الأخضر وثاني أكسيد الكربون المُلتقط باستخدام الكهرباء من مصادر متجددة. ويعكس هذا التنوع رغبة الأسواق العالمية في تنويع سلاسل الإمداد وتقليل البصمة الكربونية للصناعات والنقل، لا سيما البحري.

1.1.2.2. مشروعات إنتاج الميثانول الحيوي

يأتي مشروع **Enerkem Alberta Biofuels** في مدينة إدمنتون بمقاطعة ألبرتا الكندية، في مقدمة مشروعات إنتاج الميثانول الحيوي ، والذي بدأ تشغيله في عام 2016، كأحد النماذج الرائدة

عالميًا لإنتاج الميثانول الحيوي من النفايات البلدية الصلبة غير القابلة لإعادة التدوير، بطاقة إنتاجية تقدر بحوالي 30 ألف طن سنويًا، وبتكلفة استثمارية تصل إلى 875 مليون دولار كندي. يعكس المشروع مفهوم الاقتصاد الدائري، مما يحقق فائدة بيئية واقتصادية مزدوجة.

في ذات السياق، أطلقت الحكومة بالتعاون مع شركاء صناعيين مشروعًا طموحًا آخر في مقاطعة كيبيك الكندية، يجري تطوير مشروع رائد تحت اسم **Varennes Carbon Recycling (VCR)**، يُتوقع تشغيله بحلول نهاية عام 2025، ويستهدف إنتاج نحو **125ألف طن سنويًا من الميثانول الحيوي** .يقوم المشروع على تقنيتين محوريتين :**تغويز النفايات الصناعية والزراعية**—بما يشمل المخلفات العضوية والكتلية من الصناعات والزراعة—وإنتاج **الهيدروجين الأخضر عبر التحليل الكهربائي** باستخدام مصادر طاقة متجددة. ويُعد هذا المشروع نموذجًا متقدمًا لمنشآت الوقود منخفض الكربون، إذ يدمج بين مصادر متنوعة للكربون والطاقة النظيفة في إطار متكامل، مما يجعله إحدى الركائز الاستراتيجية ضمن جهود كندا لتقليل الانبعاثات وتعزيز الاقتصاد الدائري. يبين الشكل(2-5) مصنع شركة **Enerkem** لإنتاج الميثانول الحيوي من النفايات البلدية الصلبة.

الشكل (2-5)

مصنع شركة Enerkem لإنتاج الميثانول الحيوي من النفايات البلدية الصلبة

المصدر:World's first urban waste-to-biofuels partnership, Enerkem

وفي أوروبا، يُعد مصنع شركة **OCI N.V. Bio-Methanol Plant in Rotterdam** في مدينة روتردام الهولندية أحد أكبر مشروعات إنتاج الميثانول الحيوي في القارة، حيث يعتمد على مزيج من

الكتلة الحيوية والهيدروجين الأخضر لإنتاج نحو 200 ألف طن سنويًا. يأتي هذا المشروع ضمن رؤية هولندا لتطوير وقود حيوي منخفض الكربون يدعم الصناعات الثقيلة ويُقلل من الانبعاثات الكربونية ضمن الموانئ الصناعية الكبرى، خاصة في ظل التحول النشط الذي يشهده ميناء روتردام ليصبح مركزًا للطاقة النظيفة في أوروبا.

وقد بدأت الشركة عمليات إنتاج الميثانول الحيوي من خلال استحواذها عام 2015 على شركة **BioMCN**،[41] التي كانت تملك أول منشأة تجارية لإنتاج الميثانول الحيوي في أوروبا، بطاقة مبدئية بلغت 65 ألف طن سنويًا. ومنذ ذلك الحين، طوّرت شركة **OCI** المنشأة ووسّعت قدراتها الإنتاجية والتشغيلية، حتى أصبحت من أكبر مزودي الميثانول الحيوي المعتمد عالميًا[42]) .

وتكمن أهمية المشروع في تكامله مع البنية التحتية اللوجستية بميناء روتردام، إذ يستفيد من الربط المباشر بشبكات أنابيب الغاز الوطنية، وشبكات السكك الحديدية والنقل النهري والبحري، مما يتيح وصولًا مرنًا إلى الأسواق الأوروبية. كما تُعد الشركة أول من أطلق خدمة تزويد السفن بالميثانول الحيوي في الميناء من خلال شراكة مع شركة **Unibarge** ، لتشغيل أول بارجة مخصصة لهذا الغرض في روتردام. يبين الشكل (2-6) مصنع شركة BioMCN لإنتاج الميثانول الحيوي في هولندا.

الشكل (2-6)

مصنع شركة BioMCN لإنتاج الميثانول الحيوي في هولندا

المصدر: BioMCN to double capacity with €100 million investment

41 OCI N.V. to Acquire BioMCN,2015

42 OCI Global fuels first ever green methanol powered container vessel

ومن جانب آخر، يُعد **مشروع Ecoplanta** في مدينة **El Morell** الإسبانية نموذجًا متقدمًا لإنتاج الميثانول الحيوي من النفايات الصلبة البلدية غير القابلة للتدوير ، ويعكس التوجه الأوروبي نحو اقتصاد دائري منخفض الكربون. يعتمد المشروع على **تقنية Enerkem الكندية**، ويستهدف معالجة نحو **400 ألف طن من النفايات سنويًا**، لإنتاج حوالي **240 ألف طن من الميثانول الحيوي**. ومن المتوقع بدء التشغيل الفعلي للمشروع في **عام 2026**، ليُشكل رافعة جديدة لدور إسبانيا في سلسلة القيمة الأوروبية للوقود المستدام. يبين الشكل (2-7) المواد الخام الأولية من النفايات الصلبة البلدية لإنتاج الميثانول الحيوي في إسبانيا.

الشكل (2-7)

المواد الخام الأولية من النفايات الصلبة البلدية لإنتاج الميثانول الحيوي في إسبانيا

المصدر: REPSOL, Ecoplanta: A project for non-recyclable municipal waste recovery

وفي هذا السياق، تمضي أستراليا بخطى واثقة في تطوير مشروعات نوعية لإنتاج الميثانول الحيوي، مستفيدة من مواردها الطبيعية وتوجهاتها الاستراتيجية نحو الطاقة المستدامة .وفي هذا الإطار، تقود شركة **ABEL Energy** مشروعًا ضخمًا في مدينة **Townsville** لإنتاج ما يصل إلى **300 ألف طن سنويًا** من الميثانول الحيوي، بالاعتماد على الكتلة الحيوية الزراعية. ويُعد هذا المشروع من بين أكبر الاستثمارات في هذا المجال بمنطقة آسيا والمحيط الهادئ، إذ تُقدّر تكلفته بنحو

1.7مليار دولار أسترالي، مع خطط لبدء التشغيل التجاري في عام **2028**وتوجيه جزء كبير من الإنتاج نحو التصدير للأسواق الإقليمية.

تشير هذه النماذج إلى أن نجاح مشروعات الميثانول الحيوي لا يرتبط فقط بالتقنية المستخدمة، بل يعتمد أيضًا على التكامل بين مصادر الكربون المتجددة، ودعم السياسات العامة، وتوفر البنية التحتية للنقل والتصدير. كما أن النفايات البلدية والزراعية تمثل موردًا غير مستغلًا بالشكل الكافي في العديد من الدول، ما يفتح آفاقًا استثمارية واعدة، خاصة في المناطق الصناعية والبحرية. ويُنتظر أن يشهد السوق العالمي نموًا متسارعًا في هذا النوع من الوقود النظيف، مع تزايد التشريعات التي تفرض نسبًا إلزامية لاستخدام الوقود المستدام في قطاعات مثل الشحن والطيران والصناعات الكيماوية.

2.1.2.2. مشروعات إنتاج الميثانول الكهربائي

من المتوقع أن تشهد مشروعات إنتاج الميثانول الكهربائي نموًا ملحوظًا خلال السنوات القادمة، مدفوعة بالتقدم التكنولوجي المتسارع، وتوسع استخدام الطاقة المتجددة، إلى جانب الدعم السياسي المتزايد لتحقيق أهداف الحياد الكربوني. وقد بدأت تبرز على الساحة تجارب تجارية واعدة، خاصة في أوروبا وآسيا، تمثل نماذج أولية للتكامل بين الابتكار التكنولوجي واستغلال الموارد المستدامة.

من أبرز هذه النماذج، مشروع **"George Olah Renewable Methanol Plant"** في **آيسلندا**، الذي تُشغّله شركة **Carbon Recycling International *(CRI)***، ويُعد من أوائل المنشآت التجارية على مستوى العالم في إنتاج الميثانول الأخضر. يعتمد هذا المشروع على تقنية متقدمة لالتقاط ثاني أكسيد الكربون من محطة طاقة حرارية أرضية، ودمجه مع الهيدروجين المُنتَج من مصادر متجددة، لإنتاج الميثانول المعروف تجاريًا باسم **"Vulcanol"**، بطاقة تبلغ نحو 4 آلاف طن سنويًا [43].

كما يبرز في هذا الإطار مشروع شركة **Liquid Wind** في مدينة **Örnsköldsvik** بالسويد، والذي يُعد من أكبر المبادرات الأوروبية في هذا المجال. يُخطط لهذا المشروع أن يُنتج نحو **50 ألف طن سنويًا** من الميثانول الأخضر، باستثمارات تتجاوز **100مليون يورو**، مع توجيه الإنتاج بشكل

43 IRENA – Renewable Methanol Report, 2021

رئيسي لتلبية الطلب المتزايد على وقود نظيف في قطاع الشحن البحري، بما يتماشى مع التوجهات الدولية لتقليل انبعاثات الكربون من هذا القطاع الحيوي[44] .

ويعتمد المشروع على نظام تقني متكامل يجمع بين إنتاج الهيدروجين الأخضر عبر التحليل الكهربائي باستخدام الطاقة الريحية والكهرومائية، والتقاط ثاني أكسيد الكربون من منشأة **Övik Energi** القريبة. يبين الشكل (2-8) مصدر ثاني أكسيد الكربون من منشأة **Övik Energi** لإنتاج الميثانول الكهربائي.

شكل (2-8)

مصدر ثاني أكسيد الكربون من منشأة **Övik Energi** لإنتاج الميثانول الكهربائي

المصدر: Liquid Wind and Övik Energi - The first eFuel facility Örnsköldsvik, Sweden

ويُعد هذا المشروع الخطوة الأولى ضمن خطة توسعية تشمل عدة مواقع في الدول الإسكندنافية، مما يعزز من دور السويد في التحول نحو اقتصاد منخفض الكربون.

44 Liquid Wind to build eMethanol facility in Sweden. The company is planning the first eMethanol facility in northern Sweden, which they expect to be operational from 2023.

اقتصاديًا، يوفر المشروع فرصًا استثمارية مهمة تساهم في تطوير قطاع الطاقة النظيفة، ويُعد مثالًا حيًا على كيفية دمج الابتكار التكنولوجي مع الاقتصاد الدائري ، كما يفتح آفاقًا جديدة للتصدير والاستخدام المستدام للوقود في القطاعات البحرية والصناعية.

وفي جنوب الدنمارك، يقام أول مصنع تجاري لإنتاج الميثانول الكهربائي باستخدام مصادر متجددةفي مدينة **Kassø** [45] . يعتمد المشروع إلى بنية تحتية متقدمة تعتمد على الطاقة الشمسية، ويتضمن ثلاثة أجهزة تحليل كهربائي، تبلغ القدرة الإجمالية لكل منها نحو **17.5ميغاوات**، مما يتيح إنتاج ما يصل إلى **6آلاف طن من الهيدروجين الأخضر سنويًا** .ويتم دمج هذا الهيدروجين مع ثاني أكسيد الكربون من مصادر صناعية، باستخدام تقنية مبتكرة طُورت داخل المشروع نفسه، لإنتاج الميثانول الأخضر. ومن المتوقع أن يبلغ الإنتاج السنوي للمصنع **42 ألف طن**، على أن تبدأ عمليات التوريد الفعلي لشركات كبرى مثل شركة **Maersk**، وشركة **LEGO**، وشركة **Novo Nordisk** اعتبارًا من عام **2027**[46]. يبين الشكل (2-9) أول مصنع تجاري ضخم لإنتاج الميثانول الكهربائي في مدينة **Kassø** ، جنوب الدنمارك.

شكل (2-9)

أول مصنع تجاري ضخم لإنتاج الميثانول الكهربائي في مدينة Kassø، جنوب الدنمارك

المصدر: The world's largest green methanol plant fuels green shipping and industry,2024

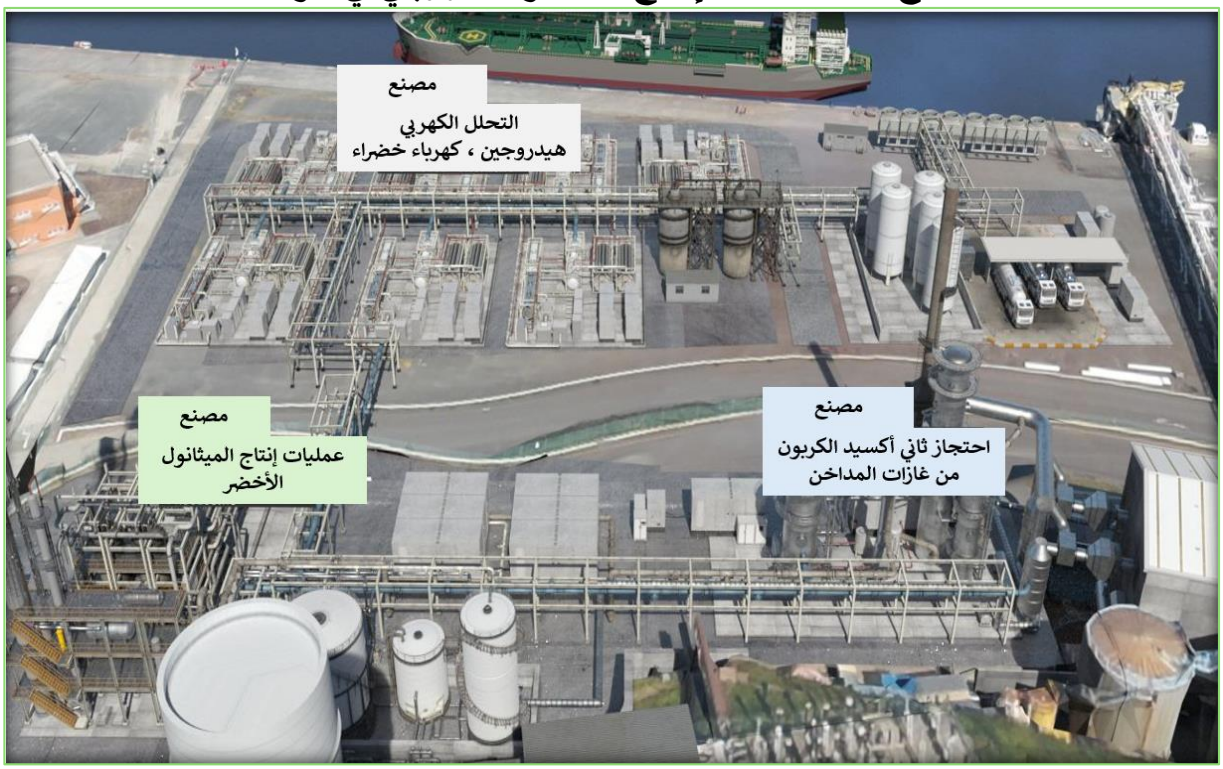
45 European Energy wins tender to start next generation of e-fuel production, Oct 27, 2023

46 The world's largest green methanol plant fuels green shipping and industry, October 2024.

وفي ذات السياق، يُعد مشروع **TRISKELION** في **هولندا** من أبرز المبادرات الأوروبية لإنتاج الميثانول الكهربائي، حيث يستهدف إنتاج 40 ألف طن سنويًا بدءًا من عام 2026. يتكون المشروع من ثلاث منشآت متكاملة تلتقط ثاني أكسيد الكربون من غازات المداخن باستخدام تقنية الأمينات، وتستخدم الكهرباء المتجددة من الرياح والطاقة المائية لتوليد الهيدروجين الأخضر. يتم دمج الهيدروجين مع ثاني أكسيد الكربون لإنتاج الميثانول عبر تفاعلات كيميائية متقدمة. كما يتم بيع الأكسجين الناتج من عملية التحليل الكهربائي، مما يُسهم في تعزيز الجدوى الاقتصادية. ويقع المشروع في موقع استراتيجي داخل أحد الموانئ الهولندية، ما يُسهل عمليات التزود بالوقود مباشرة للسفن، ويُقلل التكاليف اللوجستية..يبين الشكل (2-10) مصنع **TRISKELION** لإنتاج الميثانول الكهربائي في هولندا

شكل (2-10)

مصنع TRISKELION لإنتاج الميثانول الكهربائي في هولندا



المصدر: triskelion | green methanol plant, by FORESTAL DEL ATLÁNTICO

أما في **شمال إسبانيا**، فقد أعلنت شركة **HyFive** عن استثمار يبلغ 250 مليون يورو لإنشاء مصنع لإنتاج الهيدروجين الأخضر والميثانول الكهربائي في ميناء **El Musel** بمدينة **Gijon** . ومن المخطط أن تبدأ أعمال البناء في الربع الثالث من عام 2025، تمهيدًا للتشغيل التجاري في عام

2027. وفي مرحلته الأولى، يعتمد المشروع على قدرة تحليل كهربائي تبلغ 50 ميغاوات لإنتاج الهيدروجين الأخضر، مما يتيح إنتاج نحو 100 ألف طن من الميثانول كهربائي سنويًا، على أن يتم مضاعفة القدرة إلى 100 ميغاوات لاحقًا. يسهم المشروع في تقليل الانبعاثات بنحو 175 ألف طن سنويًا من ثاني أكسيد الكربون، ويحظى بدعم من برنامج **H2 Pioneros** التابع للاتحاد الأوروبي. ويُعد المشروع نموذجًا متكاملًا لتوسيع بنية الهيدروجين الأخضر وربطها مباشرة بإنتاج وقود منخفض الكربون يخدم النقل البحري والصناعات الثقيلة[47].يبين الشكل (2-11) موقع بناء مصنع إنتاج الهيدروجين الأخضر والميثانول الكهربائي في إسبانيا.

شكل (2-11)

موقع بناء مصنع إنتاج الهيدروجين الأخضر والميثانول الكهربائي في إسبانيا

المصدر: WSC's Hyfive plans €250 million investment in Gijon green hydrogen and methanol plant,2024

في الصين، تتسارع جهود تطوير مشروعات الميثانول الأخضر تماشيًا مع الاستراتيجية الوطنية للتحول نحو اقتصاد منخفض الكربون واستخدام مصادر الطاقة المتجددة. من بين هذه

[47] يُعد برنامج **H2 Pioneros** إحدى المبادرات الأوروبية الرائدة لدعم مشروعات الهيدروجين الأخضر، ويُموَّل من الاتحاد الأوروبي ضمن خطة **NextGenerationEU** لتعافي الاقتصاد. يهدف البرنامج إلى تسريع نشر التقنيات النظيفة عبر تمويل مشروعات متكاملة تجمع بين إنتاج واستخدام الهيدروجين، خاصة في الموانئ والمناطق الصناعية. ويُركّز على تقليل الانبعاثات وتعزيز استقلال الطاقة، مع دعم مشروعات إنتاج الميثانول المنتج من مصادر متجددة.

المشروعات، يقع مصنع ضخم في مقاطعة **Henan**، والذي يُعد من أبرز المبادرات في البلاد لإنتاج الميثانول الأخضر باستخدام ثاني أكسيد الكربون الملتقط من مصادر صناعية والطاقة المتجددة، بطاقة إنتاجية تصل إلى **110 ألف طن سنويًا.**

إلى جانب هذا المشروع، تعمل الصين على تطوير عدة منشآت أخرى متخصصة في إنتاج الميثانول منخفض الكربون. ففي مقاطعة **Shanghai**، يتم إنشاء مشروع يدمج بين التقاط الكربون وتحويل النفايات الصناعية إلى هيدروجين أخضر ومن ثم إلى ميثانول، بطاقة إنتاجية متوقعة تبلغ **70 ألف طن سنويًا.** يستهدف هذا المشروع، المعروف باسم **Shanghai Green Methanol Project**، تشغيله التجاري في عام **2026**، ويأتي ضمن خطة أوسع لتعزيز استخدام الهيدروجين الأخضر في الصناعات الكيميائية الثقيلة.

كما أطلقت شركة **Sinopec**، إحدى أكبر شركات النفط والكيماويات في الصين، مشروعًا تجريبيًا لإنتاج الميثانول الأخضر باستخدام الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، بالتعاون مع عدد من الشركات التقنية المحلية والدولية. يهدف مشروع **Sinopec Renewable Methanol Pilot Project** إلى إنتاج حوالي **50 ألف طن سنويًا**، مع خطط لزيادة الإنتاج مستقبلاً. تم تدشين هذا المشروع في عام **2023** ويُعد خطوة مهمة في دمج التقنيات المتقدمة للطاقة المتجددة مع الصناعات الكيميائية التقليدية.

تُظهر هذه المشروعات حجم الاستثمار والتقدم التقني الذي تشهده الصين في مجال الميثانول الأخضر، ويُتوقع أن تسهم هذه المشاريع في تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بحوالي **2002 ألف طن سنويًا** بمجرد دخولها الخدمة الكاملة، مما يدعم التزام الصين بتحقيق أهداف الحياد الكربوني بحلول عام 2060.

وعلى الرغم من هذا الزخم، فإن بعض المشروعات واجهت تحديات حقيقية. ففي السويد، أعلنت **شركةØrsted** إيقاف تطوير مشروع **FlagshipONE** الذي كان يستهدف إنتاج 55 ألف طن سنويًا من الميثانول المنتج كهربائيًا باستخدام تحليل كهربائي بقدرة 70 ميغاوات. وقد أُعلن عن المشروع في 2022، وكان من المقرر أن يستخدم ثاني أكسيد الكربون الملتقط من محطة طاقة حيوية مجاورة. إلا أن الشركة اضطرت إلى إيقافه نتيجة تباطؤ تطور السوق وغياب عقود شراء طويلة الأجل، إلى جانب الفجوة الكبيرة بين سعر الميثانول المستدام والميثانول التقليدي، ما أسفر عن

خسائر تُقدر بنحو 1.5 مليار كرونة دنماركية، ورسوم إلغاء بقيمة 44 مليون دولار. ويُبرز هذا المثال العقبات الاقتصادية والتجارية التي ما تزال تعترض طريق مشروعات الوقود الأخضر، رغم نضوج التكنولوجيا. يبين الشكل (2-12) مخطط مشروع **FlagshipONE** لإنتاج الميثانول المنتج كهربائيًا من مصادر متجددة في السويد.

الشكل (2-12)

مخطط مشروع FlagshipONE لإنتاج الميثانول المنتج كهربائيًا من مصادر متجددة في السويد

المصدر: Ørsted Pulls Plug on Shipping E-Methanol Fuel Project Citing Slower Demand,2024

2.2.2.2. مشروعات إنتاج الميثانول الأزرق

تُعد مشروعات إنتاج الميثانول الأزرق من أبرز الابتكارات الحديثة في مسار التحول الطاقي، حيث تشهد انتشارًا متزايدًا في عدد من المناطق حول العالم، مدعومة باستثمارات كبيرة وتوظيف تقنيات متطورة. وتعكس هذه المشروعات التزامًا دوليًا متصاعدًا ببناء اقتصاد دائري منخفض الكربون، يقوم على الاستفادة من الغاز الطبيعي مقرونًا بتقنيات احتجاز الكربون وتخزينه.

في آسيا، تبرز الصين كمركز رئيسي لتطوير مشروعات الميثانول الأزرق. فقد نجحت شركة **Carbon Recycling International (CRI)** بالتعاون مع شركة **Jiangsu Sailboat** في تشغيل أحد أكثر مصانع تحويل ثاني أكسيد الكربون إلى ميثانول كفاءة في مقاطعة **Jiangsu** ، حيث يعاد تدوير نحو

150 ألف طن من ثاني أكسيد الكربون سنويًا لإنتاج حوالي 100 ألف طن من الميثانول الأزرق، وهو ثاني أكبر مصنع من نوعه عالميًا. يستخدم الميثانول المنتج في تصنيع مشتقات كيميائية مستدامة مثل البلاستيك وطلاءات **EVA** للألواح الشمسية[48]. كما يعمل معهد الفيزياء الكيميائية في مدينة **Dalian** على مشروع ضخم بطاقة إنتاجية تصل إلى 500 ألف طن سنويًا، باستثمار يقدر بنحو 700 مليون دولار، مع توقع بدء التشغيل في عام 2026، مما يعكس التوسع الصناعي الصيني في مجال الاستدامة. يبين الشكل (2-13) ثاني أكبر مصنع في العالم لإنتاج الميثانول الأزرق.

