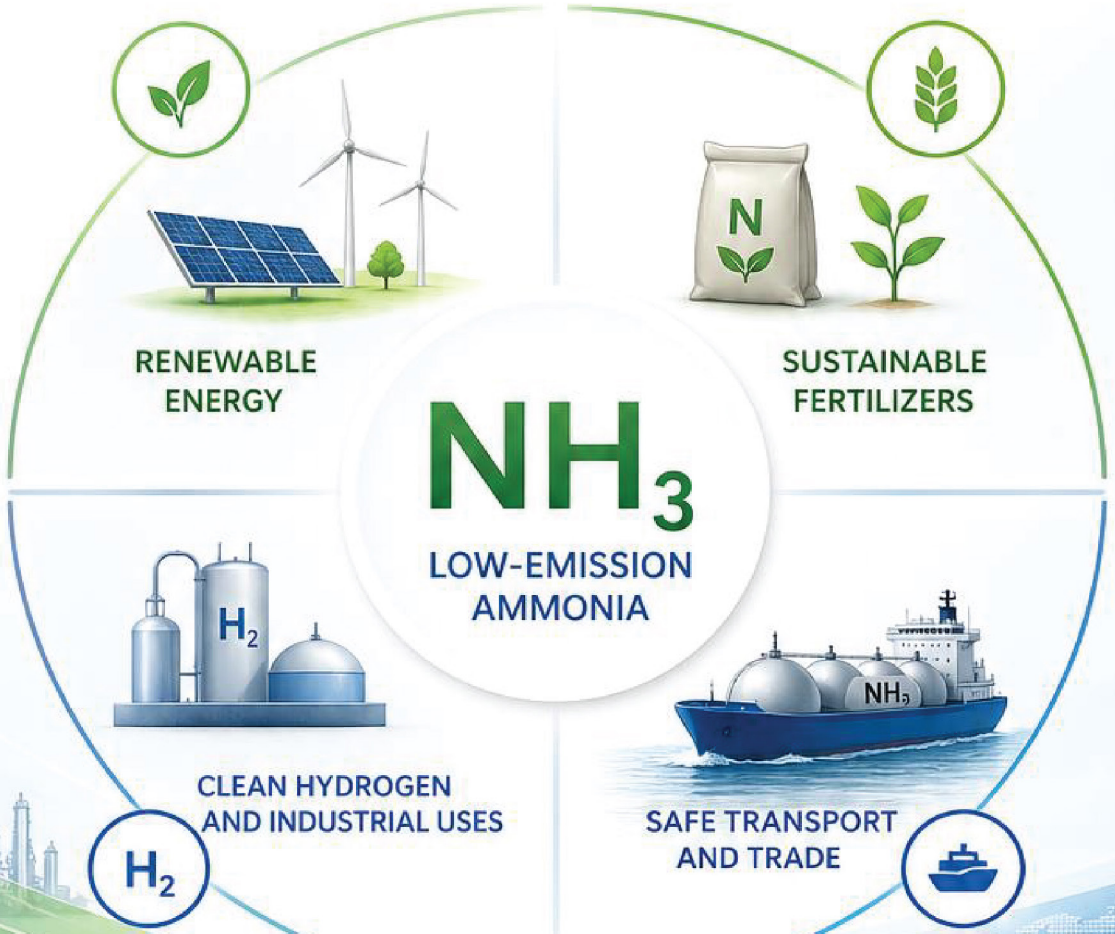
منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

الأمونيا منخفضة الانبعاثات ودورها في دعم التحول الطاقي وتعزيز استدامة إنتاج الأسمدة

Low-Emission Ammonia:
Enabling Energy Transition and Sustainable Fertilizer Systems



إعداد: د. ياسر محمد بغدادي
خبير أول صناعات نفطية – الشؤون الفنية – أوابك

الكويت – مايو 2026

Prepared by: Dr. Yasser Mohammed Boghdadi
Senior Oil Industries Expert – Technical Affairs Department – OAPEC

Kuwait – May 2026

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.**

2026

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-13066- Kuwait.