شكل (2-13)
ثاني أكبر مصنع في العالم لإنتاج الميثانول الأزرق

المصدر: **CRI AND JIANGSU SAILBOAT START UP WORLD'S MOST EFFICIENT CO_2-TO-METHANOL PLANT**

وفي الهند، أطلقت شركة **Carbon Clean Solutions** مشروعًا في **Gujarat** بطاقة 50 ألف طن سنويًا بتكلفة استثمارية حوالي 80 مليون دولار، بدأ التشغيل في 2024، ويستخدم انبعاثات صناعية كمصدر للكربون، مما يعكس التزام الهند بالتكنولوجيا المناخية.

48 CRI AND JIANGSU SAILBOAT START UP WORLD'S MOST EFFICIENT CO_2-TO-METHANOL PLANT

في أوروبا، يشهد القطاع أيضًا تقدمًا ملحوظًا. ففي **أيسلندا،** يقود مشروع **George Olah** في مقاطعة **Svartsengi** جهود إنتاج الميثانول الأزرق من انبعاثات محطات الطاقة الحرارية الأرضية، بطاقة 10 آلاف طن سنويًا وباستثمار 25 مليون دولار، وبدأ تشغيله في 2023 كنموذج رائد للاستفادة من الموارد المتجددة . يبين الشكل (2-14) منشأة إنتاج الميثانول الأزرق في أيسلندا.

الشكل (2-14)

منشأة إنتاج الميثانول الأزرق في أيسلندا

في **ألمانيا،** يُعد مشروع **Ingolstadt** التابع لشركة **Carbon Clean Solutions** نموذجًا متقدمًا في هذا المجال، حيث يعتمد على إعادة تدوير الانبعاثات الصناعية بطاقة إنتاجية تبلغ نحو 100 ألف طن سنويًا، وباستثمار يصل إلى 200 مليون دولار. وقد بدأ تشغيله بالفعل في عام 2024، ما يعزز توجه الصناعات الألمانية نحو تقليل البصمة الكربونية.

أما في **هولندا،** فتخطط شركة **OCI N.V.** لتشييد مشروع كبير في مدينة **Rotterdam** بطاقة إنتاجية تصل إلى 400 ألف طن سنويًا، ما يجعله من أضخم مشروعات الميثانول الأزرق في أوروبا، وتُقدّر تكلفته الاستثمارية بنحو 600 مليون دولار، ومن المتوقع بدء تشغيله في عام 2026، ليُشكل مركزًا إقليميًا محوريًا في سوق الوقود منخفض الكربون.

وفي **المملكة المتحدة**، تواصل شركة **Carbon Clean Solutions** جهودها من خلال مشروعها في **Teesside**، الذي يهدف إلى إنتاج نحو 60 ألف طن سنويًا من الميثانول الأزرق، تبلغ الكلفة الاستثمارية للمشروع حوالي 250 مليون دولار، ومن المنتظر أن يبدأ التشغيل بنهاية 2025.

في أمريكا الشمالية، تلعب كندا دورًا بارزًا من خلال مصنع شركة **Methanex Corporation** في **Medicine Hat**، حيث تعتمد العملية على حقن ثاني أكسيد الكربون المعزول من منشأة صناعية مجاورة مباشرة في دورة تصنيع الميثانول الأزرق، مما يعزز الاستدامة ويقلل الانبعاثات ويُسهم في تقليل الانبعاثات الضارة. يبين **الشكل (2-15)** مصنع إنتاج الميثانول الأزرق في **كندا**[49].

الشكل (2-15)

مصنع إنتاج الميثانول منخفض الكربون في كندا

المصدر: Methanol Report,2018 Methanol Institute, Renewable

أما في **الولايات المتحدة**، فتبني شركة **Carbon Clean Solutions** مشروعًا في **Port Arthur, Texas** بطاقة 200 ألف طن سنويًا، بتكلفة استثمارية 400 مليون دولار، ومن المتوقع أن يبدأ

49 Methanol Institute, Renewable Methanol Report,2018

التشغيل في 2025، ما يدعم جهود تقليل الانبعاثات الصناعية وتحويلها إلى منتجات ذات قيمة اقتصادية.

في **النرويج**، تعمل شركة **Equinor** على تطوير مشروع في **Tjeldbergodden** بطاقة إنتاجية تصل إلى 90 ألف طن سنويًا. يعتمد المشروع على غازات الاحتراق الصناعي ويُقدر الاستثمار فيه بحوالي 150 مليون دولار. من المتوقع أن يبدأ التشغيل في عام 2025، مما يعزز ريادة النرويج في مجال الطاقة النظيفة. يوضح الجدول (2-1) بعض مشاريع إنتاج الميثانول الأزرق المعلن عنها خلال الفترة 2023-2026.

الجدول (2-1)

بعض مشاريع إنتاج الميثانول الأزرق المعلن عنها خلال الفترة 2023-2026

الدولة	الشركة	الموقع	الطاقة الإنتاجية ألف طن/ سنه	تاريخ التشغيل
الولايات المتحدة الأمريكية	Carbon Clean Solutions	Port Arthur, Texas	200	2025
ألمانيا	Carbon Clean Solutions	Ingolstadt	100	2024
الهند	Carbon Clean Solutions	Gujarat	50	2024
هولندا	Carbon Clean Solutions	Rotterdam	400	2026
الصين	Dalian Institute of Chemical Physics	Dalian	500	2026
أيسلندا	Carbon Clean Solutions	Svartsengi	10	2023
النرويج	Equinor	Tjeldbergodden	90	2025
المملكة المتحدة	Carbon Clean Solutions	Teesside	60	2025
السويد	Veolia	Skoghall	60	2023
الصين	Veolia	Foshan	300	2023
إيطاليا	Veolia	Gela	80	2025
فرنسا	Veolia	Rouen	100	2026

المصدر: Decarbonization Technology, 2023

يختلف الموعد المتوقع للتشغيل بناءً على التقدم في مراحل التخطيط والبناء والتقنيات المستخدمة. من المتوقع أن تكون المشاريع في ألمانيا والهند من أوائل المشاريع التي تبدأ التشغيل بفضل جاهزيتها التقنية وتوافر التمويل. أما المشاريع في الصين وهولندا، التي تستهدف طاقات

إنتاجية كبيرة، فإنها ستحتاج إلى وقت أطول للوصول إلى التشغيل الكامل بسبب حجمها الكبير والتعقيدات المرتبطة بها.

3.2. واقع وآفاق مشروعات إنتاج الميثانول منخفض الكربون في الدول الأعضاء في أوابك

في إطار التوجه العالمي نحو اقتصاد منخفض الكربون، تتجه العديد من الدول العربية، ولا سيما الدول الأعضاء في منظمة أوابك، إلى دراسة وتنفيذ مشروعات إنتاج الميثانول **الأزرق**، و**الميثانول الأخضر**. ويأتي هذا التوجه ضمن رؤية شاملة تهدف إلى تحقيق أقصى استفادة من الموارد الطبيعية الغنية، وتعزيز البنية التحتية الوطنية لتلبية متطلبات الأسواق العالمية، في ظل اشتداد المنافسة وارتفاع سقف المعايير البيئية، لا سيما في قطاعات مثل الشحن البحري والصناعات الثقيلة.

وتملك الدول الأعضاء في منظمة أوابك مقومات استثنائية تجعلها مؤهلة للاضطلاع بدور ريادي في هذا المسار، بفضل احتياطيات ضخمة من الغاز الطبيعي، وتوافر مصادر وفيرة للطاقة الشمسية والرياح، إلى جانب بنية تحتية صناعية متقدمة، وخبرات متراكمة في قطاع التكرير والبتروكيماويات.

وفي هذا السياق، يُمثّل **مسار الميثانول الأزرق** خيارًا عمليًا وقابلاً للتنفيذ على المدى القريب والمتوسط، لما يوفره من مرونة في استخدام البنية القائمة، وقدرته على خفض الانبعاثات الكربونية من خلال إدماج تقنيات احتجاز الكربون، بالإضافة إلى سرعة التنفيذ وانخفاض الكلفة النسبية مقارنة بالحلول الأخرى.

أما **الميثانول الأخضر**، فيُعد خيارًا استراتيجيًا للمستقبل، ينسجم مع أهداف الحياد الكربوني والتحول الطاقي العميق. غير أن هذا المسار يتطلب بنية تحتية جديدة واستثمارات ضخمة في تقنيات إنتاج الهيدروجين الأخضر، فضلاً عن تطوير القدرات البشرية وتوطين التكنولوجيا المتقدمة في هذا المجال. ويعتمد نجاح هذا النموذج على وفرة الكهرباء المتجددة وتكامل سلاسل القيمة الصناعية واللوجستية لإنتاج ونقل واستخدام الميثانول النظيف.

وتبرز الحاجة الملحة إلى تطوير أطر تنظيمية وتشريعية واضحة تدعم هذه التحولات، بما يشمل حوافز استثمارية مشجعة، وتسهيلات لنقل وتوطين التكنولوجيا، إلى جانب تشجيع البحث والتطوير، وتعزيز التعاون الإقليمي لتقليص الفجوة التقنية وتحقيق الاستدامة الاقتصادية والبيئية.

ويمثل الجمع بين المسارين – الأزرق والأخضر – استراتيجية انتقالية متوازنة، تتيح للدول الأعضاء دخول أسواق الوقود النظيف تدريجيًا، وتكريس مكانتها كمصدر موثوق للميثانول منخفض الكربون، مع ما يوفره ذلك من فرص لتنويع مصادر الدخل، وتعزيز القدرة التنافسية في الاقتصاد العالمي الجديد.

وفي هذا الإطار، بدأت بالفعل عدد من الدول الأعضاء في تبني مبادرات ملموسة لتطوير مشروعات ميثانول منخفض الكربون، سواء من خلال إنشاء منشآت إنتاج متخصصة، أو عبر استثمارات مباشرة في البنية التحتية والهيدروجين الأخضر. وتوفر هذه المبادرات نماذج أولية يمكن البناء عليها لتوسيع الحضور العربي في أسواق الطاقة النظيفة.

1.3.2. دولة الإمارات العربية المتحدة

تُعد دولة **الإمارات** من الدول العربية الرائدة في تطوير مشاريع الميثانول منخفض الكربون عبر مسارين متكاملين. في مسار إنتاج الميثانول الأزرق، تقود **شركة تعزيز** تحالف بين شركة أدنوك وشركة أبو طبي التنموية القابضة **ADQ** مشروعًا لإنتاج الميثانول في الرويس بطاقة تبلغ **1.8مليون طن سنويًا**؛ من المتوقع أن يدخل حيز التشغيل بحلول عام 2028، معتمداً على الغاز الطبيعي وتقنيات احتجاز الكربون، مدعومًا بشبكة كهرباء منخفضة الانبعاثات، مما يجعله أحد كبرى المنشآت النظيفة في المنطقة.[50]

أما على صعيد مشروعات إنتاج الميثانول الأخضر، فتعمل **مصدر** بالتعاون مع كل من شركة **INPEX** ومجموعة **Mitsubishi Chemical Group** و شركة **JERA** على دراسة إنشاء منشأة تستخدم الهيدروجين الأخضر وثاني أكسيد الكربون الملتقط من مصدريه الصناعي أو الجوي لإنتاج الميثانول

[50] A'ZIZ plant 1.8 mtpa, clean grid, EPC contract awarded by Samsung E&A, start 2028

الأخضر، موجهًا للاستخدام في قطاع الشحن البحري، ومن المتوقع تنفيذ المشروع بعد عام 2030.[51]

ومن جانب اخر، وقّعت مجموعة موانئ أبو ظبي وشركة مصدر وشركة Advario ، إلى جانب شركة الشحن العالمية "سي إم إيه سي جي إم" **(CMA CGM)** ، اتفاقية لدراسة جدوى إنشاء منشأة لتزويد السفن بالميثانول الكهربائي في ميناء خليفة ومنطقة **KEZAD** الاقتصادية، وذلك في إطار جهود دولة الإمارات لتعزيز بنية تحتية متكاملة تدعم سلاسل الإمداد البحرية للطاقة النظيفة، بما يعزز موقعها كمركز إقليمي للطاقة منخفضة الكربون. [52]

تجسد هذه المبادرات التزام دولة **الإمارات** بتحويل اقتصادها نحو نموذج صناعي أخضر، يوظّف وفرة الغاز والطاقة الشمسية، ويستند إلى بنية تحتية مؤهلة وأطر تشريعية داعمة للتحول المستدام. وما يشجع هذا المسار هو التركيز على تنمية سلاسل القيمة، والاستعداد للارتقاء بدور الإمارات كمركز عالمي لإنتاج الميثانول منخفض الكربون.

2.3.2. مملكة البحرين

تُعد شركة الخليج لصناعة البتروكيماويات (جيبك) المنتج الرئيسي للميثانول في مملكة البحرين، بطاقة إنتاجية سنوية تقارب مليون طن. وفي إطار التوجه الوطني نحو اقتصاد منخفض الكربون، تعمل جيبك حاليًا على تنفيذ خطة تحول تدريجي لإنتاج الميثانول الأزرق، مستفيدة من قرب منشآتها من مجمعات الأسمدة ومحطات توليد الكهرباء، مما يُسهّل دمج تقنيات احتجاز وتخزين الكربون ضمن عملياتها الصناعية. وتأتي هذه الجهود بالتعاون مع شركة **O.S.K. Mitsui Lines** اليابانية، التي وقعت مذكرة تفاهم مع **Bapco Energies** في ديسمبر 2023 لتطوير سلسلة متكاملة لاحتجاز ونقل وتخزين ثاني أكسيد الكربون. ويُتوقّع أن تثمر هذه المبادرات عن التحول الكامل نحو إنتاج وقود منخفض الكربون، مثل الميثانول الأزرق، بحلول عام 2030، انسجامًا مع التزامات البحرين بتحقيق الحياد الكربوني في أفق عام 2060، وخفض الانبعاثات بنسبة ملحوظة بحلول 2035 .[53]

51 Masdar-INPEX-MCG green methanol feasibility via hydrogen & CO_2 for shipping post-2030

52 Industry giants eye e-methanol bunkering and export facility in UAE,2025.

53 MOL and Bapco Energies Sign MoU for Development of Cross Border CO2 Transport and Sequestration,2023.

ويُشار إلى أن شركة **جيبك** كانت من أوائل الشركات في المنطقة التي طبّقت تقنيات خفض الانبعاثات في صناعة الميثانول، من خلال تشغيل وحدة استرجاع ثاني أكسيد الكربون **Carbon Dioxide Recovery – CDR** منذ عام 2009، والتي نجحت في احتجاز أكثر من 1.4 مليون طن من غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج عن عمليات إنتاج الميثانول التقليدي، وإعادة استخدامه في عملية التصنيع. وبذلك تكون الشركة قد بدأت فعليًا إنتاج **الميثانول الأزرق** عبر إعادة تدوير الانبعاثات الصناعية، مما يُجسد التزام البحرين بتعزيز تنوع مصادر إنتاج الميثانول، وتبني حلول الاقتصاد الدائري، وترسيخ نموذج مستدام للطاقة والصناعة في المنطقة[54].

3.3.2. الجمهورية الجزائرية الديموقراطية الشعبية

تخطو **الجمهورية الجزائرية الديموقراطية الشعبية** خطوات متسارعة وثابتة في مجال إنتاج الميثانول منخفض الكربون، من خلال مشروع شراكة صناعية استراتيجية مع جمهورية أذربيجان لإقامة مصنع متكامل لإنتاج الميثانول الأزرق. يأتي هذا المشروع في إطار التعاون الصناعي العربي-الآسيوي، مستهدفًا تحقيق قيمة مضافة للصناعة البتروكيماوية في المنطقة، مع مراعاة الالتزام بالمعايير البيئية وتقليل الانبعاثات الكربونية .ومن المتوقع أن تصل الطاقة الإنتاجية إلى نحو **1 مليون طن سنويًا** من الميثانول الأزرق .

تجري حاليًا مراحل التحضير للدراسات التفصيلية والتقييم الفني والبيئي للمشروع، تمهيدًا لبدء التنفيذ الفعلي خلال الفترة الزمنية الممتدة بين عامي **2026-2028** .ويُعد هذا المشروع جزءًا من خطة شاملة لتطوير قطاع البتروكيماويات في الجزائر، مع التركيز على استدامة العمليات الصناعية وتعزيز المساهمة في الاقتصاد الوطني عبر تحويل الغاز الطبيعي إلى منتجات ذات قيمة مضافة منخفضة الانبعاثات[55].

وعلى جانب الميثانول الأخضر، تدرس الجمهورية الجزائرية الديموقراطية الشعبية دمج مصادر الطاقة المتجددة "وخاصة مشاريع الطاقة الشمسية والرياح" لتشغيل مصانع إنتاج الميثانول عبر الهيدروجين الأخضر. وقد أبرمت **شركة سوناطراك** اتفاقية دراسة جدوى مع شركة

[54] Bapco energies, Transition Finance Framework 2023.
[55] Argus, North America embracing blue methanol and its challenges Low-carbon fossil methanol is one of several pathways and technologies available to achieve a reduction in carbon intensity.

CEPSA لإسبانية وشركاء أوروبيين آخرين لبناء منشآت توليد الهيدروجين الأخضر ومشتقاته، ومنها الميثانول الأخضر، لتصديره إلى الأسواق الأوروبية ضمن مبادرة [56] **$SouthH_2$ Corridor**. ويأتي ذلك في سياق استراتيجية جزائرية أوسع لرفع حصة الطاقة المتجددة إلى **30 % بحلول 2035**، وبناء قدرات إنتاج هيدروجين سنوية تصل إلى **10 جيجا واط**.[57]

4.3.2. المملكة العربية السعودية

تُعد المملكة العربية السعودية من الدول الرائدة إقليميًا في تطوير مشروعات الميثانول منخفض الكربون، في إطار رؤية استراتيجية شاملة تهدف إلى تحقيق الحياد الكربوني بحلول عام 2060، وتعزيز الاقتصاد الأخضر في ظل "رؤية 2030". وتجمع المملكة بين استثمارها الأمثل لمواردها الطبيعية الغنية، وبنيتها التحتية الصناعية المتطورة، واعتمادها على أحدث التقنيات العالمية، لتأمين إنتاج مستدام من الوقود النظيف، بما ينسجم مع متطلبات التحول العالمي نحو اقتصاد منخفض الانبعاثات[58] .

وفي هذا الإطار، شرعت المملكة في تنفيذ حزمة من المبادرات الطموحة لإنتاج الميثانول الأزرق، مستندة إلى تطبيق تقنيات احتجاز واستخدام الكربون. ففي سبتمبر 2024، أطلقت شركة **سابك** أولى محافظها من الميثانول منخفض الكربون، والذي يتم إنتاجه من خلال إعادة استخدام ثاني أكسيد الكربون المُلتقط من العمليات الصناعية كمادة أولية بديلة عن الغاز الطبيعي، مما أدى إلى خفض البصمة الكربونية للمنتج بنسبة تصل إلى 40%. وتُنتج هذه النوعية في مرافق سابك المشتركة في الجبيل وينبع، بطاقة سنوية تبلغ نحو 1.5 مليون طن، وباستثمارات تُقدّر بـ 1.2 مليار دولار أمريكي، ما يشكل نقطة تحول محورية في مسار الاستدامة الصناعية في المملكة[59].

56 Cepsa and Sonatrach join forces on green hydrogen supply from Algeria to Europe,2024.

57 https://www.algeriainvest.com/premium-news/lalgerie-futur-geant-de-lhydrogene-vert?utm_source=chatgpt.com

[58] رؤية السعودية 2030 – وزارة الطاقة السعودية vision2030.gov.sa :
تقرير وكالة الطاقة الدولية (IEA) حول استراتيجيات الطاقة السعودية iea.org.2024

[59] (سابك) تُطلق باقة كيماويات معتمدة منخفضة الكربون تُسهِم في تقليص البصمة الكربونية، 2024.

وبالتوازي، طوّرت شركة أرامكو، بالتعاون مع الشركة الدنماركية **Topsoe** ، وحدة منخفضة الكربون في محطة شايباه الصحراوية، تعتمد على تقنية **eREACT™** لإنتاج الهيدروجين الأزرق مع احتجاز ثاني أكسيد الكربون أثناء العملية. وتُعد هذه الوحدة ركيزة مستقبلية لإنتاج مشتقات صناعية مثل الميثانول الأزرق أو الأمونيا منخفضة الانبعاثات، ما يعزز من تكامل سلاسل القيمة ضمن نموذج الاقتصاد الدائري للكربون[60]. .

أما على مستوى الميثانول الأخضر، فتواصل المملكة توسعها في هذا المسار الواعد من خلال مشروعات نوعية تعتمد على الطاقة المتجددة. ففي منطقة **نيوم**، يجري تنفيذ مشروع تجريبي مشترك بين أرامكو وشركة **ENOWA** لإنتاج الهيدروجين الأخضر بقدرة 20 ميغاواط من مصادر شمسية ورياح، ليُدمج لاحقًا مع ثاني أكسيد الكربون لإنتاج نحو 12 طنًا يوميًا من الميثانول الأخضر. ويُحوّل هذا الميثانول باستخدام تقنية MTG التي طوّرتها شركة **ExxonMobil** إلى قرابة 35 برميلًا يوميًا من الغازولين الاصطناعي، في أول تجربة سعودية من نوعها في هذا المجال.

كما يجري تنفيذ المرحلة الأولى من مشروع **Helios** الضخم، بقدرة إنتاجية 4 جيجاواط، والهادف إلى توليد الهيدروجين الأخضر لاستخدامه في إنتاج مشتقات نظيفة كالميثانول والأمونيا، مما يعزز من فرص المملكة في تلبية الطلب المتزايد على وقود منخفض الكربون في الأسواق الأوروبية والآسيوية.

ويمتد هذا التوجه إلى المجال الأكاديمي والبحثي، حيث أطلقت جامعة الملك فهد للبترول والمعادن مشروعًا بحثيًا لتطوير تقنيات تحويل الميثانول إلى منتجات صناعية عالية القيمة دون انبعاثات كربونية، في خطوة تدعم تأسيس منظومة سعودية متكاملة لإنتاج الميثانول الأخضر استنادًا إلى الهيدروجين النظيف والابتكار المحلي.

في المقابل، لا تزال بعض المنشآت الصناعية تعتمد في عملياتها على الغاز الطبيعي، مثل منشآت شركة **Chemanol** في مدينة الجبيل الصناعية، التي رفعت قدرتها الإنتاجية إلى نحو مليون طن سنويًا. إلا أن هذه المنشآت تملك بنية تحتية مرنة تتيح التحول التدريجي نحو إنتاج ميثانول منخفض الكربون، خاصة في ظل الشراكات طويلة الأمد التي تربطها بشركات مثل **Amiral** و **Air**

[60] Topsoe and Aramco sign Joint Development Agreement to advance low-carbon hydrogen solutions using eREACT™,2024.

Products، والتي قد تُسهم مستقبلًا في دمج مسارات الإنتاج التقليدي بأنظمة مستدامة قائمة على احتجاز الكربون أو استخدام الهيدروجين النظيف.

تعكس هذه المبادرات مجتمعة تحولًا جوهريًا في سياسة الطاقة السعودية، يستند إلى رؤية بعيدة المدى لفهم ديناميكيات الأسواق العالمية، ويُعبر عن جاهزية المملكة للمنافسة في سوق الطاقة المستدامة. كما تُسهم القدرات اللوجستية المتطورة، والموقع الجغرافي الاستراتيجي، والموارد الطبيعية الوفيرة، إلى جانب الاستثمارات الضخمة في البحث والتطوير، في ترسيخ موقع المملكة كقوة صاعدة في مجال الميثانول منخفض الكربون، سواء الأزرق أو الأخضر، خلال العقود المقبلة، وتعزيز مكانتها كقائد إقليمي وعالمي في صناعة الوقود النظيف.

5.3.2. الجمهورية العراقية

على الرغم من عدم إطلاق مشاريع معلنة لإنتاج الميثانول الأخضر أو الأزرق حتى الآن في العراق، إلا أن التوجهات الجارية في مجال الطاقة تشير إلى أرضية واعدة لهذا التحول .فالجهود الحالية تتركز بشكل واضح على تطوير البنية التحتية اللازمة لإنتاج الهيدروجين الأخضر والأزرق، بالتوازي مع التوسع في مشاريع الطاقة المتجددة، لا سيما الطاقة الشمسية، باعتبارها مكوِّنًا أساسيًا في سلسلة القيمة لإنتاج الميثانول منخفض الكربون. ويدعم هذا التوجه عدد من الدراسات العلمية التي تدعو إلى إعداد خارطة طريق تقنية واقتصادية متكاملة، تتضمن تحديد الأولويات الوطنية، وبناء إطار تنظيمي محفّز، واستقطاب الاستثمارات، إلى جانب تطوير الشراكات الدولية لضمان نقل التكنولوجيا وتوطينها. ويُعد هذا المسار التمهيدي خطوة حاسمة لوضع الأسس الصناعية والتشريعية التي تتيح لاحقًا إطلاق مشاريع مستدامة لإنتاج الوقود النظيف، ومن بينها الميثانول منخفض الكربون، كجزء من رؤية العراق للتحول الطاقي وتعزيز تنويع مصادر الدخل.

6.3.2. دولة قطر

تمتلك دولة قطر بنية تحتية صناعية متطورة وخبرة طويلة في مجال إنتاج الميثانول التقليدي، مما يؤهلها لتكون لاعبًا مهمًا في سوق الكيماويات الإقليمية والعالمية. ورغم عدم الإعلان حتى الآن عن مشاريع مخصصة لإنتاج الميثانول الأخضر أو الأزرق، فإن قطر تملك مقومات قوية

تؤهلها لدخول هذا المجال الحيوي في المستقبل القريب، خصوصًا مع ازدياد الطلب العالمي على الوقود النظيف والحلول الكيميائية المستدامة.

وفي سياق تعزيز الاستدامة البيئية، تبنت شركات قطرية مثل شركة قطر للمواد المضافة للوقود المحدودة **(QAFAC)** تقنيات مبتكرة في استعادة ثاني أكسيد الكربون. حيث أنشأت الشركة محطات متخصصة لاستخلاص ثاني أكسيد الكربون من غازات الاحتراق الناتجة عن عملياتها الصناعية، ومن ثم تقوم بإعادة حقنه ضمن دورة إنتاج الميثانول[61]. تسهم هذه العمليات في تقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، بالإضافة إلى تحسين كفاءة استهلاك الموارد الأساسية مثل المياه، وهو ما يدعم توجهات قطر نحو تعزيز استدامة وكفاءة الإنتاج الصناعي[62].

على الرغم من أن هذه الإجراءات لا ترتقي بعد إلى إنتاج ميثانول أخضر أو أزرق بالكامل، إلا أنها تشكل خطوات أولى مهمة على طريق التحول نحو اقتصاد كيميائي منخفض الكربون. وتبقى قطر مرشحة بقوة لتطوير مشاريع متكاملة للميثانول منخفض الانبعاثات في المستقبل، مستفيدة من خبراتها الصناعية الواسعة، ومواردها الهيدروكربونية الغنية، وبنيتها التحتية المتقدمة، إلى جانب دعمها الاستراتيجي للتحول نحو الطاقة النظيفة ضمن خطط التنمية الوطنية.

7.3.2. دولة الكويت

رغم غياب مشاريع إنتاج الميثانول الأخضر أو الأزرق المباشرة في الكويت حتى الآن، فإن الدولة تبذل جهودًا مكثفة لتطوير البنية التحتية للطاقة المتجددة والهيدروجين منخفض الانبعاثات. وقد أبرمت **شركة نفط الكويت** عقد استشاري مع شركة **KBR** لتطوير خطة وطنية تتضمن إنتاج 25 غيغا واط من الهيدروجين الأخضر و17 غيغا واط من الطاقة المتجددة بحلول عام 2050، عبر وضع استراتيجية متدرجة للطاقة الشمسية والرياح وربطها بخطط إنتاج الهيدروجين الأخضر للاستخدام المحلي والتصدير[63].

[61] Methanol fuel, **Qatar Petrochemicals Expansion Upgraded.**
[62] QAFAC: Carbon dioxide recovery plant
[63] KBR to support Kuwait's 25GW green hydrogen 'masterplan 'By Laity. On Aug 26, 2024

ويأتي هذا ضمن مساعي الكويت لتحقيق هدف الاستقلال الطاقي ومواجهة نقص الكهرباء، حيث تعهدت شركة نفط الكويت بتقليل حرق الغاز المصاحب إلى الصفر بحلول عام 2030، وهو ما يعزز فرص تطبيق تقنيات احتجاز الكربون لاستخداماته في إنتاج الميثانول الأزرق مستقبلًا.

وفي هذا السياق، أظهرت دراسة فنية حديثة[64] اهتمام الكويت المتزايد بإمكانات إنتاج الهيدروجين الأخضر من طاقة الرياح، حيث قامت بتقييم جدوى هذا التوجه في ثلاثة مواقع مرشحة داخل البلاد، من حيث الموارد الطبيعية وكفاءة الإنتاج. ويعكس هذا التقييم التوجه الاستراتيجي نحو تهيئة بيئة تقنية وتشريعية متكاملة تُمهّد الطريق لتطبيقات الطاقة النظيفة.

تندرج هذه الدراسة ضمن جهود معهد الكويت للأبحاث العلمية(KISR) ، بالتعاون مع الجهات الحكومية، لوضع خارطة طريق وطنية تهدف إلى تعزيز قدرات الطاقة المتجددة، وبناء البنية التحتية اللازمة، وتوفير الإطار التنظيمي الجاذب للاستثمارات في مجال الهيدروجين الأخضر. ويمثل هذا التوجه خطوة تأسيسية مهمة نحو الانخراط المستقبلي في إنتاج الميثانول الأخضر، بما يدعم طموحات الكويت في التحول إلى اقتصاد منخفض الكربون.

8.3.2. جمهورية مصر العربية

تواصل جمهورية مصر العربية جهودها الحثيثة لتعزيز التحول نحو اقتصاد منخفض الكربون، من خلال تنفيذ سلسلة من المشروعات الحيوية في مجال إنتاج وتصدير الوقود النظيف، وعلى رأسها الميثانول الأخضر ومشتقاته. تأتي هذه الخطوات ضمن استراتيجية الدولة لتعزيز مكانتها كمركز إقليمي للطاقة النظيفة في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، ودعم تحقيق أهداف التنمية المستدامة ورؤية مصر 2030.

يُجرى حالياً تنفيذ مشروع رئيسي في المنطقة الاقتصادية لقناة السويس لإنتاج مشتقات الميثانول منخفضة الكربون بطاقة إنتاجية تصل إلى 45 ألف طن سنويًا، باستثمار يقدر بحوالي 70 مليون دولار، ويُتوقع بدء التشغيل التجاري في عام 2026. يهدف المشروع إلى تقليل البصمة الكربونية في قطاع البتروكيماويات، وتطبيق أفضل معايير الاستدامة الصناعية، مستفيدًا من الموارد المحلية وأحدث التقنيات لخفض الانبعاثات.

[64] Technical assessment of green hydrogen production in Kuwait, International Journal of Hydrogen Energy,2025.

وفي خطوة استراتيجية، وقعت مجموعة موانئ أبو ظبي اتفاقية تعاون مع شركة ترانسمار المتخصصة في الشحن البحري، إلى جانب شركة أوراسكوم كونستراكشون، لدراسة تطوير منشأة مخصصة لتخزين وتصدير الميثانول الأخضر في منطقة قناة السويس. يُقدر حجم استثمار المرحلة الأولى بحوالي 100 مليون دولار، مع استهداف بدء التشغيل بين 2027 -2028، لدعم قطاع النقل البحري بالوقود منخفض الكربون والمساهمة في التحول العالمي للطاقة النظيفة.

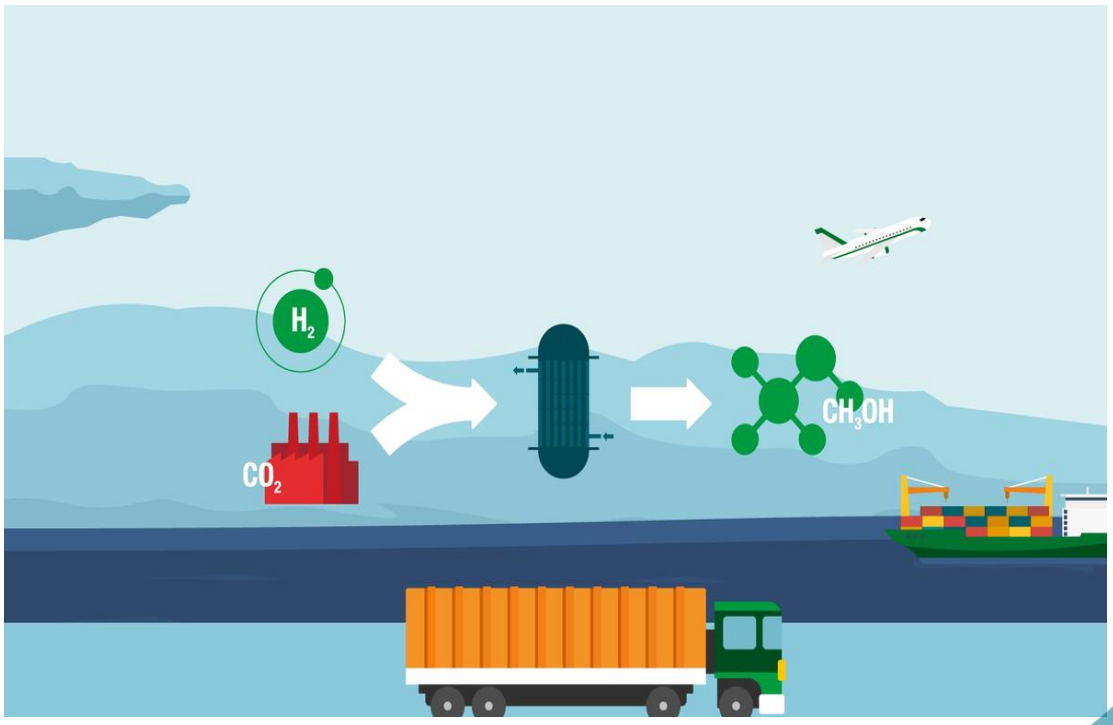
وفي أغسطس 2023، نجحت مصر في تزويد أول سفينة حاويات بالميثانول الأخضر في ميناء شرق بورسعيد، لتكون أول دولة في الشرق الأوسط وأفريقيا تقدم هذه الخدمة. تم تزويد السفينة بكمية 500 طن خلال نحو 6 ساعات، وهي أعلى كمية مقارنة بمحطات التموين في كوريا الجنوبية وسنغافورة، مما يعكس مكانة مصر الاستراتيجية كمركز إقليمي لتموين السفن بالوقود الأخضر وتوطين صناعة الوقود المستدام.

تدرس الهيئة الاقتصادية لقناة السويس حالياً توسيع هذه الخدمة بمنح شركة **OCI** العالمية رخصة لتقديم تموين السفن بالميثانول الأخضر في البحر المتوسط. السفينة التي تم تزويدها تنتمي إلى أسطول شركة "ميرسك" العالمية، وتُعد من أوائل السفن العاملة بالميثانول الأخضر عالميًا، وقد عبرت قناة السويس خلال رحلتها من كوريا الجنوبية إلى أوروبا، مما يؤكد أهمية الموقع الاستراتيجي لمصر في دعم التحول العالمي نحو الطاقة النظيفة.

على صعيد الإنتاج، يبرز مشروع ميناء دمياط لإنتاج الميثانول الأخضر باستخدام الهيدروجين الأخضر وثاني أكسيد الكربون الملتقط من مصادر صناعية، بطاقة 40 ألف طن سنويًا في مرحلته الأولى، مع خطط لزيادة الإنتاج إلى 200 ألف طن خلال خمس سنوات، بتكلفة رأسمالية حوالي 120 مليون دولار. يُعد المشروع من أوائل المبادرات العربية الداعمة للنقل البحري المستدام، وينفذ بالشراكة مع شركات دولية.

تجسد هذه المشروعات الطموحة روح التحول الطاقي في مصر، وتعكس التنسيق والتكامل بين القطاعين العام والخاص والشركاء الدوليين، لتأمين مستقبل نظيف ومستدام يتوافق مع التطورات العالمية في مجالات الطاقة والبيئة.

منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)



الفصل الثالث:

دور السياسات والتقنيات في تعزيز استخدام الميثانول منخفض الكربون في قطاعي النقل والصناعة

الفصل الثالث

دور السياسات والتقنيات في تعزيز استخدام الميثانول منخفض الكربون في قطاعي النقل والصناعة

مقدمة

في ظل التوجه العالمي المتسارع نحو خفض الانبعاثات وتحقيق أهداف الاستدامة، باتت السياسات البيئية المتكاملة والتقنيات النظيفة ركيزتين أساسيتين في التحول نحو اقتصاد منخفض الكربون. وقد أسهمت المبادرات الدولية، إلى جانب الأطر التشريعية والتقدم التكنولوجي، في تسريع وتيرة اعتماد مصادر الطاقة النظيفة وتطبيق حلول متقدمة لخفض الانبعاثات، لا سيما في القطاعات ذات البصمة الكربونية العالية، كالنقل البحري والصناعات الثقيلة.

وفي هذا السياق، يبرز الميثانول منخفض الكربون كأحد الحلول الواعدة القادرة على إحداث نقلة نوعية في قطاع النقل البحري، بفضل خصائصه التشغيلية والبيئية المتميزة. إذ يمكن إنتاجه من مصادر متجددة أو من خلال تقنيات احتجاز الكربون وتخزينه ، كما أن توافقه مع البنية التحتية الحالية لعمليات التخزين والنقل يمنحه ميزة تنافسية مقارنة ببدائل مثل الأمونيا أو الهيدروجين السائل، والتي تتطلب استثمارات إضافية على مستوى البنية التحتية والأمان التشغيلي.

وقد ازداد الاهتمام العالمي بالميثانول كوقود بديل نظيف في النقل البحري، لما يتمتع به من قدرة على خفض انبعاثات ملوثات الهواء التقليدية، مثل أكاسيد الكبريت والنيتروجين والجسيمات الدقيقة، مع إمكانية تشغيل المحركات عليه دون الحاجة إلى تعديلات جذرية، ما يقلل من التكلفة الإجمالية للتحول. ويتسق هذا التوجه مع الالتزامات البيئية الدولية، وفي مقدمتها اتفاقية ماربول التي فرضت قيودًا صارمة على انبعاثات السفن، الأمر الذي يعزز من مكانة الميثانول كأحد الخيارات التقنية القابلة للتطبيق والجدوى ضمن خارطة الوقود البحري المستدام.

في قطاع النقل البري، ساهمت المعايير البيئية الأوروبية المتقدمة، مثل **Euro 6** و**Euro 7**، في رسم ملامح مرحلة جديدة من التشريعات التي تُلزم الشركات المصنّعة للمركبات بتقليل الانبعاثات الضارة وتعزيز كفاءة المحركات. وقد دفعت هذه المعايير إلى تبني تقنيات متطورة مثل مرشحات جسيمات الديزل **Diesel Particulate Filter – DPF**، وأنظمة إعادة تدوير غازات العادم **Exhaust**

Gas Recirculation – EGR ، وأنظمة التحفيز الانتقائي للحد من أكاسيد النيتروجين Selective **Catalytic Reduction – SCR** ، بهدف تقليص انبعاثات الجسيمات الصلبة وأكاسيد النيتروجين، التي تُعد من بين أكثر ملوثات الهواء تأثيرًا على الصحة العامة والبيئة.

وفي هذا الإطار، برز الميثانول كوقود بديل واعد يتماشى مع الاتجاهات التنظيمية العالمية، حيث يتمتع بخصائص احتراق أنظف، ويُنتج كميات أقل من الملوثات عند مقارنته بالوقود التقليدي. ويمكن استخدام الميثانول بعدة طرق في قطاع النقل البري، منها مزجه بنسب مختلفة مع الغازولين **Gasoline Blending** لتقليل الانبعاثات دون الحاجة إلى تعديلات كبيرة على المحركات، كما يمكن استخدام الميثانول كوقود تام **Neat Methanol** في محركات مخصصة أو معدّلة، وهي تقنية أثبتت فعاليتها في عدد من المشاريع النموذجية حول العالم. أو تحويله إلى وقود اصطناعي عبر تقنية تحويل الميثانول إلى غازولين **Methanol-to-Gasoline – MTG** .

وقد بدأت عدة دول بالفعل في اختبار واعتماد حلول قائمة على الميثانول في النقل البري. فعلى سبيل المثال، أطلقت الصين برنامجًا واسع النطاق لاستخدام الميثانول في أسطول مركباتها، مما أسهم في تقليل مستويات التلوث المحلي.

في قطاع النقل الجوي، بدأت التشريعات البيئية تأخذ أبعادًا أكثر تطورًا وصرامة، في إطار الجهود العالمية للحد من الانبعاثات الكربونية في هذا القطاع عالي الاستهلاك للطاقة. ويُعد برنامج **(Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation)** التابع لمنظمة الطيران المدني الدولي **(ICAO)**، أحد أبرز الآليات التنظيمية، حيث يهدف إلى تعويض الانبعاثات الناتجة عن الرحلات الدولية، من خلال إجراءات تشمل تحسين الكفاءة، واعتماد أنواع وقود منخفضة الكربون، وآليات تعويض الكربون.

كما أطلقت المفوضية الأوروبية مبادرة **ReFuelEU Aviation**، التي تلزم مشغلي الطيران بزيادة نسب استخدام وقود الطيران المستدام **(Sustainable Aviation Fuel - SAF)** تدريجيًا، بما يعكس التحول الاستراتيجي نحو إزالة الكربون من الطيران المدني.

ورغم أن الميثانول لا يُستخدم حاليًا كوقود مباشر للطائرات بسبب اعتبارات الكثافة الطاقية والسلامة الجوية، إلا أنه يُعد مادة وسيطة مهمة في إنتاج الوقود الاصطناعي للطيران، خصوصًا ضمن مسارات التحويل الكيميائي التي تبدأ بثاني أكسيد الكربون والهيدروجين الأخضر وتنتج

الميثانول، الذي يتم تحويله لاحقًا إلى كيروسين اصطناعي عبر عمليات **Fischer-Tropsch** أو غيرها. هذه الخاصية تعزز من مكانة الميثانول كحل مستقبلي واعد لدعم استدامة قطاع الطيران، ضمن منظومة الوقود الاصطناعي المستدام.

تشغيليًا، يتميز الميثانول بنسبة أكسجين مرتفعة في بنيته الكيميائية، مما يُسهم في احتراق أنظف ويؤدي إلى خفض كبير في انبعاثات أول أكسيد الكربون والهيدروكربونات غير المحترقة، مع تحقيق أداء مقبول في التطبيقات التي تم تعديلها خصيصًا. إلا أن بعض التحديات ما تزال قائمة، وعلى رأسها انخفاض الكثافة الطاقية للميثانول مقارنة بالوقود الأحفوري التقليدي، الأمر الذي يتطلب كميات أكبر لتحقيق ذات الأداء، إضافةً إلى الحاجة لتطوير المحركات والأنظمة المساندة لتعزيز الكفاءة التشغيلية وتوسيع نطاق الاستخدام.

بعيدًا عن قطاع النقل، يُعد الميثانول عنصرًا محوريًا في صناعة البتروكيماويات، حيث يُستخدم كمادة وسطية لإنتاج مجموعة واسعة من المركبات، أبرزها **الأوليفينات** مثل الإيثيلين والبروبيلين، وذلك عبر تقنية **الميثانول إلى أوليفينات (Methanol-to-Olefins - MTO)**، وهي تقنية متقدمة تسمح بإنتاج مواد أساسية للبلاستيك والألياف الصناعية. كما يدخل الميثانول في تصنيع مركبات كيميائية مهمة مثل **حمض الخليك** و**الفورمالديهايد**، والتي تُستخدم في صناعات الراتنجات، والمواد اللاصقة، والمذيبات، ومواد البناء، مما يوسّع من نطاق تطبيقاته الاقتصادية والصناعية.

وعليه، يُمثّل الميثانول منخفض الكربون خيارًا استراتيجيًا مرنًا لتعزيز الاستدامة في قطاعات النقل والصناعة على حد سواء، حيث يجمع بين الجدوى التقنية، والقابلية للتكامل مع البنية التحتية القائمة، والدور المتنامي في الاقتصاد الدائري للطاقة والمواد.

1.3. دور السياسات البيئية والمبادرات الدولية في تعزيز استخدام الوقود منخفض الكربون

شهدت السياسات المناخية والطاقوية العالمية تطورًا متسارعًا منذ أواخر التسعينيات، مع تنامي الوعي الدولي بأهمية التصدي لتغير المناخ والحد من الانبعاثات. ولم تعد الاستدامة البيئية مجرد خيار تنظيمي أو توجه طوعي، بل تحوّلت إلى عنصر جوهري في صياغة السياسات العامة، لما لها من ارتباط مباشر بأمن الطاقة، والاستقرار الاقتصادي، والصحة العامة. وقد أفضى ذلك إلى إعادة

ترتيب الأولويات على المستويين الوطني والدولي، استنادًا إلى مفاهيم الاقتصاد منخفض الكربون وكفاءة استخدام الموارد .

وفي السنوات الأخيرة، ارتفعت مكانة الوقود الحيوي، ومنه الميثانول الحيوي، في مزيج الطاقة المستقبلي، لاعتباره خيارًا بيئيًا استراتيجيًا يسهم في تقليل الانبعاثات وتعزيز أمن الطاقة. ووفقًا لوكالة حماية البيئة الأمريكية **EPA** ، فإن بعض أنواع الوقود الحيوي مثل الميثانول الحيوي والديزل الحيوي يمكن أن تُخفض انبعاثات غازات الدفيئة بنسبة تتراوح بين 50-60% لكل وحدة طاقة مقارنة بالوقود الأحفوري، عند احتساب دورة الحياة الكاملة للوقود، من الإنتاج وصولًا إلى الاستهلاك .

وقد أصبح الوقود الحيوي محورًا مركزيًا في استراتيجيات الطاقة الوطنية، ليس فقط في الدول المتقدمة، بل أيضًا في الدول النامية الساعية إلى تعزيز أمن الطاقة وتحقيق أهداف التنمية المستدامة. وتشير بيانات الوكالة الدولية للطاقة **(IEA)** إلى أن أكثر من 80 دولة حول العالم صاغت سياسات داعمة للوقود الحيوي، سواء من خلال دعم مالي مباشر أو تشريعات تلزم بخلطه بنسب محددة مع الوقود التقليدي .وبالفعل، سجل الطلب العالمي على الوقود الحيوي نموًا بأكثر من 11% خلال عام 2024، في دلالة واضحة على التحول السريع نحو هذه الطاقة كركيزة أساسية في المستقبل الطاقي.

هذا التحول تناغم مع تطور الأطر القانونية الدولية في مجال المناخ، بدأ ببروتوكول **كيوتو** في عام 1997، الذي فرض التزامات قانونية على الدول الصناعية للحد من الانبعاثات، وصولًا إلى **اتفاق باريس للمناخ** في عام 2015، والذي أرسى هدفًا طموحًا لعدم تجاوز الاحترار العالمي 2°م والسعي لتخفيضه إلى 1.5°م، مشجعًا بذلك الدول على تعديل مساهماتها الوطنية المحددة **(NDCs)** وتبني مفهوم الاقتصاد منخفض الكربون عبر دعم الطاقة المتجددة وتوسيع استخدام الوقود النظيف منخفض الكربون

وعلى الصعيد العالمي، برزت الولايات المتحدة الامريكية كنموذج تشريعي رائد في مجال دعم الوقود الحيوي من خلال مسارات تنظيمية متقدمة عززت مكانة الطاقة المتجددة في مزيج الطاقة الوطني. حيث تم إقرار قانون سياسة الطاقة عام 1992، تلاه في 2005 إطلاق "معيار الوقود

المتجدد " **Renewable Fuel Standard – RFS** ، الذي يلزم منتجي وموزّعي الوقود في الولايات المتحدة بخلط نسب متزايدة من الوقود المتجدد.