Tel.: (+965) 24959000

Fax. :(+965) 24959755

البريد الإلكتروني: oapec@oapecorg.org

الموقع الإلكتروني: www.oapecorg.org

مقدمة

شهد نظام الطاقة العالمي خلال العقد الأخير تحولاً هيكلياً متسارعاً، مدفوعاً بتحديات متزايدة تتعلق بتغير المناخ، وأمن الإمدادات، واستدامة الموارد، الأمر الذي فرض إعادة توجيه أنماط الإنتاج والاستهلاك نحو مسارات أكثر كفاءة وأقل كثافة في الانبعاثات. في هذا السياق، برزت بعض المواد الصناعية بوصفها عناصر ربط استراتيجية بين قطاعات الطاقة والصناعة والغذاء، وفي مقدمتها الأمونيا، التي أخذت تكتسب دوراً متنامياً ضمن هذه المنظومة المتكاملة.

تحوّل موقع الأمونيا ضمن منظومة الطاقة العالمية بصورة نوعية، إذ لم تعد تقتصر على دورها التقليدي في إنتاج الأسمدة، بل برزت كأحد الخيارات الواعدة في سياق التحول نحو اقتصاد منخفض الكربون. ويعزى ذلك إلى تعدد استخداماتها، حيث يمكن توظيفها كوقود بديل في القطاعات صعبة خفض الانبعاثات، مثل النقل البحري والصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة، فضلاً عن دورها كحامل للهيدروجين يتيح نقله وتخزينه بكفاءة أعلى، لا سيما عبر سلاسل الإمداد طويلة المسافة.

رغم هذه الإمكانات، لا يزال توظيف الأمونيا في دعم التحول الطاقي يواجه تحديات هيكلية، في مقدمتها ارتفاع كثافة الانبعاثات المرتبطة بمسارات الإنتاج التقليدية المعتمدة على الغاز الطبيعي أو الفحم. ومن ثم، يرتبط تعظيم دورها المستقبلي بتسريع تبني مسارات إنتاج منخفضة الانبعاثات، وفي مقدمتها الأمونيا الزرقاء المدعومة بتقنيات احتجاز وتخزين الكربون، والأمونيا الخضراء القائمة على الهيدروجين المنتج باستخدام الكهرباء المتجددة، ضمن أطر سياسات متكاملة تدعم الابتكار وتحفّز الاستثمار في البنية التحتية وسلاسل القيمة المرتبطة بها.

في هذا الإطار، تبرز أهمية الدور الذي يمكن أن تضطلع به الدول العربية، ولا سيما الدول الأعضاء بأوابك، في ضوء ما تمتلكه من مزايا تنافسية تشمل وفرة موارد الغاز الطبيعي، وتنامي إمكانات الطاقة المتجددة، إلى جانب موقعها الجغرافي القريب من مراكز الطلب العالمية. وتوفر هذه المقومات فرصاً واعدة لتعزيز موقعها ضمن سلاسل القيمة العالمية للأمونيا منخفضة الانبعاثات، سواء على مستوى الإنتاج أو التصدير أو الاستخدامات النهائية.

تهدف هذه الدراسة إلى تقديم تحليل متكامل لدور الأمونيا في سياق التحول نحو نظم طاقة منخفضة الانبعاثات، من خلال استعراض استخداماتها المختلفة وترتيبها وفق أهميتها الحالية والمستقبلية، بدءاً من دورها في صناعة الأسمدة، مروراً باستخداماتها الصناعية، وصولاً إلى تطبيقاتها الناشئة في قطاعي الطاقة والنقل.

تتوزع الدراسة على أربعة فصول رئيسية؛ يستعرض الفصل الأول تطور صناعة الأمونيا ومسارات إنتاجها، مع تحليل الفروق التقنية والاقتصادية بين هذه المسارات. ويركز الفصل الثاني على هيكل السوق العالمي للأمونيا وأنماط العرض والطلب والتجارة الدولية. أما الفصل الثالث، فيتناول استخدامات الأمونيا في قطاع الشحن البحري ودورها كحامل للهيدروجين في إطار التحول نحو سلاسل إمداد طاقة منخفضة الانبعاثات، بينما يستعرض الفصل الرابع دورها في صناعة الأسمدة وعلاقتها بالأمن الغذائي، مع تحليل كفاءة استخدام النيتروجين والتحديات البيئية المرتبطة بها.