وفي كندا، أُطلق عام 2020 برنامج "معيار الوقود النظيف"، بهدف تخفيض كثافة الكربون في الوقود الاحفوري من خلال دمج بدائل منخفضة الانبعاثات مثل الميثانول، الإيثانول، والديزل الحيوي، مع سقف لاستهداف خفض سنوي بقيمة 30مليون طن من انبعاثات غازات الدفيئة بحلول عام 2030.

على مستوى دول الاتحاد الأوروبي، أثبتت السنوات تطورًا تشريعيًا ملحوظًا، بدءًا من توجيه الاتحاد الأوروبي رقم **EC/30/2003** ، والصادر في عام 2003، بشأن تعزيز استخدام الوقود الحيوي في قطاع النقل ، مرورًا بإصدار بالتوجيه الأول للطاقة المتجددة **RED I** في عام 2009، والذي وضع هدفًا ملزمًا باستخدام نسبة 10% من الطاقة المتجددة في قطاع النقل بحلول 2020، وصولًا إلى التوجيه الثاني للطاقة المتجددة **RED II**، الصادر في 2018، الذي رفع الحصة الإجمالية للطاقة المتجددة من مجمل مزيج الطاقة إلى 32% بحلول 2030، ورفع نسبة الطاقة المتجددة المستخدمة في قطاع النقل إلى 14% وأخيرًا، تم إصدار التوجيه الثالث للطاقة المتجددة **RED III** في عام 2023، ضمن حزمة الصفقة الخضراء الأوروبية **Green Deal** ، حيث رفعت نسبة الطاقة المتجددة من مجمل مزيج الطاقة إلى **42.5%** بحلول 2030، مع خيار تضمين استخدام الطاقة المتجددة في قطاع النقل بنسبة 29% أو تحقيق خفض كثافة الكربون بنسبة 14.5% على الأقل بحلول نفس العام.

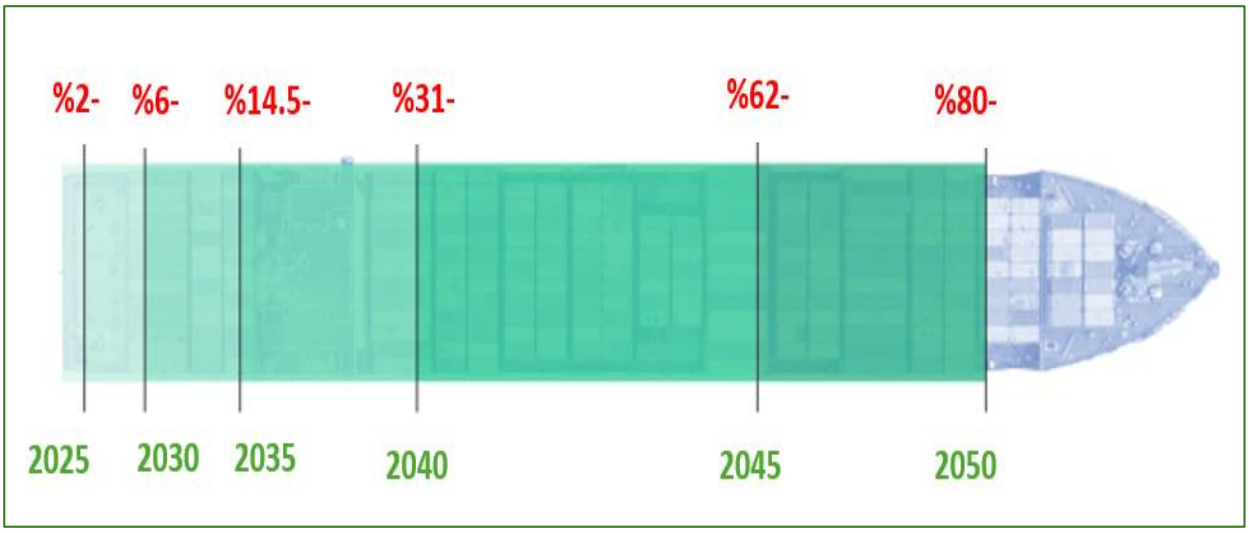
1.1.3. دور السياسات البيئية نحو تعزيز استخدام الميثانول كوقود بحري

في ظل تنامي الجهود الدولية الهادفة إلى تسريع إزالة الكربون من قطاع الشحن البحري، بات هذا القطاع في صلب السياسات البيئية والاستراتيجيات المناخية العالمية، نظرًا لدوره المحوري في حجم الانبعاثات المرتبطة بالنقل البحري العالمي. وفي استجابة مباشرة لهذا التحدي، أطلقت المنظمة البحرية الدولية (**IMO**) في عام 2018 استراتيجية طموحة وشاملة تستهدف خفض كثافة انبعاثات غازات الدفيئة الناتجة عن استهلاك الطاقة في السفن، وذلك من خلال نهج تدريجي يسعى إلى تقليل الأثر الكربوني لهذا القطاع الحيوي. وتسعى هذه الاستراتيجية إلى تقليص الانبعاثات بنسبة

2% بنهاية عام **2025**، مع التوسع التدريجي للوصول إلى **خفض يقارب 80% بحلول عام 2050**، مقارنة بمستويات عام 2008 المعتمدة كخط أساس. ويأتي هذا التوجه ضمن إطار أوسع لتعزيز الاعتماد على **وقود بحري منخفض الكربون**، وفي مقدمته **الميثانول**، لما يمتاز به من خصائص تشغيلية وبيئية ملائمة للسفن، بالإضافة إلى إمكانية دمجه ضمن منظومة الوقود البحري دون الحاجة إلى تغييرات جذرية في البنية التحتية. **يبين الشكل (3-1)** أهداف الاتحاد الأوروبي لخفض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري في قطاع النقل البحري في ظل استراتيجية المنظمة البحرية الدولية 2018.

الشكل (3-1)

أهداف الاتحاد الأوروبي لخفض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري في قطاع النقل البحري في ظل استراتيجية المنظمة البحرية الدولية 2018



المصدر: Decarbonizing maritime transport – FuelEU Maritime

وقد تعزز هذا التوجه في عام **2020**، عندما أعلنت المنظمة هدفًا إضافيًا يتمثل في خفض إجمالي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنسبة **50%** بحلول عام 2050 مقارنة بمستويات عام 2008، مما يعكس التزامًا واضحًا نحو تحويل قطاع النقل البحري إلى نموذج مستدام بيئيًا.

وساهمت السياسات الأوروبية الحديثة بشكل كبير في دعم هذا التوجه، حيث أقرّ الاتحاد الأوروبي **لائحة FuelEU Maritime** ضمن الحزمة التشريعية الطموحة **Fit for 55**[65] . وتتميز هذه

[65] "Fit for 55" هي حزمة تشريعية أطلقها الاتحاد الأوروبي ضمن إطار "الاتفاق الأخضر الأوروبي"، وتهدف إلى خفض صافي انبعاثات غازات الدفيئة بنسبة 55% على الأقل بحلول عام 2030 مقارنة بمستويات عام 1990، تمهيدًا لتحقيق الحياد الكربوني بحلول 2050. وتشمل الحزمة مجموعة من السياسات تغطي قطاعات الطاقة والنقل

اللائحة باعتماد نهج قائم على النتائج البيئية، يركّز على تقليل الانبعاثات الفعلية بدلًا من فرض استخدام تكنولوجيا أو نوع وقود محدد، مما يمنح السفن مرونة أكبر في اختيار الحلول الأكثر كفاءة من حيث التشغيل والتكلفة.

وعلى مستوى التطبيق، تُلزم لائحة **FuelEU Maritime** السفن التي تتجاوز حمولتها 5آلاف طن، عند دخولها أو مغادرتها موانئ المنطقة الاقتصادية الأوروبية، بتقديم تقارير دقيقة حول انبعاثاتها من جميع غازات الدفيئة. وقد ساهم هذا الإطار التنظيمي المرن في تهيئة الظروف الملائمة لتوسيع استخدام الميثانول كوقود بحري في أوروبا، نظرًا لتوافقه مع البنية التحتية الحالية واحتياجه إلى تعديلات أقل مقارنة ببدائل أخرى. كما دعمت اللائحة جاذبية الميثانول من خلال آليات تحفيزية مبتكرة، مثل آلية التجميع الطوعي للأداء البيئي **(Voluntary Pooling Mechanism)**، التي تتيح لعدة سفن تجميع أدائها البيئي واحتساب الامتثال بناءً على متوسط جماعي، مما يشجع التعاون بين شركات الشحن ويُعزز تبني الحلول المستدامة.

ويأتي هذا في سياق تكامل اللائحة مع جهود أوسع للاتحاد الأوروبي، من أبرزها إدراج قطاع النقل البحري لأول مرة ضمن نظام تداول الانبعاثات الأوروبي **(EU ETS)**، الذي بدأ تطبيقه فعليًا اعتبارًا من يناير 2024[66] . ويمثل هذا الإجراء نقلة نوعية في سياسات المناخ في أوروبا، إذ باتت شركات الشحن ملزمة بشراء حصص [67] تغطي كمية ثاني أكسيد الكربون التي تطلقها سفنها فعليًا خلال رحلاتها من وإلى موانئ الاتحاد الأوروبي ، وكذلك أثناء تنقلها داخل مياهه الإقليمية. ويُعد هذا النظام خطوة محورية في مسار تسعير الكربون، من خلال تحميل الجهات المسببة للانبعاثات التكلفة البيئية الحقيقية لأنشطتها، مما يعزز التحول نحو الوقود منخفض الكربون ويدفع عجلة الابتكار في تقنيات الشحن المستدام.

والصناعة، مثل توسيع نظام تداول الانبعاثات ليشمل النقل البحري والبري، وفرض ضريبة حدودية على الكربون، وزيادة الاعتماد على الطاقة المتجددة، مع دعم الوقود النظيف في القطاعات الصعبة مثل الشحن الجوي والبحري.

[66] European Commission, Inclusion of the maritime sector in the EU Emissions Trading System (EU ETS),2023.

[67] تُشترى هذه الحصص عبر مزادات تُنظمها السلطات المختصة أو من السوق الثانوية حيث تتداول الشركات حصص الانبعاث فيما بينها. وفي نهاية كل فترة امتثال، يجب على الشركات تقديم حصص تغطي إجمالي انبعاثاتها الفعلية، وإذا كانت الانبعاثات أعلى من الحصص المملوكة، يتوجب عليها شراء حصص إضافية أو دفع غرامات. أما إذا خفضت انبعاثاتها، فيمكنها بيع الفائض من الحصص، مما يحفزها اقتصاديًا على تحسين الكفاءة وتقليل الانبعاثات.

1.1.1.3. دور تسعير انبعاثات الكربون في دعم التحول نحو شحن بحري مستدام

يبرز تسعير الكربون كإحدى أهم الآليات الاقتصادية التي يُعوَّل عليها لتسريع التحول نحو وقود أنظف وأكثر استدامة في قطاع النقل البحري. حيث يُمثل الفرق الكبير في التكلفة بين الوقود منخفض الكربون والوقود الأحفوري التقليدي عائقًا رئيسيًا أمام التوسع في استخدام البدائل ، مما يستدعي تدخلًا مباشرًا لإعادة توجيه الحوافز الاقتصادية.

تتنوع آليات تسعير الكربون التي يُطبَّق بعضها أو تُدرس عالميًا، وتشمل الضرائب المباشرة على الانبعاثات، وأنظمة تداول الانبعاثات (**ETS**)، بالإضافة إلى آلية الرسوم مع التعويض (**Feebate**) التي تُعتبر من الأدوات المتقدمة؛ حيث تُفرض رسوم على الوقود عالي الانبعاثات، ويُعاد توجيه جزء من العائدات لدعم الشركات التي تعتمد حلولًا منخفضة الكربون، مما يخلق توازنًا فعّالًا بين فرض التكلفة على الملوثين وتحفيز التحول نحو الاستدامة.

وقد أكدت دراسة صادرة عن مؤتمر الأمم المتحدة للتجارة والتنمية (الأونكتاد)، بتكليف من المنظمة البحرية الدولية عام 2024، أن فرض رسم تسعير للكربون يتراوح ما بين 150- 300 دولار أمريكي لكل طن من غاز ثاني أكسيد الكربون في قطاع الشحن، يمكن أن يحقق أثرًا إيجابيًا على المدى الطويل.

وفي سياق موازٍ، كشفت دراسة صادرة عن مركز الاستشارات البحرية بجامعة لندن (**UMAS**) لصالح تحالف الوصول إلى الصفر **Getting to Zero Coalition**[68]، أن فرض سعر للكربون قدره 191 دولارًا/طن ثاني أكسيد الكربون ابتداءً من عام 2025 يمكن أن يؤدي إلى إزالة كاملة لانبعاثات قطاع الشحن بحلول عام 2050. كما أظهرت أن فرض متوسط سعر يبلغ 96 دولارًا/ طن ثاني أكسيد الكربون سيكون كافيًا لتحقيق نفس الهدف إذا أُعيد استثمار العائدات بالكامل في دعم التحول داخل القطاع.

وتُقابل هذه الدراسات العملية مقترحات رسمية من دول وشركات كبرى، إذ اقترحت شركة **ميرسك** فرض تسعير للكربون عند 150 دولارًا/ طن ثاني أكسيد الكربون ، بينما دعت **جزر مارشال** إلى فرض رسوم تسعير للكربون بقيمة 100 دولار/ طن ثاني أكسيد الكربون.

---

[68] هو **تحالف عالمي** يهدف إلى **تسريع إزالة الكربون من قطاع الشحن البحري**، من خلال دعم وتطوير **سفن عديمة الانبعاثات** (Zero Emission Vessels) والبنية التحتية المرتبطة بها، بحيث تكون هذه السفن جاهزة للعمل على نطاق تجاري بحلول عام **2030**.

ومن الجدير بالذكر أن أدوات التسعير الاقتصادية، رغم أهميتها، لا تكفي وحدها لتحقيق التحول البيئي المنشود، بل يجب أن تُستكمل بإجراءات تنظيمية صارمة، واعتماد معايير أداء بيئية إلزامية، فضلًا عن دعم الابتكار والتمويل الأخضر. فالتكامل بين أدوات السوق والتشريعات هو الضمان الوحيد لتحقيق تحول مستدام وعادل في قطاع النقل البحري.

ومن جانب أخر، يُجسّد التوجه الأوروبي لتسعير الكربون جزءًا من حراك عالمي متسارع، حيث بدأت دول مثل سنغافورة وكوريا الجنوبية في تطوير سياسات مناخية تنص على إدراج قطاع الشحن في آليات التسعير، سواء من خلال فرض ضرائب على الانبعاثات أو من خلال تأسيس أسواق وطنية لتداول الكربون. وفي هذا الإطار، تعمل الصين على توسيع نطاق سوق الكربون الوطني تدريجيًا ليشمل قطاع النقل، ضمن خطة استراتيجية لتغطية القطاعات الأعلى انبعاثًا.

وفي هذا السياق، تُعد سنغافورة نموذجًا متقدمًا، إذ أطلقت في عام 2020 "صندوق المستقبل الأخضر البحري" بقيمة 30 مليون دولار أمريكي لدعم تطوير أنواع الوقود البحري البديل، وخاصة الميثانول الأخضر، إلى جانب تعزيز البنية التحتية لتداوله. وتمت ترجمة هذا التوجه إلى مبادرات تنفيذية، أهمها تحالف الاستدامة الساحلية(**CSA**) ، الذي يهدف إلى تطوير أسطول من السفن الكهربائية منخفضة الانبعاثات، مع خطط لاستخدام الميثانول منخفض الكربون، والتوسع الإقليمي بدءًا من عام 2027.

وتنسجم هذه الجهود مع مبادرات عالمية رائدة، أبرزها " تحالف الرواد الأوائل " (**First Movers Coalition - FMC**)، الذي أُطلق خلال مؤتمر الأطراف **COP26** في غلاسكو عام 2021، بمبادرة من المنتدى الاقتصادي العالمي ووزارة الخارجية الأمريكية. ويضم التحالف أكثر من 70 شركة كبرى تلتزم بتسريع تبني السفن الخالية من الانبعاثات، بهدف أن تُشكل 5% من حركة الشحن العالمية بحلول عام 2030، مع التوسع نحو سفن خضراء بالكامل بحلول عام 2040.

وفي ذات السياق، جاء إعلان كلايدبانك (**Clydebank Declaration**) ليُشكّل دفعة قوية لهذا التحول، بإطلاق مبادرة "ممرات الشحن الخضراء(**Green Shipping Corridors**) "، التي تربط موانئ محددة يُشغّل فيها أسطول منخفض أو عديم الانبعاثات، مدعومًا ببنية تحتية حديثة للوقود النظيف. وقد انضمت حتى الآن 24 دولة إلى هذه المبادرة، ضمن هدف طموح لخفض انبعاثات الشحن الدولي بنسبة تصل إلى 40% بحلول عام 2030.

في ضوء ما سبق، يتضح أن تسعير الكربون ليس مجرد آلية مالية، بل هو حجر زاوية في بنية السياسات المناخية العالمية المعنية بقطاع النقل البحري. وعبر دمجه في سياسات متكاملة تشمل الحوافز والاستثمار والتشريعات لتسريع التحول إلى اقتصاد بحري نظيف ومزدهر، وتعزيز اعتماد الميثانول منخفض الكربون كوقود بحري.

2.1.1.3. تكامل البنية التحتية اللوجستية مع توسع استخدام الميثانول كوقود بحري

رغم تصنيف الميثانول من قبل المنظمة البحرية الدولية ضمن فئة "الوقود الناشئ"، إلا أن التطورات اللافتة التي شهدها خلال عام 2023 تدل على تحوّله من خيار هامشي إلى عنصر رئيسي في مشهد التحول الطاقي العالمي. ويستند هذا التحول إلى وجود قاعدة إنتاجية عالمية ناضجة؛ إذ تشير البيانات إلى وجود أكثر من 90 منشأة صناعية لإنتاج الميثانول حول العالم، بطاقة إجمالية تُقدّر بنحو 120 مليون طن سنويًا، مقارنة بطلب عالمي يبلغ حوالي 100 مليون طن. ويتم تداول نحو ثلث هذا الإنتاج عبر شبكات لوجستية متطورة، مما يعكس الجاهزية العالية للبنية التحتية، ويدعم التوسع المستقبلي لاستخدام الميثانول كوقود نظيف ومرن في العديد من التطبيقات [69].

وقد انعكس هذا الزخم في توسّع ملموس على مستوى البنية التحتية العالمية، إذ أصبح بالإمكان التزود بالميثانول في أكثر من 122 ميناءً حول العالم، دون الحاجة إلى استثمارات ضخمة في منشآت جديدة. ويُعد ميناء روتردام مثالًا رائدًا في هذا المجال، حيث يُوفر تموين السفن بالميثانول مباشرة من البوارج، مما يعكس نضج المنظومة اللوجستية الداعمة لهذا الوقود الواعد.

في هذا الإطار، يُواصل الميثانول منخفض الكربون ترسيخ مكانته كأحد أكثر الوقود الانتقالية جاذبية ومرونة في مسار الحياد الكربوني في قطاع الشحن البحري، وذلك بفضل خصائصه التقنية والاقتصادية التي تُميّزه عن بدائل أخرى مثل الأمونيا والهيدروجين. فعلى خلاف هذه البدائل التي تتطلب أنظمة تبريد أو ضغط عالي وإجراءات أمان معقدة، يحتفظ الميثانول بحالته السائلة في الظروف الجوية والضغط الطبيعي، مما يُبسط بشكل كبير عمليات النقل والتخزين ويُقلل من التعقيدات التشغيلية.يبين **الشكل (3-2)** عملية تزويد السفن بالميثانول من البارجة إلى السفينة في ميناء نوتردام.

[69] Methanol Institute, *Methanol as a Marine Fuel: Ports & Bunkering Availability*, 2023

الشكل (3-2)

عملية تزويد السفن بالميثانول من البارجة إلى السفينة في ميناء روتردام

المصدر: Methanol institute, MARINE METHANOL Future-Proof Shipping Fuel,2023

ورغم أن **تكلفة تشغيل السفن باستخدام الميثانول** قد تصل إلى 15 ضعف تكلفة الديزل التقليدي، إلا أن هذه التكلفة تُعد استثمارًا طويل الأجل، لما تحققه من وفورات غير مباشرة، تشمل تقليل التكاليف البيئية، وتفادي الغرامات التنظيمية المتوقعة، وخفض التأمين على السفن غير المتوافقة بيئيًا. كما أن التوجه العالمي نحو فرض ضرائب على الكربون سيُعزز من تنافسية الميثانول منخفض الكربون على المدى البعيد.

3.1.1.3. دور الابتكار في المحركات البحرية الحديثة لتعزيز دور الميثانول كوقود بحري

تتسابق العديد من الشركات العالمية لتطوير محركات بحرية تعتمد على الميثانول كبديل واعد للوقود الأحفوري، مع تزايد مستمر في عدد السفن العاملة أو المقرر تشغيلها بالميثانول، وهو توجه يعكس الابتكار المتسارع في تقنيات الدفع البحري. وقد شكّل عام 2023 نقطة تحول مفصلية في مسيرة الميثانول كوقود، حيث وصفت تقارير متخصصة، مثل تلك الصادرة عن **Riviera Maritime Media**، الميثانول بأنه "القصة الأهم في صناعة النقل البحري". فقد تجاوز عدد السفن الجديدة العاملة بالميثانول قيد البناء 260 سفينة حول العالم، متفوقًا بذلك على السفن العاملة

بالغاز الطبيعي المسال، مما يؤكد الثقة المتزايدة في هذا الوقود كمكوّن رئيسي في مستقبل النقل البحري منخفض الانبعاثات.

على صعيد التكنولوجيا، تتوفر اليوم محركات بحرية متقدمة ثنائية ورباعية الأشواط قادرة على العمل بالميثانول، سواء عبر أنظمة أحادية الوقود أو من خلال محركات ثنائية الوقود (ديزل/ميثانول)، مما يمنح مشغلي السفن مرونة تشغيلية واسعة.

كانت شركة **MAN Energy Solutions** من رواد هذا المجال، حيث بدأت منذ عام 2016 تطوير وإنتاج محركات ثنائية الوقود أثبتت كفاءتها وموثوقيتها في الخدمة التجارية. وتتميز هذه المحركات بإمكانية استخدام الميثانول كوقود دون الحاجة إلى تعديلات هيكلية معقدة، مما يخفّض التكاليف الرأسمالية ويسهّل عملية التحول[70].

حتى الآن، تلقت الشركة أكثر من 80 طلبًا مؤكدًا لمحركات ثنائية الوقود، بالإضافة إلى نحو 120 طلبًا قيد التطوير. كما عملت الشركة على توفير حلول تحديث لمحركات رباعية الأشواط للعمل بالميثانول بدءًا من عام 2024، تشمل تعديلات في أنظمة الحقن، وحاقنات الوقود، ورؤوس الأسطوانات، مع الحفاظ على البنية الأساسية للمحرك، مما يُسرّع من وتيرة التكيّف الفني ويُقلّل من فترة التوقف عن العمل.

ويُعتبر توفر محركات الميثانول ثنائية الأشواط تطورًا محوريًا في قطاع الدفع البحري، لما تتمتع به من قوة تفوق المحركات رباعية الأشواط بنحو 1.8 مرة لنفس الوزن، إلى جانب كفاءتها العالية في استهلاك الوقود وقلة الحاجة للصيانة. استحوذت هذه الفئة من المحركات على أكثر من 50% من سوق الدفع البحري في عام 2020.