خلصت الدراسة إلى أن الأمونيا مرشحة للعب دور محوري في إعادة تشكيل منظومتي الطاقة والصناعة خلال العقود المقبلة، باعتبارها عنصراً يربط بين أمن الطاقة والأمن الغذائي في ظل تسارع التحول نحو مسارات منخفضة الانبعاثات. ومع ذلك، لا يزال هذا التحول يواجه تحديات فنية واقتصادية وتنظيمية، تشمل ارتفاع التكاليف، والحاجة إلى تطوير البنية التحتية للنقل والتخزين، ومحدودية الأطر التنظيمية، بما يستدعي تعزيز التنسيق الدولي وتبني سياسات داعمة لتسريع وتيرة التحول والانتشار التجاري للتقنيات المرتبطة بالأمونيا منخفضة الانبعاثات.

وتأمل الأمانة العامة أن توفر هذه الدراسة إطاراً تحليلياً يساعد المختصين وصناع القرار على تقييم الفرص والتحديات المرتبطة بتطور صناعة الأمونيا، ودورها المتنامي في التحول نحو نظم طاقة وصناعة أكثر استدامة.

والله ولي التوفيق،،،

الأمين العام

المهندس خالد العتيبي

قائمة المحتويات

مقدمة 3

قائمة المحتويات 5

قائمة الاشكال 8

قائمة الجداول 9

قائمة المصطلحات والاختصارات 10

الملخص التنفيذي 13

الفصل الأول: تطور صناعة الأمونيا ومسارات إنتاجها في ظل التحول العالمي نحو نظم الطاقة منخفضة الكربون 16

مقدمة 16

1.1. خلفية تاريخية 17

2.1. مسارات إنتاج الأمونيا في ظل التحول منخفض الكربون 20

1.2.1. الأمونيا البنية Brown Ammonia 22

2.2.1. الأمونيا الرمادية Grey Ammonia 24

3.2.1. الأمونيا الزرقاء Blue Ammonia 26

4.2.1. الأمونيا الخضراء Green Ammonia 28

1.4.2.1. كفاءة منظومة الأمونيا الخضراء 30

3.1. كثافة استهلاك الطاقة والانبعاثات في صناعة الأمونيا ومحدداتها 32

4.1. التجارة الدولية وهيكل الأصول الصناعية كعوامل محدِّدة للبصمة الكربونية ومسار خفض الانبعاثات 34

5.1. التقنيات الناشئة لإنتاج الأمونيا منخفضة الكربون 36

1.5.1. تقنية محفزات الذرة المفردة (Single-Atom Catalysts – SACs) 37

2.5.1. تقنية التحفيز الضوئي البلازموني (Plasmonic Photocatalysis) 39

3.5.1. تقنية المسارات الكهروكيميائية لإنتاج الأمونيا 40

الفصل الثاني: هيكل سوق الأمونيا العالمي والتحولات التنافسية 44

مقدمة 44

1.2. تطور نمو الإنتاج العالمي للأمونيا ومحركاته الهيكلية والتنافسية 44

2.2. التوزيع الجغرافي للإنتاج ومراكز النمو 46

2.2.2. دور المشهد التنافسي وهيكل الشركات في نمو الإنتاج 47

3.2.2. تكاليف إنتاج الأمونيا (الفجوة بين المسارات التقليدية والمنخفضة الكربون) 49

4.2.2. تأثير أزمة الطاقة في أوروبا على إنتاج الأمونيا 50

3.2. تطور الطلب العالمي على الأمونيا ومحركاته الهيكلية 52
1.3.2. تحليل السوق حسب المنتج والاستخدام وأثره في نمو الإنتاج 52
2.3.2. آفاق نمو الطلب حتى عام 2030 54
3.3.2. سيناريوهات الطلب حتى 2050 55
4.2. توازن السوق بين الإنتاج والاستهلاك 55
5.2. تطور أسعار الأمونيا في الأسواق العالمية 56
6.2. سوق الأمونيا العالمي والتحول منخفض الانبعاثات (آفاق 2030) 57
7.2. التحديات الرئيسية في سوق الأمونيا العالمي 58
الفصل الثالث: دور الأمونيا في الشحن البحري ومنظومة نقل الهيدروجين منخفض الكربون 61
مقدمة 61
1.3. دور الأمونيا في قطاع النقل البحري وإزالة الكربون 61
2.3. فرص استخدام الأمونيا كوقود بحري 64
2.2.3. تطور الأسطول البحري العامل بالأمونيا 65
3.2.3. تطور البنية التحتية للتزويد بالأمونيا 68
3.3. التحديات التقنية والتنظيمية والاقتصادية لاستخدام الأمونيا كوقود بحري 69
1.3.3. التحديات التقنية 70
1.1.3.3. كثافة الطاقة ومتطلبات التخزين 70
2.1.3.3. انبعاثات أكاسيد النيتروجين وانبعاث الأمونيا غير المحترقة 71
2.3.3. تحديات السلامة وإدارة المخاطر 71
1.2.3.3. السمية والخصائص الفيزيائية 72
2.2.3.3. مخاطر التسرب وانتشار الغاز 72
3.2.3.3. متطلبات السلامة التشغيلية في استخدام الأمونيا كوقود بحري 75
3.3.3. التحديات التنظيمية لاستخدام الأمونيا كوقود بحري 76
4.3.3. تحديات البنية التحتية وسلاسل الإمداد 79
5.3.3. التحديات الاقتصادية وتنافسية الأمونيا منخفضة الانبعاثات 81
4.3. دور الأمونيا كحامل للهيدروجين في منظومة الطاقة العالمية 83
1.4.3. سلاسل إمداد الأمونيا كحامل للهيدروجين: الفرص والتحديات في التجارة الدولية 85
2.4.3. الترابط مع الشحن البحري 87
الفصل الرابع: الأمونيا وصناعة الأسمدة: التحديات والفرص في ظل التحول منخفض الكربون 91
مقدمة 91
1.4. أهمية الأمونيا في منظومة الإنتاج الغذائي 91

1.1.4. أنواع الأسمدة المعتمدة على الأمونيا 92
2.1.4. مسارات فقد النيتروجين في التربة الزراعية 94
2.4. الاستخدام المباشر للأمونيا اللامائية في الزراعة 96
3.4. دور الأمونيا في الثورة الزراعية الحديثة 97
4.4. كفاءة استخدام النيتروجين والتحديات البيئية 98
5.4.التحول الهيكلي في صناعة الأسمدة: من التوسع الكمي إلى الكفاءة والاستدامة 98
6.4. التوزيع الجغرافي لمشروعات الأسمدة منخفضة الانبعاثات ودور الدول الأعضاء في أوابك 99
الاستنتاجات 103
التوصيات 104
Abstract and Executive Summary 105