وقد أثبتت اختبارات الأداء أن المحركات ثنائية الوقود العاملة بالميثانول تُحقق مستويات عالية من الكفاءة التشغيلية ، فقد أظهرت التجارب التشغيلية لشركة **Waterfront Shipping** في **كندا** أن هذه المحركات سجلت أداءً موثوقًا خلال أكثر من 145 ألف ساعة تشغيل على متن 19 سفينة، مع تحسين نوعي في كفاءة استهلاك الوقود بنسبة **2%** مقارنة بالوقود الأحفوري التقليدي. ويعزز من موثوقيتها نظام تحكم تلقائي متطور يتيح التحويل السريع بين أنواع الوقود عند رصد

[70] Green Methanol -Sierra Sur, 63rd International Congress of Naval Architecture, Marine Technology and Maritime Industry, April,2024

تسرب بخار الميثانول أو حدوث أي خلل، بما يضمن سلامة المحرك واستمرارية التشغيل دون انقطاع. ورغم أن هذه المحركات تحتوي على عدد أكبر من المكونات مقارنة بالمحركات أحادية الوقود، ما يؤدي إلى زيادة تقديرية في تكاليف الصيانة تصل إلى نحو **7%**، فإن الميزة التنافسية الأهم تكمن في مرونتها التشغيلية. فهي تُتيح لمشغّلي السفن اختيار نوع الوقود الأنسب بحسب الأسعار وظروف التشغيل، دون التأثير على كفاءة الأداء أو الالتزام البيئي، مما يعزز من جدواها الاقتصادية على المدى الطويل.

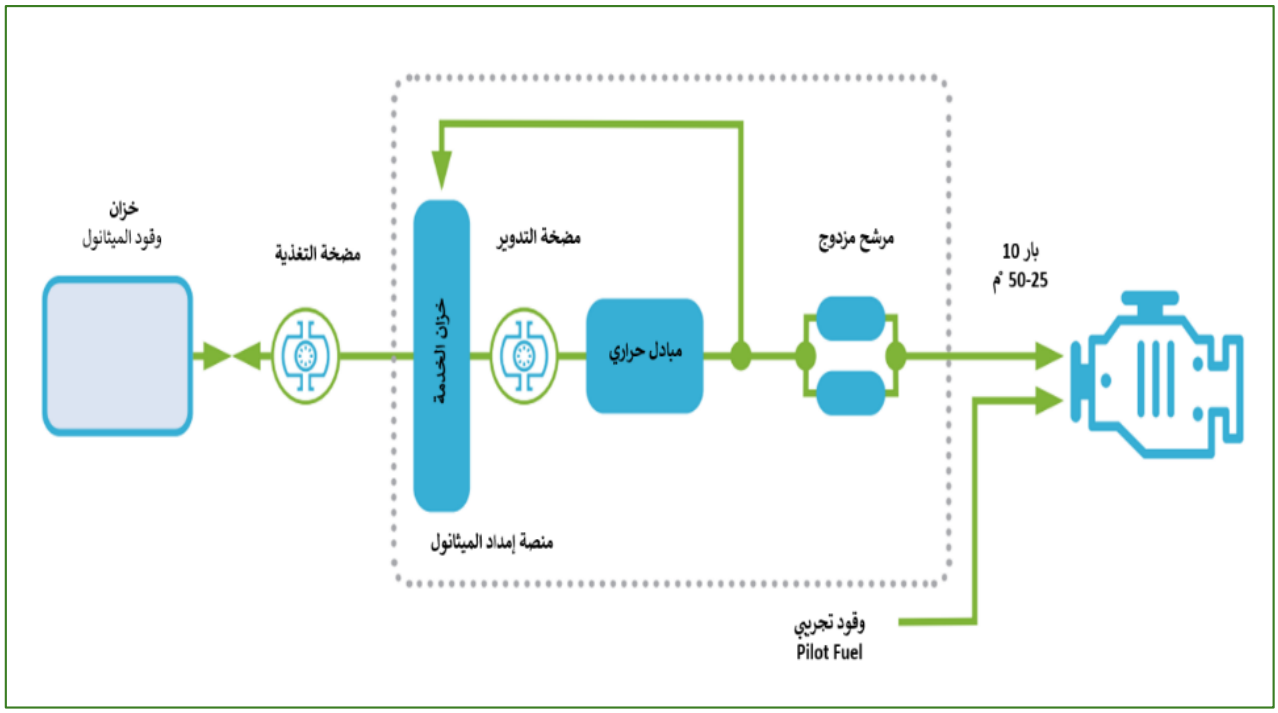
في المقابل، تُشير التوقعات إلى أن محركات رباعية الأشواط ستشهد نموًا أسرع حتى عام 2028، بفضل خصائصها التشغيلية التي تتناسب مع طبيعة بعض السفن، مثل انخفاض مستويات الضوضاء، وسرعة الاستجابة الحركية، وتكاليفها الرأسمالية الأقل، مما يجعلها خيارًا مفضلًا للسفن التي تتطلب بيئة تشغيل هادئة ومرونة في الأداء.

أما على صعيد البنية التحتية التقنية، فقد اعتمدت شركات رائدة مثل **Anglo Belgian Corporation**، وشركة **MAN Energy Solutions**، وشركة **Rolls-Royce**، وشركة **Caterpillar** إلى جانب كبرى أحواض بناء السفن في الصين وكوريا الجنوبية، على أنظمة تزويد بالميثانول تقوم على مبدأ الحقن منخفض الضغط .ففي هذه الأنظمة، يُحقن الميثانول داخل غرف الاحتراق بضغط يقارب **10بار** ودرجة حرارة تتراوح بين **50–25**°م، مما يضمن استقرار الوقود وتحكمًا دقيقًا في عملية الاحتراق.

وفي تطور تقني ملحوظ، طورت شركة **MAN Energy Solutions** نظامًا يعتمد على تسخين الميثانول داخل غرفة الإمداد إلى نحو **50**°م ، ثم ضخه عبر صمام خاص يعمل بضغط مرتفع يصل إلى **300 بار**، مما يُسهم في تعزيز كفاءة الاحتراق والحد من الانبعاثات الضارة، ويعكس مدى التقدّم في مواءمة خصائص الميثانول مع متطلبات الدفع البحري الحديث. يبين الشكل (3-3) مخطط وحدة تزويد الوقود بالميثانول منخفضة الضغط.

الشكل (3-3)

مخطط وحدة تزويد الوقود بالميثانول منخفضة الضغط



المصدر: Marine Service Noord

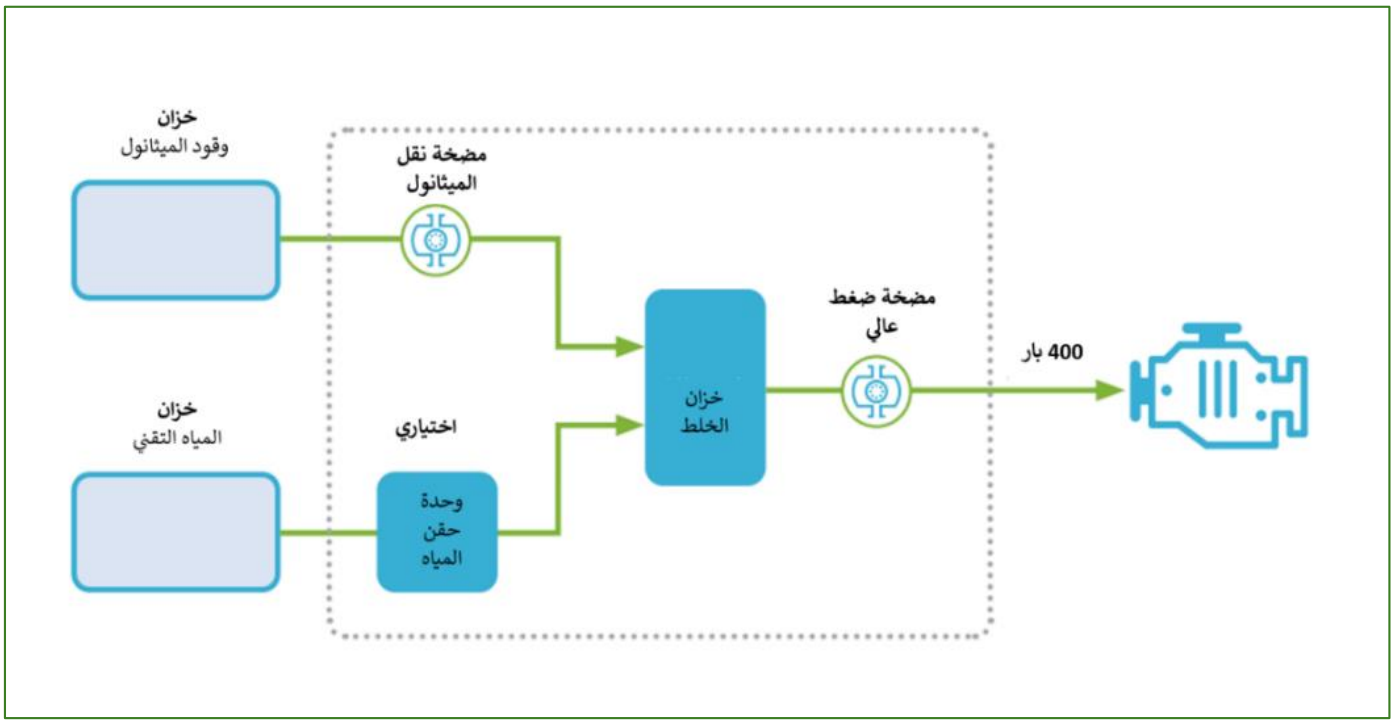
في سياق التحول التقني المستمر في قطاع الدفع البحري، برزت شركة **Wärtsilä** الفنلندية كمطور رئيسي لتقنية الحقن عالي الضغط لمحلول ميثانول-ماء، وهي من التقنيات الواعدة التي تُستخدم في محركاتها الحديثة. حيث يُحقن خليط متجانس من الميثانول والماء في غرفة الاحتراق بضغط يبلغ نحو **400 بار**، مستفيدًا من خاصية الامتزاج الكاملة بين الميثانول والماء، وهي خاصية مدعومة علميًا[71]، إذ تُظهر الدراسات أن الميثانول والماء يُكوّنان محلولًا مستقرًا كيميائيًا في جميع النسب دون فصل طبقي، نتيجة تكوين روابط هيدروجينية قوية بين جزيئات كل منهما. ويُسهم هذا المزج في تحسين خصائص الاحتراق، وخفض درجة حرارة الغرفة، وبالتالي **تقليل انبعاثات أكاسيد النيتروجين والجسيمات الدقيقة**، إلى جانب **خفض استهلاك الميثانول النقي**، مما يُعزز الكفاءة التشغيلية ويُقلل من التكاليف[72].

[71] Yang Zhong, Thermodynamic and Structural Properties of Methanol-Water Solutions Using Non-Additive Interaction Models,2014.
72 John Snyder, Wärtsilä 32 Methanol engine: a familiar four-stroke takes on future fuel , 20 Feb 2023.

وقد تم اقتراح هذه التقنية لتشغيل سفينة البضائع العامة **MV Eemsborg**، المزوّدة بمحرك من طراز **Wärtsilä** بقدرة 4.5 ميغاواط، ضمن مشروع تجريبي يهدف إلى خفض الانبعاثات الكربونية وتعزيز كفاءة الطاقة. وتعكس هذه التجربة توجهًا متقدمًا نحو حلول هجينة ومتكاملة تجمع بين الوقود النظيف والتقنيات الذكية لمعالجة الانبعاثات، بما يتماشى مع معايير المنظمة البحرية الدولية الخاصة بالانبعاثات. .يبين الشكل (3-4) مخطط وحدة تزويد الوقود بالميثانول عالية الضغط.

الشكل (3-4)

مخطط وحدة تزويد الوقود بالميثانول عالية الضغط



المصدر: Marine Service Noord

وعلاوة على ذلك، يُمثل الميثانول وقودًا واعدًا في خلايا الوقود البحرية، التي تُستخدم لتوليد الطاقة المساعدة أو حتى الدفع الكامل على متن السفن. وتتميز هذه الخلايا بكفاءتها العالية، وصغر حجمها، وغياب الأجزاء المتحركة، مما يُقلل من الأعطال ويُطيل عمر التشغيل. والأهم من ذلك، أنها لا تُصدر أي انبعاثات من أكاسيد النيتروجين أو الكبريت أو الجسيمات الدقيقة، مما يجعلها خيارًا بيئيًا متقدمًا ضمن مسار إزالة الكربون في قطاع الشحن البحري، رغم أنها لا تزال في طور التطوير

ولم تصل إلى مرحلة النضج التجاري الكامل[73] . وفي هذا السياق، تقود شركات عالمية مثل شركة **Blue World Technologies**، وشركة**e1 Marine** ، وشركة **Advent Technologies**، وشركة **Freudenberg Fuel Cell** جهودًا بحثية وتطبيقية لتطوير خلايا وقود ميثانول بحرية، من خلال مشاريع تجريبية في الولايات المتحدة وأوروبا والصين، مما يُمهّد الطريق نحو اعتماد أوسع لتقنية خلايا الوقود العاملة بالميثانول في المستقبل.

4.1.1.3. التحديات التشغيلية والبيئية لاعتماد الميثانول كوقود بحري

من الناحية التشغيلية، وبالرغم من السجل الإيجابي للميثانول في الاستخدام الصناعي الآمن، تظل خصائصه الكيميائية مثل طبيعته الأكّالة تمثل تحديات تقنية مهمة. تتطلب هذه الخصائص استخدام مواد مقاومة للتآكل في أنظمة الوقود وخزانات التخزين، بالإضافة إلى تنفيذ برامج صيانة دورية دقيقة تهدف إلى حماية المكونات المعدنية من التدهور. ويُعد التفاعل الكيميائي بين الميثانول والمعادن الشائعة الاستخدام، كالألمنيوم والتيتانيوم، من أبرز العقبات التي تواجه أنظمة الوقود التقليدية، مما استلزم اتخاذ تحديثات فنية تشمل استخدام طلاءات عازلة ومواد مانعة للتآكل، إلى جانب استبدال بعض الأجزاء المعدنية ببدائل بلاستيكية لتحسين متانة الأنظمة وضمان استمرارية التشغيل بكفاءة. وعلى الرغم من أن هذه الإجراءات قد تزيد التكاليف التشغيلية في المدى القصير، إلا أنها تعتبر أبسط وأقل تكلفة مقارنة بالتعقيدات الفنية ومتطلبات السلامة المرتبطة بأنواع وقود بديلة أخرى مثل الأمونيا والهيدروجين، وهو ما يعزز الجدوى الاقتصادية للميثانول كخيار عملي ومستدام في قطاع الشحن البحري منخفض الانبعاثات.

تفرض الخصائص الفيزيائية للميثانول، مثل انخفاض نقطة الوميض وسرعة التبخر، تحديات إضافية تتعلق بالسلامة التشغيلية، خاصة في البيئات المغلقة أو ذات التهوية المحدودة. تتطلب هذه الخصائص تحديث تصميم أنظمة التهوية داخل السفن، واستخدام تقنيات مراقبة متقدمة مثل المستشعرات لرصد تركيز الأبخرة ودرجات الحرارة، بالإضافة إلى تجهيز معدات إطفاء

[73] هذه التكنولوجيا لا تزال في مراحل البحث والتطوير، ويتم حالياً تنفيذ تجارب تجريبية (Pilot demonstrations) في عدة دول مختلفة حول العالم لاختبار أدائها وفعاليتها في ظروف التشغيل البحرية الحقيقية، بهدف تحسينها قبل الاعتماد عليها بشكل كامل في التطبيقات العملية.

حرائق متخصصة تتوافق مع خصائص الميثانول المختلفة عن تلك الخاصة بالوقود التقليدي. وتُعد هذه التحديثات ضرورية لضمان بيئة تشغيل آمنة تقلل من مخاطر الحريق أو الانفجار.

لعب قطاع الصناعات الكيميائية دورًا محوريًا في تطوير الإطار التنظيمي لتشغيل السفن باستخدام الميثانول، من خلال التعاون الوثيق مع هيئات فنية وتشريعية دولية لوضع معايير السلامة والتشغيل التي تراعي الخصائص الخاصة للميثانول كوقود. وقد تكللت هذه الجهود بإعداد "الإرشادات المؤقتة لسلامة السفن التي تستخدم الميثانول أو الإيثانول"، التي اعتمدتها المنظمة البحرية الدولية رسميًا في نوفمبر 2020. ويُعد هذا الإطار التنظيمي خطوة مهمة ومركزية لضمان التطبيق التجاري الآمن للميثانول في قطاع النقل البحري، ودعم التحول نحو شحن بحري منخفض الانبعاثات وصديق للبيئة.

من الناحية البيئية، يُعتبر الميثانول وقودًا صديقًا للبيئة بالمقارنة مع العديد من أنواع الوقود البديلة، خصوصًا في حالات التسرب إلى البيئة البحرية. ويُستخدم مؤشر التركيز القاتل (LC50) كمعيار علمي لتقييم سمية المواد تجاه الكائنات البحرية، حيث تشير البيانات إلى أن الميثانول يمتاز بمستوى سمية منخفض جدًا، إذ يبلغ مؤشر سمّيته حوالي 15,400 ملغم/لتر، مقارنة بأمونيا تبلغ 0.068 ملغم/لتر، وديزل عند 65 ملغم/لتر، وزيوت ثقيلة عند 79 ملغم/لتر. وتُعزى هذه الخاصية الإيجابية إلى القابلية العالية للميثانول للذوبان في الماء وسرعة تحلله الحيوي، مما يقلل من احتمالات تراكمه في النظم البيئية البحرية ويجعله خيارًا أقل ضررًا وأكثر أمانًا في حال حدوث تسربات. يوضح الشكل (3-5) مقارنة سمّية أنواع الوقود البحري باستخدام مؤشر التركيز القاتل لنسبة 50% من مجموعة الأسماك.

الشكل (3-5)

مقارنة سمية أنواع الوقود البحري باستخدام مؤشر "التركيز القاتل لنسبة 50 % من مجموعة الأسماك

المصدر: Methanol institute, MARINE METHANOL Future-Proof Shipping Fuel,2023

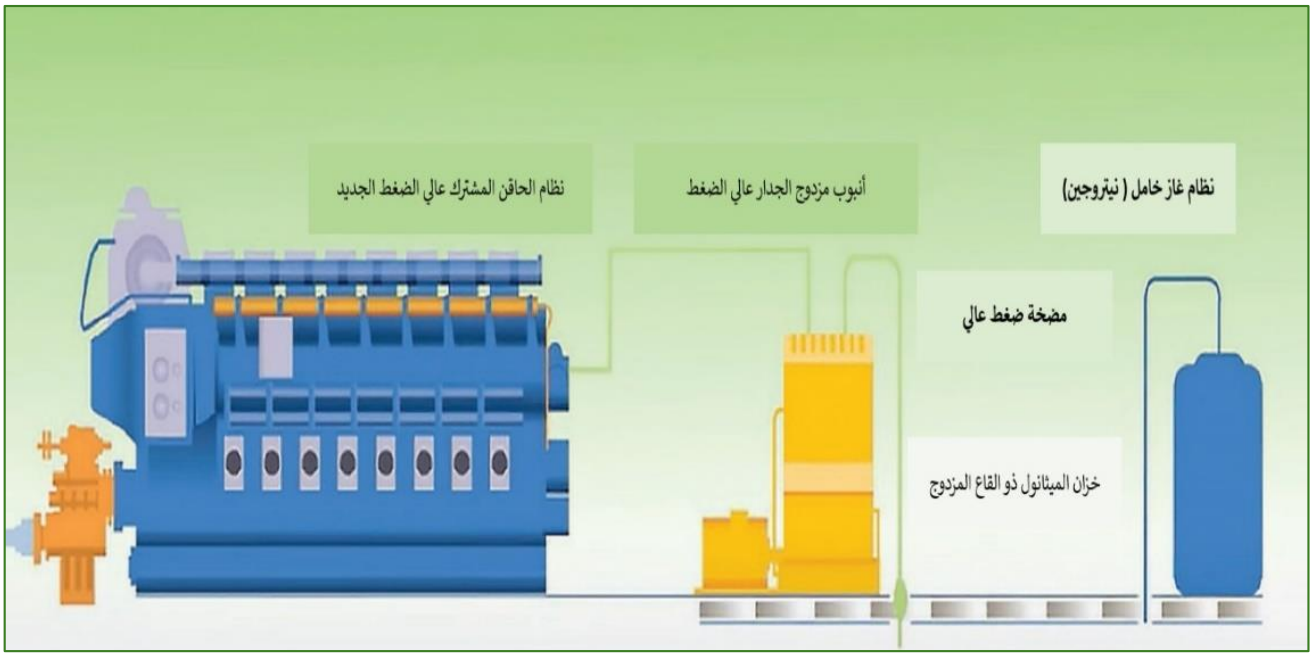
5.1.1.3. مبادرات عالمية لتعزيز استخدام الميثانول كوقود بحري

في إطار المبادرات العالمية الرامية إلى تبني وقود الميثانول كخيار مستدام للنقل البحري، برزت شركة **Stena Line** إحدى أكبر مشغلي العبارات في العالم، والتي تُسيّر أكثر من 25 ألف رحلة سنويًا ، كمثال رائد في هذا المجال. ففي عام 2015، أحرزت الشركة إنجازًا غير مسبوق على مستوى النقل البحري، حين أصبحت أول مشغل لعبّارات الركاب من نوع **Roll-on/Roll-off**[74] يُحوّل إحدى سفنه لتعمل بالميثانول كوقود بديل منخفض الانبعاثات ، وذلك من خلال مشروع تحويل العبّارة **Stena Germanica** ، والتي تُعد من أكبر العبارات السياحية ثنائية الوقود في العالم. تم تنفيذ مشروع التحويل هذا بالتعاون بين شركة **Stena Line**، وسلطات الموانئ المعنية، وشركة **Methanex Corporation** المزود العالمي الرائد للميثانول، بالإضافة إلى شركة **Wärtsilä** المتخصصة في تكنولوجيا المحركات البحرية.

[74] هي سفن مصممة لتحميل وتفريغ المركبات (مثل السيارات، الشاحنات، الحافلات، أو القطارات) عبر منحدرات متحركة أو ثابتة، بحيث "تدحرج" المركبات إلى داخل السفينة أو خارجها، بدلاً من رفعها برافعات.

اشتمل المشروع على تركيب نظام حقن مشترك عالي الضغط **Common Rail System** مصمم خصيصًا للعمل بالميثانول في المحركات البحرية، إلى جانب مضخة ضغط وأنابيب مزدوجة الجدران قادرة على تحمل الضغط العالي، لضمان كفاءة التشغيل وسلامته عند استخدام الميثانول كوقود. ويُعد هذا التحول إنجازًا تقنيًا مهمًا، حيث أثبت إمكانية استخدام الميثانول كوقود بديل عملي في قطاع النقل البحري، مع الحفاظ على أداء المحركات وتقليل الانبعاثات الضارة بشكل كبير. يبين الشكل (3-6) مخططات نظام المحرك ذو الوقود المزدوج ونظام الوقود.

الشكل (3-6)
مخططات نظام المحرك ذو الوقود المزدوج ونظام الوقود



المصدر: Methanol institute, MARINE METHANOL Future-Proof Shipping Fuel,2023

يمثل مشروع تحويل العبارة **Stena Germanica** للعمل بالميثانول نموذجًا رائدًا ومبكرًا لنجاح التحول نحو وقود أنظف وأكثر استدامة في قطاع النقل البحري .فقد أثبت هذا المشروع الجدوى التقنية والبيئية لاستخدام الميثانول كبديل عملي وفعال للوقود التقليدي، مما عزز الثقة في هذا الخيار ضمن جهود إزالة الكربون من القطاع [75] .

[75] Stena Germanica RoPax Ferry

ورغم أن الأطر التنظيمية المتعلقة باستخدام الميثانول كانت لا تزال قيد التطوير أثناء تنفيذ المشروع، فقد تم تجاوز هذه التحديات بنجاح عبر نهج استباقي اعتمد على البحث والتطوير المستمر، والتنسيق الوثيق مع الجهات التنظيمية والتشريعية، مما ساهم في تيسير التوافق التنظيمي وتسريع وتيرة التطبيق. يبين الشكل (3-7) العبارة **Stena Germanica**، كأول عبارة تبحر باستخدام الميثانول منخفض الكربون.

الشكل (3-7)

العبارة **Stena Germanica**، كأول عبارة تبحر باستخدام الميثانول منخفض الكربون

المصدر:Stena Germanica RoPax Ferry

ومن جانب أخر، تُعد شركة **Maersk** من أكبر مشغلي سفن الحاويات في العالم، حيث بدأت الشركة أولى خطواتها الفعلية نحو إزالة الكربون في أغسطس 2021، حين أعلنت عن مشروع رائد لبناء 8 سفن حاويات عملاقة تعمل بوقود الميثانول منخفض الكربون، لتكون هذه الخطوة بمثابة نقطة للتوسع في استخدام الوقود منخفض الكربون. ومع تصاعد الزخم الدولي نحو الوقود البديل، رفعت شركة **Maersk** عدد السفن المخطط لتشغيلها بهذه التقنية إلى 19 سفينة، والتي تم إدخالها الخدمة على مراحل، بدءًا من عام 2023 مع السفن الصغيرة، وصولًا إلى عام 2024 مع السفن العابرة للمحيطات التي تبلغ سعة كل منها حوالي 16,000 حاوية مكافئة **(TEU)** .