قائمة الاشكال

الشكل (1-1): مسار التطور التاريخي وكثافة الطاقة (1903-2020م) وحالة الانبعاثات 20
الشكل (1-2): المخطط العام لعملية هابر–بوش لإنتاج الأمونيا 21
الشكل (1-3): مخطط إنتاج الأمونيا البنية 24
الشكل (1-4): مخطط إنتاج الأمونيا الرمادية 26
الشكل (1-5): مخطط إنتاج الأمونيا الزرقاء في التصميمين الأساسي والمتقدم لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون 28
الشكل (1-6): مخطط إنتاج الأمونيا الخضراء 30
الشكل (1-7): مقارنة أنواع الأمونيا 30
الشكل (1-8) : مخطط كفاءة منظومة الامونيا الخضراء 32
الشكل (1-9): التوزيع النسبي لمزيج اللقيم المستخدم في الإنتاج العالمي للأمونيا 34
الشكل (1-10): تأثير الأصول الصناعية القائمة واعمارها التشغيلية على مسارات خفض الانبعاثات 36
الشكل (1-11): مخطط إنتاج الأمونيا مع إبراز تنشيط النيتروجين كخطوة محددة لسرعة التفاعل 37
الشكل (1-12): محفزات الذرة المفردة والأنظمة الهجينة في إنتاج الأمونيا 39
الشكل (1-13): مخطط إنتاج الأمونيا بالأنظمة البلازمونية–شبه الموصلة وانتقال الشحنة 40
الشكل (1-14): إنتاج الامونيا الخضراء بتقنية الاختزال الكهروكيميائي للنيتروجين 41
الشكل (2-1): نمو إنتاج الأمونيا العالمي (2024-2025)، ومساهمة المشاريع الجديدة 45
الشكل (2-2): التوزيع الجغرافي لإنتاج الأمونيا العالمي حسب المناطق في عام 2024 47
الشكل (2-3): تأثير أزمة الطاقة في أوروبا على إنتاج الأمونيا (2021-2024) 51
الشكل (2-4): توزع استهلاك الأمونيا العالمي حسب القطاعات (2024)، وافاق النمو المستدام حتى 2030 54
الشكل (2-5): تطور أسعار الأمونيا العالمية وتأثرها بالطاقة والجيوسياسة (2000-2026) 57
الشكل (3-1): تطور وقود الشحن البحري 63
الشكل (3-2): أحد السفن التجريبية المستخدمة لاختبار الأمونيا كوقود بحري 66
الشكل (3-3): تطور الأسطول البحري العامل بالأمونيا 67
الشكل (3-4): تطور البنية التحتية لتزويد السفن بالأمونيا (2020-2027) 69
الشكل(3-5): أبرز تحديات السلامة المرتبطة باستخدام الامونيا كوقود بحري 74
الشكل (3-6): مصادر المخاطر ومتطلبات السلامة لاستخدام الأمونيا كوقود بحري 76
الشكل (3-7): الفجوات التنظيمية الدولية في استخدام الأمونيا كوقود بحري 78
الشكل (3-8): التوزيع الجغرافي لمشروعات الأمونيا وسلاسل الإمداد بين مناطق الإنتاج والطلب 81
الشكل (3-9): أبرز التحديات والفرص المرتبطة باستخدام الأمونيا كوقود بحري 82
الشكل (3-10) : سلسلة القيمة للأمونيا كحامل للهيدروجين وتطبيقاتها النهائية 87
الشكل (3-11) : نمو الطلب على الأمونيا كحامل للهيدروجين والشحن البحري حتى 2050 88

الشكل (4-1): تصنيف الأسمدة النيتروجينية الشائعة وخصائصها 93
الشكل (4-2): مسارات فقد النيتروجين في التربة وآليات انتقاله 96
الشكل (4-3): التوزيع الجغرافي لمشروعات الأسمدة النيتروجينية منخفضة الانبعاثات والتحول الإقليمي 101

قائمة الجداول

الجدول (3-1): مقارنة بين الخصائص الفنية والبيئية لأبرز أنواع الوقود البحري 63
جدول (3-2): مقارنة خصائص الهيدروجين والأمونيا كحامل للهيدروجين 85
جدول (4-1): مقارنة أنواع الأسمدة النيتروجينية 94