وتُظهر التقديرات أن هذه السفن ستُسهم في خفض ما يقرب من مليون طن من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون سنويًا. ومن اللافت أن الشركة نجحت في تقليص فجوة التكلفة بين السفن

التقليدية ونظيرتها العاملة بالميثانول من نحو 15% عند بدء المشروع، إلى ما يتراوح بين 8-12 % فقط، مما يعكس تقدمًا ملموسًا في الجدوى الاقتصادية للمشروع.

ويُعد هذا التحول استجابة مباشرة لمطالب السوق، إذ تعهد أكثر من نصف كبار عملاء شركة **Maersk** ، من بينهم أمازون، ديزني، مايكروسوفت، **H&M** و نوفو نورديسك، بخفض انبعاثات الكربون ضمن سلاسل الإمداد الخاصة بهم. هذا الالتزام البيئي من قبل الشركاء التجاريين شكل حافزًا إضافيًا لتسريع وتيرة تبني الوقود النظيف. في صلب استراتيجيتها نحو التحول البيئي، تراهن شركة **Maersk** على الميثانول الأخضر كخيار مثالي للمرحلة الانتقالية لعدة أسباب جوهرية؛ أولها سهولة وسرعة تطبيقه مقارنة ببدائل أخرى مثل الأمونيا والهيدروجين، التي لا تزال تواجه تحديات تقنية وتشغيلية .

ورغم هذه المقومات الواعدة، يظل توفر الميثانول الأخضر على نطاق عالمي محدودًا، مما يشكل عائقًا رئيسيًا أمام تسريع اعتماده. وفي مواجهة هذا التحدي، أطلقت شركة **Maersk** سلسلة من الشراكات الاستراتيجية لتأمين إنتاج واسع النطاق من الوقود النظيف. ففي أغسطس 2022، وقعت الشركة اتفاقًا مع شركة **Debo** الصينية للطاقة الحيوية لتطوير مشروع لإنتاج 200 ألف طن سنويًا من الميثانول الحيوي.

كما سبقت هذه الخطوة مجموعة من الشراكات التي أُعلن عنها في مارس من العام نفسه مع شركات مثل شركة **European Energy** ، **وشركة Ørsted**، **وشركة Proman**، وشركة **WasteFuel** ، وشركة **Green Technology Bank**، وذلك بهدف ضمان إنتاج ما لا يقل عن 730 ألف طن من الميثانول الأخضر سنويًا بنهاية 2025، لتلبية احتياجات الأسطول الجديد وضمان استقرار الإمدادات.

وفي تطور آخر يؤكد جاهزية الميثانول كوقود قابل للتنفيذ الفوري، أعلنت شركة **Waterfront Shipping**، بالتعاون مع **Mitsui OSK Lines (MOL)**، عن إتمام أول رحلة شحن بحرية بانبعاثات صافية صفرية باستخدام الميثانول الحيوي. الرحلة نُفذت في أوائل عام 2023 على متن السفينة **The Cajun Sun**، بين ميناءي **Geismar** الأمريكي و **Antwerp**البلجيكي، واستغرقت 18 يومًا عبر المحيط الأطلسي. وتم تحقيق الحياد الكربوني من خلال دمج الميثانول الحيوي المعتمد من هيئة

ISCC، والذي يتميز ببصمة كربونية سالبة، مع الميثانول المنتج من الغاز الطبيعي، مما أتاح تسجيل انبعاثات صفرية على مستوى دورة حياة الوقود.

وفي هذا السياق ، تأسست في عام 2019 شركة **Proman Stena Bulk Limited** كشراكة بين شركة **Proman** السويسرية الرائدة في إنتاج الميثانول، وشركة **Stena Bulk**، إحدى أكبر شركات ناقلات النفط العالمية. وفي أغسطس 2022، أعلنت هذه الشركة عن أن ناقلتيها العاملتين بالميثانول، **Stena Pro Patria** و**Stena Pro Marine**، كانتا من أوائل السفن التي قامت بعمليات تزويد بالوقود في ميناء **أولسان** بكوريا الجنوبية. الجدير بالذكر أن **Stena Pro Patria** تُعد أول ناقلة من ثلاث ناقلات متوسطة الحجم (**MR**) ، بسعة تقارب 50 ألف طن ميتري، ومجهزة بمحركات ثنائية الوقود تتيح التشغيل بالميثانول أو بالوقود التقليدي، مما يضيف مرونة تشغيلية عالية ويقلل من مخاطر الاعتماد على نوع واحد من الوقود. يبين الشكل (3-8) الناقلة **Stena Pro Patria**، والتي تستخدم الميثانول كوقود ثنائي[76].

الشكل (3-8)

الناقلة Stena Pro Patria، والتي تستخدم الميثانول كوقود ثنائي

المصدر: Methanol institute, MARINE METHANOL Future-Proof Shipping Fuel,2023

[76] ميثانول كوقود ثنائي" يعني أن السفينة أو المحرك قادر على استخدام نوعين من الوقود بشكل متبادل أو مشترك، حيث يكون الميثانول هو أحد هذين الوقودين، والآخر قد يكون وقودًا تقليديًا مثل الديزل البحري أو الغاز الطبيعي المسال.(LNG)
بعبارة أبسط، **وقود ثنائي (Dual-Fuel)** يعني أن المحرك يمكنه تشغيل السفينة بالميثانول أو بوقود آخر حسب الحاجة، مما يمنح مرونة أكبر في التشغيل ويتيح الانتقال التدريجي نحو استخدام الميثانول كوقود أنظف دون الحاجة لاستبدال السفينة أو المحرك بالكامل.

2.1.3. الآطر التشريعية لتعزيز دور الميثانول كوقود مستدام في قطاع نقل البري، وتجربة الصين كنموذج رائد

بدأت أولى التجارب العملية لاستخدام الميثانول كوقود في قطاع النقل البري في أواخر سبعينيات القرن الماضي، لا سيما خلال أزمة النفط العالمية، حين أطلقت ولاية كاليفورنيا الأمريكية برامج تجريبية لاستخدام خليط ميثانول-غازولين بنسبة تصل إلى 85 % (**M85**). ورغم أن هذه المبادرات شكّلت خطوة رائدة آنذاك، إلا أنها اصطدمت بتحديات تتعلق بالبنية التحتية، وموثوقية سلاسل التوريد، ومدى تقبل المستهلك، مما أدى إلى تراجع الزخم وعدم انتشار الاستخدام على نطاق واسع خلال تلك الفترة[77].

ومع دخول القرن الحادي والعشرين وتجدد الالتزامات البيئية العالمية، برزت الحاجة الملحّة إلى أطر تنظيمية وتشريعية تُسرّع من تبنّي الوقود المتجدد في قطاع النقل، ومن بينها الميثانول. في هذا السياق، لعبت المؤسسات الدولية دورًا محوريًا في دعم هذا التوجه، وفي مقدمتها وكالة الطاقة الدولية من خلال برنامج "الوقود المتقدم في النقل " (**IEA-AMF**)، الذي أطلق عام 2020 مشروع **Annex 56** لدراسة الإمكانات التقنية والتشريعية لدمج الميثانول في المركبات الخفيفة والثقيلة. وقد تناول المشروع تقييم أداء الميثانول في أنظمة الوقود، وتحليل تأثيره على الانبعاثات، إضافة إلى استعراض التحديات المتعلقة بالبنية التحتية والتشريعات المطلوبة، مما وفر مرجعية علمية وتقنية للعديد من الدول التي تسعى لاعتماده كوقود بديل.

كما تبنى الاتحاد الأوروبي نهجًا تنظيميًا مرنًا يسمح باستخدام نسب ميثانول تصل إلى 3% ضمن الغازولين، وفقًا للتوجيه الأوروبي **EC/2009/30**، مع اشتراط الالتزام بمعايير جودة الوقود والصحة البيئية[78]. وفي ذات الاتجاه، واصلت ولاية كاليفورنيا ريادتها، حيث أدرجت الميثانول منخفض الكربون ضمن "معيار الوقود منخفض الكربون (**LCFS**) "منذ عام 2011، الأمر الذي أتاح اعتماده ضمن آليات سوق الكربون، وشجّع على تدفق الاستثمارات نحو تطوير البنية التحتية وتعزيز جهود البحث والتطوير في مجال تطبيقاته[79].

[77] L. Bromberg, Methanol as an alternative transportation fuel in the US: Options for sustainable and/or energy-secure transportation,2010
[78] Directive 2009/30/EC of the European Parliament and of the Council,2009
[79] California LCFS Program – California Air Resources Board

لكن التجربة الأبرز عالميًا من حيث شموليتها وتكاملها كانت تجربة **الصين**، والتي وضعت الميثانول في صلب استراتيجيتها لأمن الطاقة وخفض الانبعاثات. ففي عام 2010، أطلقت الحكومة الصينية برنامجًا تجريبيًا واسع النطاق في أربع مقاطعات رئيسية هي: **Shanxi** ، و**Guizhou**، و**Gansu**، و**Shaanxi**، وركّز البرنامج على استخدام الميثانول في المركبات بنسبة تصل إلى 100%، إلى جانب بناء شبكة متخصصة من محطات التزود بالوقود، وتطوير معايير وطنية صارمة لجودة الميثانول(**GB/T 23510-2009**) . وفي عام 2019، أصدرت الصين "دليل التوجيهات حول المركبات العاملة بالميثانول"، الذي وضع الإطار التنظيمي لتصنيع وتشغيل هذا النوع من المركبات. كما رافقت هذه الخطوات حوافز مالية محلية، شملت تقديم دعم مباشر للمستهلكين، وتوسيع البنية التحتية، واعتماد أنظمة رقابية للانبعاثات، مما مهد الطريق أمام تطبيق هذا الوقود على نطاق شبه صناعي في عدد من المناطق التجريبية[80].

وقد توّجت هذه الجهود بإطلاق مقاطعة **Shanxi** في عام 2023 خطة خمسية جديدة للتوسع في استخدام **المركبات التي تعمل بالميثانول**، خاصة في فئة المركبات الثقيلة، مما يعكس مدى الثقة في هذا الخيار كأداة فعالة للانتقال إلى وقود منخفض الانبعاثات. وتشير البيانات إلى أن الصين شغّلت، بحلول نهاية عام 2022، أكثر من 30,000 مَركبة تعمل بالميثانول، قطعت مجتمعة أكثر من 10 مليار كيلومتر، وحققت نتائج إيجابية من حيث تقليل الانبعاثات، وتحسين كفاءة الطاقة، وتقليص الاعتماد على النفط المستورد، مع تقليل ملموس في نسب التلوث المحلي، لا سيما في المدن الكبرى.

ورغم هذه النجاحات، لم تخلُ التجربة من تحديات تقنية معقدة تمثلت في الخصائص التآكلية للميثانول على بعض المعادن، وارتفاع طاقة تبخيره، وصعوبة تشغيل المحرك في الأجواء الباردة، إلى جانب مشكلة "الانفصال الطوري" التي تحدث عند اختلاط الميثانول بالغازولين في وجود الماء، مما يؤدي إلى فصل الخليط إلى طبقتين غير متجانستين ويؤثر سلبًا على كفاءة الاحتراق. وقد تعاملت الصين مع هذه التحديات بمنهجية علمية شاملة، تمثلت في تطوير مواد مقاومة للكحول تُستخدم في صناعة المحركات، وتصميم أنظمة وقود مزدوجة تتيح التبديل بين الميثانول

80 Methanol Vehicles in China: A Review from a Policy Perspective,2023.

والغازولين حسب الحاجة، وتطوير مستحلبات وإضافات كيميائية تمنع الانفصال الطوري وتحافظ على تجانس الخليط حتى في وجود الرطوبة. كما اعتمدت تقنيات لعزل الماء إلكترونيًا قبل دخوله نظام الاحتراق، مع تحسين تصميم خزانات الوقود لتقليل امتصاص الرطوبة. وجرى تنفيذ حملات توعية وتدريب شملت السائقين والعاملين في محطات الوقود لضمان الاستخدام الآمن والفعال لهذا النوع من الوقود، إلى جانب تخصيص بنية تحتية ذات مواصفات فنية خاصة لتخزين وتوزيع الميثانول.

ولتجاوز بعض القيود التقنية جذريًا، بدأت الصين في تطوير محركات تعمل مباشرة بالميثانول النقي دون خلط، مما سمح بتحسين الكفاءة الحرارية وتقليل الانبعاثات بشكل كبير. كما جرى تعديل تصميم المحركات لرفع ضغط الاحتراق وتحقيق أداء أعلى، وهو ما مكّن من تشغيل الميثانول في مركبات الخدمة العامة مثل سيارات الأجرة والشاحنات، التي شكّلت منصة مثالية لتقييم الأداء في ظروف تشغيل واقعية. وقد جاءت هذه التحركات مدفوعة بارتفاع استهلاك الطاقة نتيجة الزيادة الكبيرة في عدد المركبات. حيث استوردت الصين في عام 2021، نحو 513 مليون طن من النفط، بما يمثل أكثر من 70% من إجمالي احتياجاتها، إلى جانب 168.7 مليار م^3 من الغاز الطبيعي، وهو ما زاد الضغوط على أمنها الطاقي، ودفعها إلى التوسع في استخدام الميثانول المنتج محليًا من الفحم.

وبفضل جهودها المتكاملة، أصبحت الصين اليوم من أكبر منتجي ومستهلكي الميثانول لأغراض النقل، بطاقة إنتاجية تقارب 4.8 مليون طن سنويًا، مع توسيع الاعتماد على خليط **M85** و**M100**، وتطوير محركات متخصصة، وبنية تحتية متكاملة للتزود بالوقود[81]. يبين الشكل (3-9) أساطيل السيارات العاملة بالميثانول النقي (**M100**) كوقود في الصين.

[81] Innovation Outlook Renewable Methanol, 2021

الشكل (3-9)

أساطيل السيارات العاملة بالميثانول النقي (M100) كوقود في الصين

المصدر: Geely,2020.

2.2.1.3. منظومة تخزين ونقل وتوزيع الميثانول كوقود للسيارات

تتمثل إحدى المزايا الأساسية للميثانول في إمكانية تخزينه ونقله وتوزيعه باستخدام البنية التحتية القائمة للوقود السائل، مما يقلل الحاجة لاستثمارات ضخمة في تأسيس شبكات جديدة. ويتم تخزين الميثانول في خزانات خاصة أو معدلة لتقاوم خواصه الكيميائية، مع اتباع معايير سلامة مشددة للحد من المخاطر المحتملة. ويُنقل الميثانول بكميات كبيرة عبر وسائل متعددة تشمل السفن، القطارات، الشاحنات، بل ويمكن نقله أيضًا عبر خطوط أنابيب مصممة خصيصًا لذلك، مما يضمن استمرارية وكفاءة الإمداد.

فيما يتعلق بمحطات التزويد، يمكن تكييف خزانات الوقود الحالية مع الميثانول عن طريق تعديلات تقنية بسيطة مثل استبدال الحشيات (Gaskets) بمواد مقاومة للتآكل، مما يسمح للسائقين بملء خزانات مركباتهم في محطات الخدمة المعروفة دون الحاجة إلى تغييرات جوهرية في النظام أو البنية التحتية.

1.2.2.1.3.التجارب الدولية في مجال منظومة النقل والتوزيع للميثانول كوقود بري

بدأت الولايات المتحدة، وبخاصة ولاية كاليفورنيا، في أواخر السبعينيات بتنفيذ برامج تجريبية لاستخدام خليط يحتوي على 85% ميثانول، كبديل عن الغازولين التقليدي. وقد استلزم ذلك تعديل محطات الوقود القائمة لتستوعب هذا الوقود الجديد، وذلك عبر تحديث خزانات التخزين واستخدام حشيات **Gaskets** ، ومواد مقاومة للميثانول لضمان سلامة التوزيع ومنع التسرب مما ساهم في توسيع منظومة التوزيع والتخزين الخاصة به.

على صعيد الاتحاد الأوروبي، شجع تطبيق التوجيه رقم **EC/2009/30 الخاص** بإدخال نسب من الميثانول ضمن مزيج الغازولين، مع التزام صارم بمعايير جودة الوقود والسلامة البيئية، الدول الأعضاء على تطوير محطات وقود مهيأة لتوزيع الميثانول ودمجه ضمن منظومة الوقود التقليدية. واعتمدت هذه المحطات تعديلات تقنية محدودة تشمل خزانات مقاومة وتحديث خطوط التزويد لضمان الاستدامة والسلامة في تداول الميثانول، مما عزز من فرص تبنيه كوقود مستدام في قطاع النقل البري.

تأتي الصين كأبرز مثال عالمي لتطبيق منظومة تداول الميثانول بشكل شامل، حيث أطلقت منذ 2010 برامج موسعة في مقاطعات **Shanxi**، **Guizhou**، **Gansu**، و**Shaanxi**، تضمنت تشغيل المركبات التي تعمل بالميثانول بنسبة تصل إلى 100%، مع تطوير شبكة محطات تعبئة متخصصة، وتحديث خزانات الوقود بتقنيات مقاومة للتآكل، إضافة إلى بناء شبكة نقل متكاملة تشمل السفن، القطارات، الشاحنات، وخطوط الأنابيب

.ووضعت الصين معايير وطنية صارمة لضمان جودة الميثانول (**GB/T 23510-2009**) وأصدرت دليلًا تنظيميًا مفصلاً في 2019 لتنظيم تشغيل المركبات التي تعمل بالميثانول) ، كما رافق هذا التطوير حوافز مالية وبرامج تدريبية لضمان السلامة والكفاءة في استخدام هذا الوقود.

تُظهر هذه التجارب أن منظومة تداول الميثانول تتميز بالمرونة والقدرة على التكامل مع البنية التحتية الحالية، مما يجعلها خيارًا عمليًا وفعّالًا لتوسيع استخدام الميثانول في قطاع النقل البري، مع إمكانية تقليل التكاليف وتعزيز الاستدامة البيئية. يبين **الشكل (3-10)** محطات تموين السيارات بالميثانول في الصين.

الشكل (3-10)

محطات تموين السيارات بالميثانول في الصين

المصدر: Palcan Energy Corp , 2020

ومن جانب أخر، تشير دراسة حديثة إلى أن تكلفة إنشاء محطة تزويد بالميثانول تقارب تكلفة محطات الغازولين أو الديزل، وتُعد أقل بكثير من تكلفة محطات تزويد الهيدروجين. كما أن بنية التزويد بالميثانول تُعد أبسط وأقل تكلفة مقارنة بمحطات الغاز الطبيعي المُسال **LNG** ، التي تتطلب تجهيزات معقدة وتقنيات تبريد متقدمة للحفاظ على الغاز في حالته السائلة عند درجات حرارة منخفضة جدًا.

3.1.3. إدماج الميثانول الأخضر والأزرق في منظومة الوقود في قطاع النقل البري

على الصعيد العملي، بدأت عدة دول وشركات في إدماج **الميثانول الأخضر** (المنتج من الهيدروجين الأخضر وثاني أكسيد الكربون الملتقط من الهواء أو الصناعات) و**الميثانول الأزرق** (المُنتج من الغاز الطبيعي مع احتجاز الكربون) كخيارين واعدين لتعزيز الاستدامة في قطاع النقل البري ضمن خططها الوطنية للطاقة أو برامجها التجريبية في قطاع النقل. ففي **أوروبا**، تُعد **الدنمارك** من أوائل الدول التي أطلقت مشاريع لإنتاج الميثانول الأخضر باستخدام طاقة الرياح والهيدروجين

الأخضر، مثل مشروع **Power2Met**،[82] والذي يهدف إلى إنتاج الميثانول الأخضر لاستخدامه كوقود في الشاحنات والحافلات، مع التركيز على التكامل مع البنية التحتية للنقل البري الثقيل.

أما في **الصين**، فقد أعلنت مقاطعة **شانشي** عن خطة تجريبية لإدخال الميثانول الأخضر في أسطول المركبات العامة بحلول 2025، ضمن مشروع مشترك بين الحكومة وشركات مثل **Shanxi Meijin Energy** . ويهدف المشروع إلى استخدام ميثانول ناتج من الكتلة الحيوية والهيدروجين منخفض الكربون لتشغيل مركبات الميثانول الموجودة بالفعل، بما في ذلك الحافلات وسيارات الأجرة[83].

وفي **ألمانيا**، تعمل شركات مثل **Proman** و **Helm AG** على تطوير سلاسل توريد متكاملة للميثانول الأزرق المستورد من أمريكا الشمالية والشرق الأوسط، لتزويد قطاعات النقل والصناعة، مع خطط لاستخدامه في أساطيل شاحنات ثقيلة ضمن برنامج **Blue Fuel Alliance**.[84] وقد بدأ العمل على تجهيز أولى محطات التزود بهذا النوع من الميثانول في بعض الموانئ والمدن الصناعية.

ومن جهة أخرى، أطلقت **الهند** برنامجًا وطنيًا تجريبيًا عبر "المؤسسة الوطنية للوقود البديل (**NITI Aayog**) "لاختبار الميثانول الأخضر كمصدر لتشغيل الحافلات ، في خطوة تهدف إلى تقليل الاعتماد على الديزل المستورد وتوفير حلول محلية منخفضة الكربون[85].

وتشير هذه التجارب مجتمعة إلى أن إدماج الميثانول الأخضر والأزرق في قطاع النقل البري بات خيارًا حقيقيًا ضمن خارطة التحول الطاقي العالمي، مع إمكانيات عالية للتوسع. كما أن القدرة على استخدام الميثانول النظيف في المركبات الحالية بعد تعديلات بسيطة، دون الحاجة إلى تغييرات جذرية في منظومة النقل أو الوقود، يمنح هذا المسار جاذبية اقتصادية وتقنية يصعب تجاهلها في السنوات القادمة.

[82] Power2Met Project – https://www.power2met.dk
[83] Methanol Institute (2022). "China Expands Methanol Vehicle Pilot Programs"
[84] Helm AG & Proman Partnership Announcement (2023)
[85] NITI Aayog (India's policy think tank)

4.1.3. ثنائي ميثيل الإيثر كوقود بديل مستدام لمحركات الديزل

يُعد **ثنائي ميثيل الإيثر (DME)** ، المشتق من الميثانول، من أكثر الخيارات الواعدة كوقود بديل لمحركات الديزل، نظرًا لما يتمتع به من خصائص احتراقية مماثلة للديزل، أبرزها رقم السيتان المرتفع واحتراقه النظيف شبه الخالي من السُخام، مما يؤدي إلى خفض كبير في انبعاثات الجسيمات الصلبة وأكاسيد النيتروجين، ويساهم بالتالي في تحسين جودة الهواء، خاصة في البيئات الحضرية المكتظة. وفي الوقت نفسه، يتميز ثنائي ميثيل الإيثر بخواص فيزيائية قريبة من غاز البترول المسال، حيث يمكن تسييله عند ضغط منخفض (~5 بار)، مما يُتيح استخدام البنية التحتية الحالية لتخزين ونقل وتوزيع غاز البترول المسال دون الحاجة إلى استثمارات ضخمة في شبكات جديدة.

وتكمن إحدى المزايا التشغيلية لثنائي الميثيل إيثر في إمكانية استخدامه في محركات الديزل التقليدية بعد إدخال تعديلات بسيطة على نظام الحقن والمواد المقاومة للكحول، مما يجعله خيارًا عمليًا وفعّالًا من حيث التكلفة في تطبيقات النقل الثقيلة، كالشاحنات والحافلات. وقد دفعت هذه الخصائص عددًا من الدول إلى تطوير مشروعات لإنتاج ثنائي ميثيل إيثر منخفض الكربون باستخدام الميثانول الأخضر أو الأزرق، بهدف تعزيز الاستدامة وتقليل البصمة الكربونية المرتبطة بالنقل.