قائمة المصطلحات والاختصارات

الاختصار	المصطلح بالإنجليزية	الترجمة العربية المعتمدة	الشرح الفني المختصر
NH_3	Ammonia	الأمونيا	مركب كيميائي من النيتروجين والهيدروجين، يُعد المادة الوسيطة الأساسية في إنتاج الأسمدة النيتروجينية والعديد من الصناعات الكيميائية.
H_2	Hydrogen	الهيدروجين	غاز يُستخدم كلقيم رئيسي في تخليق الأمونيا، ويُحدد مصدره البصمة الكربونية لمسار الإنتاج.
N_2	Nitrogen	النيتروجين	غاز يُفصل عادة من الهواء ويُستخدم مع الهيدروجين في عملية هابر–بوش لإنتاج الأمونيا.
CO	Carbon Monoxide	أول أكسيد الكربون	مكوّن أساسي في الغاز التخليقي، يُحوَّل لاحقًا إلى CO_2 خلال تفاعل تحويل غاز الماء.
CO_2	Carbon Dioxide	ثاني أكسيد الكربون	غاز دفيئة ناتج عن إنتاج الهيدروجين، ويُعد الهدف الرئيس لتقنيات الاحتجاز في مسارات الأمونيا منخفضة الكربون.
SMR	Steam Methane Reforming	إصلاح الميثان بالبخار	المسار الأكثر شيوعًا لإنتاج الهيدروجين من الغاز الطبيعي، يعتمد على تفاعل الميثان مع بخار الماء، وهو مسار كثيف الانبعاثات نسبيًا.
ATR	Auto-Thermal Reforming	الإصلاح الحراري الذاتي	مسار يجمع بين الإصلاح بالبخار والأكسدة الجزئية، ويتميز بارتفاع تركيز CO_2 وقابلية أعلى للاحتجاز.
POX	Partial Oxidation	الأكسدة الجزئية	تفاعل كيميائي يستخدم الأكسجين لتحويل الوقود إلى غاز تخليقي وإنتاج حرارة داخل المفاعل
Syngas	Synthesis Gas	الغاز التخليقي (الاصطناعي)	خليط من H_2 و CO (وأحيانًا CO_2)، يُنتج من إصلاح الغاز أو تغويز الفحم، ويمثل المرحلة الوسيطة لإنتاج الهيدروجين.
WGS	Water Gas Shift Reaction	تفاعل تحويل غاز الماء	تفاعل يحوّل CO إلى CO_2 مع إنتاج هيدروجين إضافي، لزيادة محتوى الهيدروجين في الغاز التخليقي.
LTS	Low Temperature Shift	تحويل غاز/الماء منخفض الحرارة	مرحلة من WGS تُجرى عند درجات حرارة منخفضة لتحقيق تحويل أعلى لأول أكسيد الكربون.
HTS	High Temperature Shift	تحويل غاز/ الماء عالي الحرارة	المرحلة الأولى من WGS وتُجرى عند درجات حرارة مرتفعة.
AGR	Acid Gas Removal	إزالة الغازات الحمضية	عمليات فصل CO_2 وH_2S من الغاز التخليقي باستخدام مذيبات كيميائية أو فيزيائية.
ASU	Air Separation Unit	وحدة فصل الهواء	وحدة صناعية لإنتاج النيتروجين (وأحيانًا الأكسجين) اللازم لتخليق الأمونيا أو التغويز.
PSA	Pressure Swing Adsorption	الامتزاز بتأرجح الضغط	تقنية لتنقية الهيدروجين عبر امتصاص الشوائب على مواد صلبة تحت ضغوط متغيرة.

تابع قائمة المصطلحات والاختصارات

الاختصار	المصطلح بالإنجليزية	الترجمة العربية المعتمدة	الشرح الفني المختصر
Methanation	Methanation	الميثنة	مرحلة نهائية تُستخدم لإزالة آثار أول أكسيد الكربون (CO) وثاني أكسيد الكربون (CO_2) عبر تحويلهما إلى غاز الميثان، وذلك لحماية محفزات عملية هابر–بوش من التسمم.
Haber–Bosch	Haber–Bosch Process	عملية هابر–بوش	عملية تصنيع " تخليق"ا لأمونيا من النيتروجين والهيدروجين تحت ضغط وحرارة مرتفعين وبوجود محفز.
CCUS	Carbon Capture, Utilization and Storage	احتجاز واستخدام وتخزين الكربون	مجموعة تقنيات تهدف إلى التقاط CO_2 ومنع انبعاثه إلى الغلاف الجوي.
CCS	Carbon Capture and Storage	احتجاز وتخزين الكربون	جزء من CCUS يركّز على التخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون.
BAT	Best Available Technology	أفضل التقنيات المتاحة	أعلى مستوى تقني متاح تجاريًا من حيث الكفاءة وخفض الانبعاثات.
Brown Ammonia	Brown Ammonia	الأمونيا البنية	أمونيا تُنتَج من تغويز الفحم، وتُعد الأعلى كثافة في الانبعاثات الكربونية.
Grey Ammonia	Grey Ammonia	الأمونيا الرمادية	أمونيا تُنتَج من الغاز الطبيعي دون احتجاز الكربون.
Blue Ammonia	Blue Ammonia	الأمونيا الزرقاء	أمونيا تُنتَج من الوقود الأحفوري مع دمج تقنيات احتجاز الكربون.
Green Ammonia	Green Ammonia	الأمونيا الخضراء	أمونيا تُنتَج باستخدام هيدروجين أخضر من التحليل الكهربائي للطاقة المتجددة.
stpd	short tons per day	طن قصير/يوم	وحدة شائعة لقياس الطاقة الإنتاجية في الصناعة الكيميائية.
MW	Megawatt	ميغاواط	وحدة قياس القدرة الكهربائية المستخدمة في توصيف استهلاك أو توليد الطاقة بالمصانع.
CEAS	Computerized Engine Application System	نظام التطبيقات الحاسوبية للمحركات	نظام تحكم وتحليل رقمي يُستخدم لمراقبة أداء المحركات وتحسين الكفاءة التشغيلية والانبعاثات.
CFBG	Circulating Fluidized Bed Gasifier	نظام التغويز بالسرير المميع الدائري	تقنية تغويز تسمح بتفاعل الوقود الصلب مع الهواء أو الأكسجين في سرير مائع، وتتميز بكفاءة حرارية عالية وتجانس التفاعل.