في هذا الإطار، تقود **الولايات المتحدة** جهودًا رائدة من خلال شركة **Oberon Fuels** التي دشّنت أول منشأة تجارية صغيرة في كاليفورنيا لإنتاج ثنائي ميثيل الإيثر منخفض الكربون من الميثانول الحيوي. ويُستخدم هذا الوقود حاليًا في شاحنات تجريبية ضمن برامج تدعمها وزارة الطاقة الأمريكية ومعايير كاليفورنيا للوقود منخفض الكربون(**LCFS**) . وبالمثل، تعمل مجموعة فولفو **Volvo Group** بالتعاون مع شركة **Oberon** على تطوير تطبيقات تجارية لثنائي ميثيل الإيثر في النقل الثقيل، ضمن مشروع أوروبي يُركز على إزالة الكربون من الشاحنات.

أما في **أوروبا**، فقد تبنت **السويد** توجهًا مماثلًا عبر مشاريع تحويل الميثانول الأخضر المنتج من الهيدروجين المتجدد وثاني أكسيد الكربون إلى ثنائي ميثيل الإيثر ، ضمن برنامج تحولي يهدف إلى إحلاله تدريجيًا محل الديزل في النقل البري الثقيل. وفي **اليابان**، تعمل شركة **Mitsubishi Gas Chemical** على تطوير إنتاج **ثنائي ميثيل الإيثر** من مصادر منخفضة الكربون، وتطبيقها في المناطق الحضرية ذات الكثافة السكانية العالية.

وفي **الصين**، التي تُعد أحد أكبر مستهلكي **ثنائي ميثيل الإيثر** في العالم، يجري التوجه حاليًا نحو تحسين بصمة هذا الوقود البيئية من خلال ربط إنتاجه بمصادر ميثانول أقل كثافة كربونية، بما في ذلك الميثانول المنتج من الفحم مع تطبيق تقنيات احتجاز وتخزين الكربون، وهو ما يُقربه من تعريف "الميثانول الأزرق". وقد بدأت عدة مقاطعات في إنشاء محطات تزويد مخصصة لهذا الوقود لاستخدامه في النقل العام والتجاري.

إن الجمع بين خصائص **ثنائي ميثيل الإيثر** الاحتراقية العالية، والبنية التحتية الجاهزة، وإمكانية إنتاجه من مصادر ميثانول منخفضة الكربون، يجعل منه وقودًا مثاليًا في المرحلة الانتقالية نحو نقل بري مستدام. كما يفتح المجال أمام توازن استراتيجي بين كفاءة الأداء، والاعتبارات البيئية، والجدوى الاقتصادية، خصوصًا في القطاعات التي يصعب كهربتها، مثل الشاحنات الثقيلة والنقل لمسافات طويلة. يبين الشكل (3-11) محطات التزود بمنتج ثنائي الميثيل إيثر في الصين.

الشكل (3-11)

محطات التزود بمنتج ثنائي الميثيل إيثر في الصين

المصدر: Palcan Energy Corp , 2020

2.3. دور المبادرات والتشريعات البيئية نحو تعزيز استخدام الميثانول كوقود للطيران

يلعب الدعم السياسي والتشريعي المتزايد في أوروبا وأمريكا الشمالية دورًا محوريًا في تسريع اعتماد وقود الطيران المستدام **(SAF)** . فقد تبنت الحكومات في هذه المناطق سياسات تحفيزية وتشريعات ملزمة تهدف إلى تقليل الانبعاثات الكربونية من قطاع الطيران، مما يفتح آفاقًا واسعة للاستثمارات الضخمة ويحفز شركات الطاقة والبتروكيماويات على تطوير منتجات وقود منخفضة الكربون. ومن المتوقع أن يسهم هذا المناخ الداعم في توسيع نطاق إنتاج وقود الطيران المستدام، وتعزيز مكانة الميثانول الأخضر والأزرق كركيزة أساسية لمستقبل طيران أكثر استدامة وحيادًا كربونيًا.

وفي هذا الإطار، تقود وكالة الاتحاد الأوروبي لسلامة الطيران **(EASA)** جهود تطوير واعتماد وقود الطيران المستدام، حيث أطلقت منذ عام 2015 سلسلة من التوصيات التي تستهدف دعم البحث والتطوير في مجال أنواع الوقود البديلة مثل الميثانول الحيوي والكهربائي. وتعتبر هذه الخيارات منخفضة الكربون أدوات فعالة لدعم التحول التدريجي نحو حلول طاقة أنظف.

يُستخدم الميثانول في هذا السياق كمادة وسطية مهمة لإنتاج وقود الطيران المستدام، من خلال تحويله إلى مركبات هيدروكربونية سائلة تُعرف بـ "البارافينات التخليقية" **Synthetic Paraffinic Kerosene - SPK** . وتتميز بكونها متوافقة مع محركات الطائرات الحديثة عند مزجها بنسب معينة مع الكيروسين التقليدي، مما يسمح باستخدامها دون الحاجة إلى تغييرات تقنية جوهرية في المحركات أو أنظمة التزويد بالوقود، إلى جانب إمكانية التكامل مع البنية التحتية القائمة، مما يجعله خيارًا واعدًا لدعم جهود إزالة الكربون من قطاع الطيران وتحقيق أهداف الاستدامة العالمية[86].

1.2.3.الميثانول منخفض الكربون كوقود طيران مستدام

يُعَدّ دمج الميثانول الأخضر والأزرق في إنتاج وقود الطيران المستدام **(SAF)** من أبرز الابتكارات الواعدة التي تسهم في خفض الانبعاثات الكربونية في قطاع الطيران. ومع تسارع التطورات التقنية وتزايد الزخم السياسي والتشريعي العالمي الداعم لاعتماد وقود طيران مستدام، يتوقع أن

[86] Michael Blaisse, PhD, Fellow. Challenges and Trends in Sustainable Aviation Fuels, March 2024

يحتل الميثانول، بنوعيه الأخضر والأزرق، مكانة استراتيجية متقدمة في مستقبل النقل الجوي المستدام، وأن يكون ركيزة أساسية لتحقيق أهداف الحياد الكربوني العالمي.

تتنوع التقنيات المستخدمة في تحويل الميثانول إلى وقود طيران مستدام، حيث تظهر مستويات متقدمة من الكفاءة والفعالية البيئية. من بين هذه التقنيات، تبرز تقنية "تحويل الميثانول إلى وقود طيران " (**Methanol-to-Jet - MtJ**)، التي تعتمد على حلول متطورة مثل تقنية **eFining™** من شركة **Honeywell**، والتي تُعد من التقنيات الرائدة في تحويل الميثانول إلى مركبات هيدروكربونية متوافقة مع معايير وقود الطيران المستدام.

كما يُعد التحويل المباشر للميثانول إلى وقود طيران باستخدام محفزات متقدمة مسارًا مبتكرًا وواعدًا، كما يتجسد في مشروع **MeSAF** التجريبي في الدنمارك، بطاقة إنتاجية تصل إلى حوالي آلف طن سنويًا. يستخدم هذا المشروع محفزًا مبتكرًا طورته شركة **Vertimass**، لتحويل الميثانول إلى وقود طيران مستدام في خطوة واحدة فقط، مما يُبسط العمليات الصناعية ويخفض التكاليف التشغيلية والتعقيدات التقنية، ويعزز من فرص التوسع التجاري لهذه التقنية في المستقبل القريب.

تُجسّد هذه التقنيات الأساس العلمي والتطبيقي لمشاريع رائدة على مستوى العالم، من بينها مشروع **IdunnH2** في آيسلندا، الذي يهدف إلى استخدام الميثانول الأخضر وتحويله إلى وقود طيران مستدام باستخدام تقنيات متطورة طوّرتها شركتا **CRI** و**Honeywell UOP**، في منشأة صناعية متكاملة قرب مطار كيفلافيك الدولي. ويستفيد المشروع من وفرة مصادر الطاقة المتجددة في آيسلندا، إضافة إلى موقعه الاستراتيجي كبوابة لوجستية تربط بين أوروبا وأمريكا الشمالية، ما يمنحه ميزة تنافسية فريدة في سوق الوقود المستدام، ويسعى لتحويل آيسلندا إلى مركز أوروبي رائد في هذا المجال بحلول عام 2027.

وقد خضع المشروع لتقييم شامل للجدوى الاقتصادية والفنية أجراه فريق من شركة **Element Energy** البريطانية، بدعم من شركة **Mannvit** الأيسلندية للاستشارات الهندسية. وينفذ المشروع بتنسيق وثيق مع الجهات المعنية، بما في ذلك السلطات البلدية، وهيئة تشغيل مطار كيفلافيك (**Isavia**)، وشركة تطوير المطار، إلى جانب شركات الطيران العاملة في المطار، لضمان

توافقه مع الخطط الوطنية للتنمية المستدامة والنقل النظيف، وتعزيز فرص نجاحه واستمراريته على المدى الطويل[87].

وفي الوقت نفسه، تتقدم شركة **HIF Global** في الولايات المتحدة بخطى ثابتة نحو تطوير منشآت ضخمة لإنتاج وقود الطيران المستدام من الميثانول، مع مشاريع استراتيجية تقع في تكساس وأستراليا وتشيلي. وتتوقع الشركة بدء الإنتاج التجاري خلال السنوات القليلة المقبلة، مما يعكس التزام القطاع الخاص بتعزيز إنتاج الوقود منخفض الكربون وتوسيع نطاق استخدامه عالمياً.

في سياق تسارع الجهود العالمية لتبني الميثانول كوقود طيران مستدام، تجلت هذه الرؤية عمليًا في ديسمبر 2023، عندما شهدت دولة الإمارات العربية المتحدة أول رحلة تجريبية باستخدام وقود طيران مستدام مشتق من الميثانول، وذلك خلال فعاليات مؤتمر **COP28** في دبي. جاءت هذه التجربة نتيجة تعاون مشترك بين شركة "مصدر" وشركة "توتال إنرجي"، بدعم من الهيئة العامة للطيران المدني، وبشراكة فاعلة مع شركات الطيران العالمية مثل "إيرباص" و"فالكون" و"أكسينز." ويمثل هذا الإنجاز محطة مهمة على طريق تحويل الأبحاث والتقنيات المتقدمة إلى تطبيقات عملية تقلل البصمة الكربونية لقطاع الطيران، ما يعكس التزام الإمارات برؤية طيران أكثر استدامة. وفي هذا الإطار، تتبنّى دبي حلولاً مبتكرة لتصبح مركزًا إقليميًا لوقود الطائرات المستدام، وتقود جهود التعاون الدولي لتسريع إزالة الكربون من قطاع الطيران.

ويحظى ملف الوقود المستدام في قطاع الطيران باهتمام بارز ضمن البرامج الوطنية لدولة الإمارات، حيث أدى هذا الاهتمام إلى تأسيس لجنة الوقود المستدام والوقود منخفض الكربون لقطاع الطيران في عام 2020. وتسعى هذه اللجنة إلى وضع استراتيجية وطنية شاملة للوقود المستدام والطاقة منخفضة الكربون في قطاع الطيران، وتشجيع الشراكات مع القطاع الخاص ودعوة المستثمرين للاستثمار في مجال الطاقة النظيفة. كما تدعم اللجنة تطوير الدراسات والبحوث العلمية ذات الصلة، وتُشارك الهيئة العامة للطيران المدني في المفاوضات الدولية والإقليمية المتعلقة بتغير المناخ في قطاع الطيران[88].

[87] Fueling Iceland's Future with Sustainable Aviation Fuel from Green Hydrogen
[88] Masdar, TotalEnergies to develop a commercial green hydrogen to methanol to SAF project in Abu Dhabi, 2024.

3.3. الميثانول: حجر الأساس في الصناعات الكيميائية والتحول المستدام

تشير التقديرات العالمية إلى استهلاك أكثر من 60 مليون طن سنويًا من الميثانول كمادة أولية في صناعة الكيماويات والبتروكيماويات، مما يبرز أهميته الكبيرة في هذا القطاع الحيوي[89]. يُعد الميثانول أحد المواد الأساسية المستخدمة على نطاق واسع في إنتاج مجموعة متنوعة من المركبات الوسيطة، مثل الفورمالديهايد، حمض الخليك، الميثيل ثلاثي بيوتيل الإيثر (**MTBE**)، بالإضافة إلى الراتنجات والبلاستيك، التي تُشكل أساسًا للعديد من المنتجات الصناعية والاستهلاكية. في العقود الماضية، اعتمد إنتاج الميثانول بشكل رئيسي على مصادر أحفورية تقليدية مثل الغاز الطبيعي والفحم، وهو ما أسهم بشكل مباشر في زيادة انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وتعزيز الأثر البيئي السلبي للصناعات البتروكيماوية.[90] ومع تصاعد التحديات المناخية والالتزامات المتزايدة للدول والشركات نحو تحقيق أهداف الحياد الكربوني، بات الميثانول المستدام ، سواء الأخضر أو الأزرق المصاحب، خيارًا استراتيجيًا وضروريًا للتحول إلى صناعة كيميائية أكثر نظافة وكفاءة، تسعى لتقليل البصمة الكربونية وتحقيق التنمية المستدامة[91].

تكمن أهمية الميثانول المستدام في كونه بديلاً مباشرًا للميثانول التقليدي في معظم التطبيقات الصناعية دون الحاجة إلى تعديلات كبيرة في البنية التحتية القائمة، مما يسهل دمجه تدريجياً ضمن العمليات الكيميائية المعقدة. وتُعد الصناعات القائمة على الفورمالديهايد إحدى أبرز المستفيدين من هذا التحول. ففي هذا الإطار، يعد مشروع شركة **OCI** في مدينة **Rozenburg** بهولندا من المشاريع الرائدة، حيث بدأت الشركة إنتاج الميثانول الأخضر عام 2021 بطاقة إنتاجية تصل إلى حوالي 750، والمستخدم في تصنيع الفورمالديهايد واليوريا-فورمالدهايد، مما يسهم في تقليل الانبعاثات الكربونية بنسبة تقارب **60%** مقارنة بالميثانول التقليدي[92]. يبين الشكل (3-12) مصنع شركة **OCI** لإنتاج الفورمالدهيد من الميثانول الأخضر في هولندا.

89 International Energy Agency (IEA) — Methanol Technology Roadmap (2021)
https://www.iea.org/reports/methanol-technology-roadmap
90 IEA Clean Energy Transitions Program — The Role of Low-Carbon Methanol (2022)
https://www.iea.org/reports/the-role-of-low-carbon-methanol
91International Energy Agency (IEA), "Methanol Market Report 2023," IEA Publications, 2023.
92Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH, 2021.

الشكل (3-12)

مصنع شركة OCI لإنتاج الفورمالدهيد من الميثانول الأخضر في هولندا

المصدر: **Dutch ammonia and methanol producer OCI targets shipping**

كما تشمل المشاريع المهمة التي تعتمد على الميثانول كمادة وسيطة بها، مشروعات تصنيع الميثيل ثلاثي بيوتيل الإيثر **MTBE**[93] ، في هذا المجال يبرز مصنع **Lihuayi** في مدينة **Nanjing** بالصين، الذي بدأ الإنتاج عام 2018 بطاقة إنتاجية تبلغ 400 ألف طن سنويًا من الميثيل ثلاثي بيوتيل الإيثر باستخدام الميثانول الأزرق[94].

من الاستخدامات الواعدة أيضًا مشاريع تحويل الميثانول إلى أوليفينات **MTO**، التي تُمكّن من إنتاج بوليمرات منخفضة الانبعاثات الكربونية، متماشية مع المتطلبات البيئية الصارمة في الأسواق الأوروبية والآسيوية. تعد الصين رائدة في هذا المجال، حيث بنت مجموعة **Shenhua Energy** في مدينة **Ningxia** مصنعًا بطاقة إنتاجية تبلغ 800 ألف طن سنويًا بدأ التشغيل في 2016،[95] يعتمد في البداية على الميثانول المنتج من الفحم، وتعمل الآن على دمج الميثانول الأزرق ضمن عملياتها لتحسين الاستدامة. كما تولي شركة **BASF** اهتمامًا متزايدًا بمشروعات مماثلة في ألمانيا، خصوصًا في

93 Chevron Phillips Chemical Company, "MTBE Production and Applications," Technical Brochure, 2020.

94 European Commission, "Green Methanol: Technology and Market Outlook," 2023.

95Zhang, Q., et al. (2018). "Methanol to Olefins Technology and Its Industrial Application," Catalysis Today, 309, 2-10.

Ludwigshafen، مع خطط لتطوير مصنع **MTO** يستخدم الميثانول الأخضر بطاقة إنتاجية متوقعة تقارب 500 ألف طن سنويًا[96].

تتم عملية تحويل الميثانول إلى أوليفينات بتمريره عبر محفزات زيوليت متخصصة تعمل عند درجات حرارة تتراوح بين 400-500 درجة مئوية، حيث يتحلل الميثانول ويتحول إلى خليط من الأوليفينات والماء. تتميز هذه المحفزات بفعاليتها العالية في توجيه التفاعل نحو إنتاج نسب كبيرة من الإيثيلين والبروبيلين، وهما المنتجان الأكثر طلبًا في السوق العالمي. ورغم أن التفاعل ينتج خليطًا متنوعًا من الأوليفينات، إلا أن الإيثيلين والبروبيلين يشكلان الجزء الأكبر من الناتج النهائي، مما يجعل هذه التقنية خيارًا مثاليًا لتلبية احتياجات صناعة البتروكيماويات. ويمكن تبسيط المعادلات الكيميائية لهذه التفاعلات على النحو التالي: يتحول جزيئان من الميثانول إلى جزيء واحد من الإيثيلين مع إطلاق جزيئين من الماء، وفق المعادلة $2CH_3OH \rightarrow C_2H_4 + 2H_2O$، بينما يتطلب إنتاج البروبيلين تحلل ثلاث جزيئات من الميثانول لتكوين جزيء واحد من البروبيلين مع إطلاق ثلاث جزيئات ماء، كما هو موضح في المعادلة $3CH_3OH \rightarrow C_3H_6 + 3H_2O$

تعد تقنية **MTO** بديلاً مستدامًا وواعدًا عن الطرق التقليدية لإنتاج الأوليفينات المعتمدة على التكسير البخاري للنافثا، إذ تتيح إنتاجها من مصادر متجددة أو منخفضة الانبعاثات مثل الغاز الطبيعي أو الميثانول الأخضر، مما يقلل الاعتماد على النفط الخام ويعزز التنوع في المواد الخام المستخدمة في الصناعة الكيميائية. كما يساهم هذا التحول في تطوير الصناعات المحلية وفتح آفاق جديدة للاستفادة المثلى من الموارد المتاحة، لا سيما في الدول التي تمتلك إمكانات كبيرة في إنتاج الهيدروجين الأخضر أو في مشاريع احتجاز الكربون. وعلى المستوى التقني، يتطلب نجاح هذه العملية دقة في اختيار نوع المحفز وظروف التشغيل من درجة حرارة وضغط وزمن مكوث لضمان أعلى إنتاجية وانتقائية للأوليفينات المطلوبة مع تقليل تكوين المنتجات الثانوية غير المرغوبة، وهو ما يشكل مجالًا خصبًا للابتكار والتطوير المستمر في كيمياء التحفيز الصناعي.

96 BASF official press releases on MTO projects, 2023.

الاستنتاجات

1. البصمة الكربونية للميثانول التقليدي عالية جدًا، مما يجعله مصدرًا رئيسيًا لانبعاثات الكربون في قطاع الكيميائيات والبتروكيماويات، مع توقعات بزيادة هذه الانبعاثات بشكل حاد إذا استمر الاعتماد على الوقود الأحفوري.
2. يمثل الميثانول منخفض الكربون، بمختلف أنواعه (الأزرق والأخضر)، حلاً استراتيجيًا وضروريًا للتحول نحو اقتصاد طاقي مستدام ومنخفض الانبعاثات، مع تباين واضح في الانبعاثات والتكلفة بين هذه الأنواع.
3. التطور التكنولوجي في إنتاج الميثانول الأخضر لا يزال في مراحله الأولى، ويواجه تحديات اقتصادية وتقنية، لكن التوقعات تشير إلى تحسن مستمر في الجدوى الاقتصادية والتقنية بحلول منتصف القرن.
4. بدأت الدول العربية الأعضاء في أوابك تلعب دورًا متزايدًا في سوق الميثانول منخفض الكربون، مدفوعة بمبادرات وطنية طموحة وبرامج تنويع الطاقة.
5. يمتلك الميثانول منخفض الكربون إمكانيات كبيرة لاستخدامه كوقود بديل في قطاعات النقل المختلفة (البحري، الجوي، البري)، مستفيدًا من الخصائص البيئية والتقنية التي تسهل تقليل الانبعاثات، مع ضرورة تطوير البنية التحتية والتقنيات الداعمة.
6. الإطار التشريعي والتنظيمي الدولي يشكل دافعًا رئيسيًا للتحول نحو الوقود المستدام، ويبرز الميثانول كخيار محوري يتماشى مع متطلبات المنظمات الدولية مثل IMO و ICAO والاتحاد الأوروبي.
7. يلعب الميثانول دورًا مهمًا في صناعة البتروكيماويات كمادة وسيطة أساسية لإنتاج مواد كيميائية صديقة للبيئة، مما يعزز فرص التحول إلى صناعات كيميائية أكثر استدامة.

التوصيات

1. تعزيز الدعم الحكومي والمؤسسي لتقنيات إنتاج الميثانول الأخضر والأزرق من خلال توفير التمويل المناسب، ودعم البحث والتطوير، وتشجيع الابتكار لخفض التكاليف وتحسين الكفاءة التقنية، مع التركيز على مسارات التحليل الكهربائي واحتجاز الكربون.
2. تحفيز الاستثمارات الخاصة عبر شراكات فعالة بين القطاعين العام والخاص، لزيادة حجم التمويل وتوسيع نطاق مشاريع الميثانول منخفض الكربون، مع تقديم حوافز مالية وتنظيمية لجذب المستثمرين المحليين والدوليين.
3. دمج مشاريع الميثانول ضمن الاستراتيجيات الوطنية للطاقة والتنمية المستدامة في دول أوابك، لضمان التوافق مع أهداف الحياد الكربوني ورؤية 2030، مع تبني سياسات واضحة تشجع على تنويع مصادر الطاقة وتعزيز الاستدامة.
4. بناء منصات لأسواق الكربون وتوفير بيانات شفافة لتتبع الانبعاثات وخفضها، مما يساهم في خلق بيئة موثوقة للاستثمار في تقنيات الميثانول منخفض الكربون ويحفز الأسواق المالية على دعم المشاريع المستدامة.
5. توجيه جزء من برامج الدعم الصناعي والابتكار لتطوير تقنيات التحليل الكهربائي منخفضة التكلفة وكفاءة التقطير، بهدف تحسين الجدوى الاقتصادية لمشاريع الميثانول الأخضر وزيادة تنافسيتها في الأسواق الإقليمية والعالمية.
6. تقييم دوري لأسواق الميثانول منخفض الكربون ومستويات التكلفة لتعزيز التنافسية، مع وضع خطط تحفيزية لضمان انتقال سلس من الميثانول التقليدي إلى الأنواع النظيفة، مما يدعم أهداف التنمية المستدامة والاقتصاد الأخضر.
7. تطوير الأطر التنظيمية الوطنية والتشريعات الداعمة لاستخدام الميثانول منخفض الكربون في مختلف القطاعات الصناعية والطاقة، بما يتماشى مع المعايير الدولية ومتطلبات الاتفاقيات البيئية.

8. وضع أطر تنظيمية وتشجيعية لاستخدام الميثانول في قطاع النقل البحري والبري، تشمل تحديث القوانين والتشريعات لتسهيل تبني الميثانول كوقود بديل، إلى جانب تطوير البنية التحتية اللازمة لتخزين وتوزيع الميثانول بأمان وكفاءة.
9. تعزيز التعاون الدولي والإقليمي في مجال تقنيات احتجاز الكربون وإعادة استخدام ثاني أكسيد الكربون، من أجل تبادل المعرفة وتحسين الجدوى الاقتصادية وتقليل البصمة الكربونية لصناعة الميثانول.
10. تنظيم حملات توعية ومبادرات تدريبية للقطاعات الصناعية والنقل حول فوائد الميثانول منخفض الكربون وأفضل الممارسات البيئية والتقنية، لرفع مستوى الوعي وضمان الاستخدام الآمن والمستدام.

المراجع

1. ABS. (2021). *Methanol as a Marine Fuel: Sustainability Whitepaper*. ABS. Retrieved November 19, 2022, from https://www.eagle.org

2. Agarwal, A. K., & Mustafi, N. N. (2021). Real-world automotive emissions: Monitoring methodologies, and control measures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 137*, 110624.

3. Al-Qahtani, A., González-Garay, A., Bernardi, A., Galán-Martín, Á., Pozo, C., Mac Dowell, N., ... & Gozalez, G. (2020).

4. Electricity grid decarbonisation or green methanol fuel? A life-cycle modelling and analysis of today's transportation-power nexus. *Applied Energy, 265*, 114718.

5. Alvarado, M. (2017). Methanol Industry Overview. Presented at the *35th World Methanol Conference*, Berlin, Germany: IHS.

6. Baresic, D., Rojon, I., Shaw, A., & Rehmatulla, N. (2022). *Closing the Gap: An Overview of the Policy Options to Close the Competitiveness Gap and Enable an Equitable Zero-Emission Fuel in Shipping*. University Maritime Advisory Service (UMAS).

7. Blue World. (n.d.). Market Applications: Maritime. Retrieved November 19, 2022,

8. Bos, M. J., Kersten, S. R. A., & Brilman, D. W. F. (2020). Wind power to methanol: Renewable methanol production using electricity, electrolysis of water and CO_2 air capture. *Applied Energy, 264*, 114672.

9. Bromberg, L., & Cheng, W. K. (2010). *Methanol as an Alternative Transportation Fuel in the US: Options for Sustainable and/or Energy-Secure Transportation*. Sloan Automotive Laboratory, Massachusetts Institute of Technology.

10. Brynolf, S., Grahn, R., Korberg, A., & Skov, I. (2021, May). [Incomplete Reference – Please provide complete source details].

11. Buitendijk, M. (2020, March 10). Waterfront Shipping: 'Methanol as a marine fuel works'. Retrieved November 19, 2022, from https://www.waterfront-shipping.com

12. Butera, G., Gadsbøll, R. Ø., Ravenni, G., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U. B., & Clausen, L. R. (2020). Thermodynamic analysis of methanol synthesis combining straw gasification and electrolysis. Energy, 199, 117405.
13. Campbell, M., Davies, A., MacLean, G., Martin, C., Raugei, M., & Scammell, H. (2021). Report for the Study on Sustainability Criteria and Life Cycle GHG Emission Assessment Methods and Standards for Alternative Marine Fuels. Ricardo Energy & Environment.
14. China National Petroleum Corporation. (2019). Oil and Gas Imports in 2018. Economics and Technology Research Institute.
15. Concawe. (2019, March). A look into the maximum potential availability and demand for low-carbon feedstocks/fuels in Europe (2020–2050) (Literature review). Concawe Review, 27(2).
16. Dankner, G. (2017). Methanol as a Fuel Alternative. Washington Methanol Policy Forum.
17. Danelec. (n.d.). The relation between EEXI, EEDI and Shaft Power Limiters. Retrieved February 2, 2023, from https://www.danelec.com
18. Dolan, G. (2005). Methanol transportation fuels: A look back and a look forward. In Proceedings of the International Symposium on Alcohol Fuels, San Diego, CA, USA.
19. Dolf, G., & Roser, D. (2022). Renewable Methanol Report: Technology and Policy Review 2022. Methanol Institute. Retrieved from https://www.methanol.org
20. EIA. (2022). Annual Energy Outlook 2022. U.S. Energy Information Administration (EIA).
21. European Commission. (2021). Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on the Use of Renewable and Low-Carbon Fuels in Maritime Transport. COM(2021) 562 final.
22. European Commission. (2021). Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council Amending Directive 2003/87/EC Establishing a System for Greenhouse Gas Emission Allowance Trading. COM(2021) 551 final.

23. Haglind, F. (2019). Energy efficient ship propulsion and power systems – Current status and future challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 98, 30–40.
24. Hall, D., & Lutsey, N. (2019). Low-carbon fuel standards: Impacts and innovations. The International Council on Clean Transportation (ICCT).
25. Hansen, C. H., & Winther, M. (2022). Life Cycle Assessment of Marine Fuels: A comparison between methanol and conventional marine fuels. Energy Conversion and Management, 256, 115368.
26. HyNetherlands. (2022). Green Hydrogen and Methanol Project Summary. Retrieved from https://www.hynetherlands.com
27. IMO. (2018). Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. International Maritime Organization, MEPC 72/17/Add.1.
28. IMO. (2021). Fourth IMO GHG Study 2020. International Maritime Organization.
29. International Energy Agency. (2021). Methanol: A Future-Proof Fuel. Retrieved from https://www.iea.org
30. International Maritime Organization. (2020). Amendments to MARPOL Annex VI. MEPC 75/18/Add.1.
31. JEC. (2020). Well-to-Tank Report Version 5.0 – JEC Well-to-Wheels Analysis: Well-to-Tank Report. Joint Research Centre, EUCAR, and CONCAWE.
32. Jiang, Y., Li, K., & Zhang, W. (2021). Economic analysis of methanol as marine fuel in China's coastal shipping. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 94, 102799.
33. Kätelhön, A., Schmeda-Lopez, D., Held, M., Bauknecht, S., & Suh, S. (2019). Climate impact of basic chemicals. Environmental Science & Technology, 53(22), 13168–13181.
34. Kim, J., Park, M. J., Kim, H., Kim, H., & Lee, J. (2022). Techno-economic and environmental assessment of green methanol production using renewable energy. Renewable Energy, 181, 1063–1075.
35. Koottungal, L. (2014). World's top 10 methanol producers. Oil & Gas Journal, 112(3), 76–77.

36. Kristensen, H. O. (2021). GHG Reduction Potentials from the Use of Methanol as Marine Fuel. DTU Technical University of Denmark.
37. Lang, C., & Maroufmashat, A. (2021). Comparative study on green methanol production pathways for use as a marine fuel. International Journal of Hydrogen Energy, 46(35), 18106–18118.
38. Lindstad, H. E., & Eskeland, G. S. (2016). Methanol as an alternative marine fuel – a lifecycle perspective. Transportation Research Part D, 47, 32–47.
39. Lloyd's Register. (2021). Methanol as Marine Fuel – Future Opportunities and Challenges. Retrieved from https://www.lr.org
40. MAN Energy Solutions. (2021). Methanol Engines: Technical Paper Series. Retrieved from https://www.man-es.com
41. Methanex. (2022). Methanol Marine Fuel: Case Studies and Deployment. Retrieved from https://www.methanex.com
42. Methanol Institute. (2021). Renewable Methanol – Carbon Recycling Fuel for the Future. Retrieved from https://www.methanol.org
43. Ministry of Energy Saudi Arabia. (2021). Saudi Vision 2030 and Clean Fuel Strategies. Retrieved from https://www.meim.gov.sa
44. Nunes, L. J. R., Causer, T., & Ciolkosz, D. (2020). Bioethanol: An emerging biofuel option for shipping. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 119, 109551.
45. OECD/IEA. (2020). Outlook for Advanced Marine Fuels. International Energy Agency.
46. Oxford Institute for Energy Studies. (2021). Alternative Fuels for Shipping – The Outlook for Ammonia and Methanol. Retrieved from https://www.oxfordenergy.org.
47. Patel, M., & Kätelhön, A. (2021). Renewable methanol: feedstocks, production, and pathways to market. *Chemical Engineering Journal, 417*, 129209.
48. Rehmatulla, N., Smith, T., & Tibbles, L. (2017). The viability of methanol as a marine fuel. *Journal of Marine Science and Technology, 22*(1), 101–113.
49. REN21. (2022). *Renewables 2022 Global Status Report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Retrieved from https://www.ren21.net

50. Royal Society. (2019). *Synthetic fuels in a low-carbon economy*. London: The Royal Society.

51. SAFIRE Project. (2021). *Sustainable Aviation Fuel Innovation and Research*. Retrieved from https://www.safire-h2020.eu

52. Scarlat, N., Dallemand, J. F., Monforti-Ferrario, F., & Nita, V. (2015). The role of biomass and bioenergy in a future bioeconomy: Policies, facts and uncertainties in the EU-28. *Renewable Energy, 76*, 3–13.

53. Sea Europe. (2020). *Methanol as Marine Fuel: Sectorial Opportunities*. Retrieved from https://www.seaeurope.eu

54. Siemens Energy. (2021). *Power-to-X Solutions for Methanol Production*. Retrieved from https://www.siemens-energy.com

55. Smith, T. W. P., Jalkanen, J. P., Anderson, B. A., Corbett, J. J., Faber, J., Hanayama, S., ... & Pandey, A. (2015). *Third IMO GHG Study 2014*. International Maritime Organization.

56. Sorensen, P., & Reitz, R. (2018). Methanol combustion in advanced engines: Pathways to higher efficiency. *Progress in Energy and Combustion Science, 65*, 271–309.

57. Statkraft. (2021). *Green Hydrogen and Methanol Projects Overview*. Retrieved from https://www.statkraft.com

58. Stenersen, D., & Thonstad, O. (2017). GHG and NOx emissions from gas fuelled engines. *Emission Control Science and Technology, 3*(1), 16–25.

59. Sustainable Shipping Initiative. (2021). *The Role of Methanol in the Decarbonisation of Shipping*. Retrieved from https://www.ssi2040.org

60. Tang, C., Xu, L., & Lin, R. (2020). Production of green methanol from CO_2 and H_2: Techno-economic challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 123*, 109722.

61. Topsoe. (2022). *Hydrogen and E-Methanol Technologies*. Retrieved from https://www.topsoe.com

62. UNCTAD. (2022). *Review of Maritime Transport 2022*. United Nations Conference on Trade and Development. Retrieved from https://unctad.org

63. UNEP. (2021). *Green Hydrogen and Methanol in Emerging Economies*. United Nations Environment Programme.

64. UNIDO. (2022). *Green Fuels for Industry: Policy Guidelines and Case Studies*. United Nations Industrial Development Organization.

65. UPM Biofuels. (2021). *Bio-Methanol from Pulp Production*. Retrieved from https://www.upmbiofuels.com

66. van Hoecke, L., Bossche, G. V., & Lievens, L. (2021). Methanol as a future fuel for ships: Overview and case studies. *Journal of Cleaner Production, 291*, 125849.

67. Vickers, J., & Christensen, A. (2021). *Techno-Economic Analysis of Methanol from Electrolysis and Biomass*. National Renewable Energy Laboratory (NREL).

68. Wärtsilä. (2022). *Methanol Engines and Dual-Fuel Technologies*. Retrieved from https://www.wartsila.com

69. Weng, D., Tan, T., & Liu, D. (2019). Assessment of methanol as a marine fuel: From production to end use. *Fuel Processing Technology, 194*, 106110.

70. World Bank. (2021). *The Role of Hydrogen and Methanol in Shipping Decarbonisation*. Retrieved from https://www.worldbank.org

71. World Economic Forum. (2022). *Clean Fuels for Transport and Industry*. Retrieved from https://www.weforum.org

72. WRI. (2021). *Decarbonizing Shipping: Methanol Pathways*. World Resources Institute. Retrieved from https://www.wri.org

73. Wu, W., Li, K., & Chen, H. (2020). Techno-economic analysis of renewable methanol production pathways. *Journal of Cleaner Production, 255*, 120287.

74. Xu, Y., Wang, M., & Zhou, Y. (2020). Carbon footprint of renewable methanol production from CO_2 and green hydrogen. *Applied Energy, 265*, 114763.

75. Yara Clean Ammonia. (2022). *Partnerships in Methanol Shipping Fuel*. Retrieved from https://www.yaracleanammonia.com

76. Zhang, H., Zhang, X., & Yu, C. (2021). Environmental impacts and GHG emissions from methanol as marine fuel. *Marine Policy, 124*, 104342.

77. Zhang, Y., Jiang, W., Wang, Y., & Liu, X. (2021). Prospects of bio-methanol as a renewable fuel for shipping. *Renewable Energy, 175*, 231–244.

78. Zhao, B., Guo, L., & Li, J. (2020). Economic feasibility of e-methanol as a shipping fuel in Europe. *International Journal of Shipping and Transport Logistics, 12*(3), 237–254.

79. Zero Emission Platform. (2021). *Carbon Capture and Renewable Methanol Production*. Retrieved from https://www.zeroemissionsplatform.eu

80. Zhang, Z., Liu, Z., & Gao, W. (2022). Optimization of green methanol supply chains in the EU. *Energy, 238*, 121725.

81. Zhen, X., & Wang, Y. (2019). A review on methanol as a promising alternative fuel for internal combustion engines. *Fuel, 253*, 1155–1168.

82. Zhou, Y., Wang, X., & Xu, Y. (2021). Life cycle assessment of marine fuels: Conventional vs green methanol. *Journal of Cleaner Production, 290*, 125776.

83. Zhu, M., & Gao, X. (2022). Modeling global supply chains for e-methanol. *Sustainable Production and Consumption, 30*, 190–200.

84. Zwart, R. W. R., Boerrigter, H., & Van der Drift, A. (2006). The role of biomass-derived methanol in the energy system. *Biomass and Bioenergy, 30*(5), 400–407.

The Role of Low Carbon Methanol in Energy Transition

Abstract

Cleaner and more sustainable energy sources have become an urgent necessity rather than a deferred option. This global imperative underscores the critical need to strike a balance between economic growth, energy security, and environmental protection. Within this context, international environmental policies and regulatory frameworks have emerged as powerful drivers, reshaping the global energy landscape by steering investments and innovation toward low-emission solutions aligned with both national interests and international climate commitments.

Alternative fuels have gained significant traction as essential enablers of a low-carbon economy. Among these, methanol—in its various forms, particularly green and blue—has emerged as a highly promising solution that combines environmental performance, technical flexibility, and economic viability. Unlike some alternatives that require substantial infrastructure overhaul, low-carbon methanol can be integrated into existing systems, making its adoption more practical and cost-effective. Accordingly, many countries have implemented supportive policies to accelerate the deployment of methanol as a strategic element in their clean energy transitions.

The strategic importance of low-carbon methanol lies in its dual contribution: it plays a key role in decarbonizing emission-intensive sectors such as transport and heavy industry, while also supporting circular economy models through enhanced resource efficiency and

value chain integration across the energy and materials sectors. Guided by this vision, **the present study aims to** analyze the technical and economic potential of green and blue methanol, and to explore their pivotal role in enabling sustainable energy transitions, in alignment with global climate commitments and the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs).

Executive Summary

Amid the growing global focus on transitioning to low-carbon energy sources, this study offers a comprehensive analysis of the production and utilization of low-carbon methanol from scientific, technical, and strategic perspectives, with a particular emphasis on exploring development opportunities in OAPEC member countries. The study is organized into three main chapters, each addressing a specific axis within the low-carbon methanol value chain to ensure holistic coverage of its production, use, and development.

Chapter One: Carbon Footprint Assessment and Economic Feasibility of Low-Carbon Methanol Production

Conventional methanol, primarily derived from coal or natural gas, faces increasing environmental scrutiny due to its high carbon footprint. In 2024, conventional methanol production contributed nearly 10% of total emissions from the global chemicals and petrochemicals sector, amounting to 0.3 gigatons of CO2 annually from around 110 million tons of methanol. Projected growth to 500 million tons annually by 2050 raises concerns about the climatic impact if fossil-based production continues, potentially driving emissions over 1.5 gigatons of CO2 annually.

Low-carbon methanol offers a strategic alternative for emission reduction and sustainability, with two key pathways: blue methanol, using natural gas combined with carbon capture and storage (CCS), and green methanol, produced entirely from renewable sources via electrolysis or biomass conversion. Methanol is categorized into four types based on production source and technology: brown (from coal,

highest emissions), grey (from natural gas), blue (natural gas + CCS), and green (from renewables/biomass, lowest emissions).

Carbon footprint estimations rely on detailed models considering mass and energy balances, and emissions across the full value chain. Green methanol can reduce CO2 emissions by up to 95%, nitrogen oxides by 80%, and virtually eliminate sulfur and particulate emissions. Despite these advantages, global production remains limited to 0.2 million tons for bio-methanol, and electro-methanol projects are still experimental due to high costs and technical complexity.

Production cost is heavily influenced by the prices of CO2 and hydrogen. For BECCS-derived CO2 ($10-50/ton), production costs range from $800-1600/ton. For DAC ($300-600/ton), costs rise to $1200-2400/ton. Direct CO2-to-methanol conversion is in early stages, with preliminary cost estimates ranging from $11.2 to $17.26/kg depending on process efficiency. Technological advancements, increased investment, and supportive policy frameworks are expected to improve competitiveness by 2050, enabling green methanol to become a key component of the future sustainable energy mix.

Chapter Two: Global Experiences and Arab Initiatives in Low-Carbon Methanol Production

Production of green and blue methanol is expanding rapidly, driven by emission reduction goals and sustainability efforts. As of November 2024, nearly 190 active projects globally have been tracked, aiming for a cumulative production capacity of 39.9 million tons by 2030: 18.7 million tons from electro-methanol, 13.1 from bio-methanol, and 8.1 from blue

methanol. Bio-methanol projects lead in implementation due to technical maturity, while many blue methanol projects remain in planning stages.

Geographically, China leads in project count, followed by Europe and North America. Arab nations, including Saudi Arabia, the UAE, and Egypt, have entered the market as part of national energy diversification strategies. By 2050, methanol markets are expected to undergo structural shifts with significant growth across all low-carbon pathways: bio (30-40 million tons), electro (70-90 million tons), and blue (40-50 million tons). The Arab region is projected to contribute 15-20% of global bio-methanol output, driven by abundant biomass residues, and 50-60% of electro-methanol output, supported by renewable energy resources and low green hydrogen costs. Arab contributions to blue methanol may reach 20-30% due to gas reserves and CCS infrastructure.

Key projects include Saudi Arabia's NEOM green hydrogen plant, Egypt's Ain Sokhna economic zone, and UAE clean energy initiatives. Strategic visions such as Saudi Arabia's Vision 2030, UAE Energy Strategy 2050, and Egypt's green hydrogen roadmap provide crucial momentum for these developments.

Chapter Three: Role of Policies and Technologies in Enhancing Low-Carbon Methanol Use in Transport and Industry

Comprehensive environmental policies and clean technologies have emerged as pillars of the global shift toward a low-carbon economy, supported by legislative frameworks, financial incentives, and international programs. Low-carbon methanol has proven to be a viable

solution with operational and environmental advantages, integrating easily into existing energy systems without requiring major infrastructure changes, unlike hydrogen or ammonia.

Global climate agreements and regulatory trends have transformed the maritime sector, favoring low-emission fuels. Methanol stands out due to its lower carbon footprint, minimal retrofit requirements, and compliance with MARPOL Annex VI standards on SOx, NOx, and particulate emissions. In road transport, EU emission standards like Euros 6 and 7 have driven innovation, with methanol used in blends (M15 to M85) or as a neat fuel, as seen in China's large-scale program reducing urban pollution.

In aviation, methanol serves as a precursor for synthetic jet fuel via Fischer-Tropsch or Methanol-to-Gasoline technologies, aligned with ICAO's CORSIA and the EU's ReFuelEU mandates. Technically, methanol's high oxygen content enables cleaner combustion, though its lower energy density poses storage challenges. Industrially, methanol is a precursor to key chemicals such as acetic acid, formaldehyde, and olefins. Integrating low-carbon methanol into these supply chains enhances sustainability across the petrochemical sector.

Low-carbon methanol is thus a versatile strategy supporting decarbonization, economic viability, and environmental integrity across sectors.

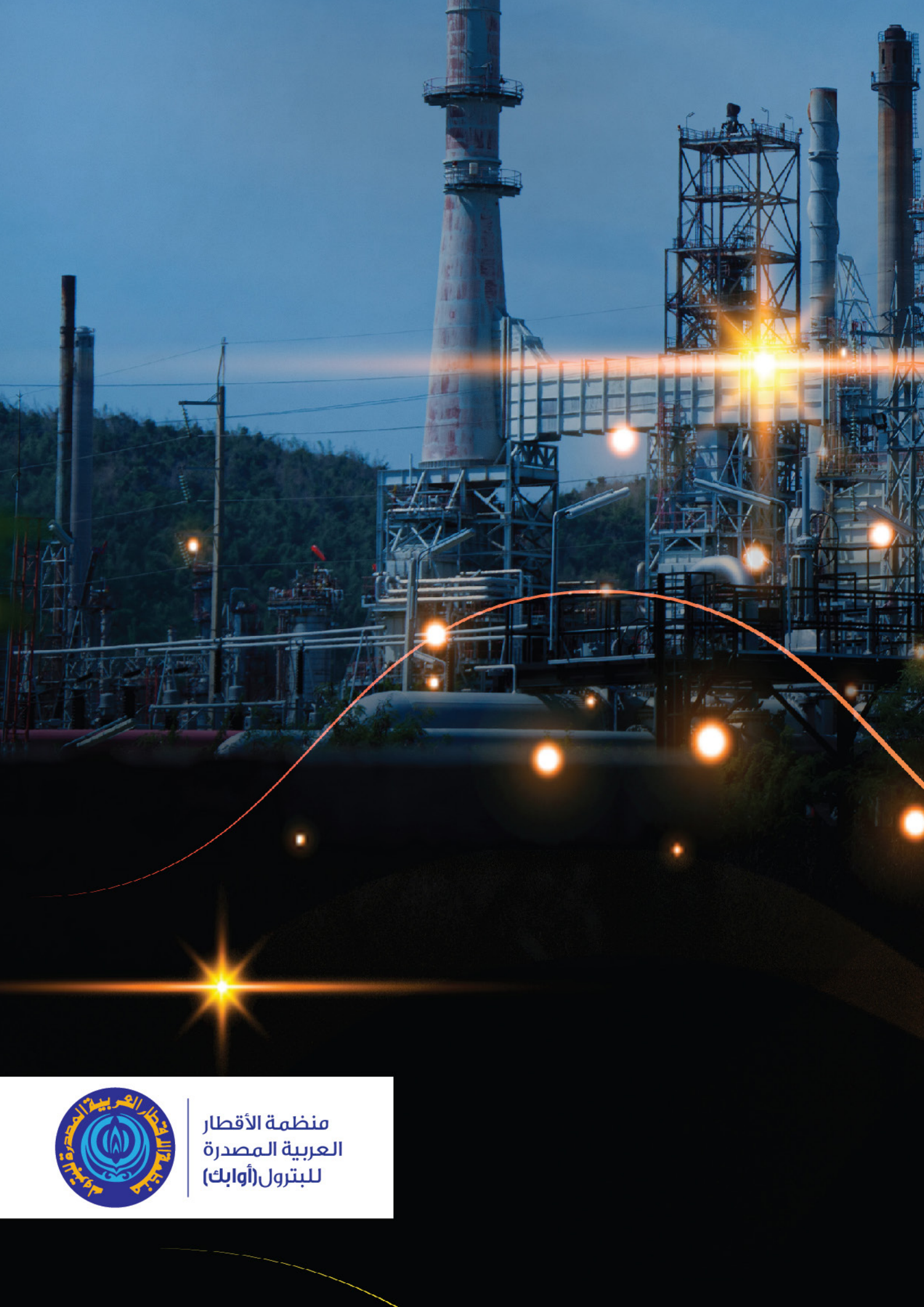
Conclusions:

1. Conventional methanol has a high carbon footprint, with rising emissions projected unless fossil dependence is reduced.
2. Low-carbon methanol (green and blue) offers a strategic solution for sustainable, low-emission energy transitions.
3. It shows strong potential as an alternative fuel for transport, contingent on supportive infrastructure and technology.
4. Methanol plays a key role in sustainable petrochemical production.
5. Electro-methanol technologies remain early-stage but expected to become more viable by mid-century.
6. International regulations drive adoption of sustainable fuels; methanol aligns with IMO, ICAO, and EU standards.
7. OAPEC member states are playing a growing role through national strategies and energy diversification efforts.

Recommendations:

1. Increase institutional support and R&D funding for green and blue methanol technologies, especially low-cost electrolysis and CCS.
2. Promote public-private partnerships and offer incentives to attract investment in methanol projects.
3. Integrate methanol into national energy and sustainability strategies, including market assessments and policy support.
4. Develop carbon market platforms and transparent emissions tracking systems to support investment and innovation.

5. Update national regulations to facilitate methanol adoption in energy and transport sectors, including infrastructure development.
6. Enhance regional and international cooperation on CCS and CO2 reuse to improve economic viability and reduce the carbon footprint of methanol production.



منظمة الأقطار
العربية المصدرة
للبترول (أوابك)