تابع قائمة المصطلحات والاختصارات

الاختصار	المصطلح بالإنجليزية	الترجمة العربية المعتمدة	الشرح الفني المختصر
COD	Coefficient of Determination	معامل التحديد	مؤشر إحصائي يُستخدم لقياس جودة التوافق بين النموذج الرياضي والبيانات الفعلية.
EGR	Exhaust Gas Recirculation	إعادة تدوير غازات العادم	تقنية تُعاد فيها نسبة من غازات العادم إلى غرفة الاحتراق لخفض درجات الحرارة وتقليل انبعاثات أكاسيد النيتروجين.
LCA	Life Cycle Assessment	تقييم دورة الحياة	منهجية تحليل بيئي تُقيّم الأثر البيئي للمنتج أو النظام عبر كامل دورة حياته.
LCI	Life Cycle Inventory	جرد دورة الحياة	مرحلة من LCA تُحصى فيها جميع المدخلات والمخرجات من مواد وطاقة وانبعاثات.
LCIA	Life Cycle Impact Assessment	تقييم الأثر لدورة الحياة	مرحلة تحليل تُحوّل بيانات الجرد إلى مؤشرات أثر بيئي مثل الاحترار العالمي.
WTT	Well-to-Tank	من البئر إلى الخزان	جزء من LCA يُقيّم الانبعاثات خلال الاستخراج والمعالجة والنقل.
WTW	Well-to-Wake	من البئر إلى العادم	التقييم الكامل للانبعاثات عبر سلسلة الوقود كاملة.
SACs	Single-Atom Catalysts	محفزات الذرة المفردة	محفزات تعتمد على تثبيت ذرات معدنية منفردة على دعامة صلبة لزيادة كفاءة التفاعل التحفيزي.
LSPR	Localized Surface Plasmon Resonance	الرنين البلازموني السطحي الموضعي	ظاهرة فيزيائية تُستخدم في التحفيز الضوئي لتنشيط الجزيئات على سطح المعادن النانوية.
ENRR	Electrochemical Nitrogen Reduction Reaction	الاختزال الكهروكيميائي للنيتروجين	مسار بحثي لإنتاج الأمونيا مباشرة من النيتروجين باستخدام الكهرباء.
TRL	Technology Readiness Level	مستوى الجاهزية التقنية	مؤشر يستخدم لتقييم درجة نضج التكنولوجيا من البحث المختبري إلى التطبيق الصناعي.
Energy Intensity	كثافة استهلاك الطاقة		مقدار الطاقة المستخدمة لإنتاج وحدة من المنتج.
Carbon Intensity	كثافة الكربون		كمية انبعاثات ثاني أكسيد الكربون لكل وحدة إنتاج.
Energy Transition	التحول الطاقي		الانتقال من نظم الطاقة التقليدية إلى نظم منخفضة الكربون.
Decarbonization	إزالة الكربون		خفض الانبعاثات الكربونية في الأنشطة الصناعية والطاقة.

الملخص التنفيذي

في ظل التحولات المتسارعة التي يشهدها نظام الطاقة العالمي نحو أنماط أكثر استدامة وكفاءة، تبرز الأمونيا كأحد العناصر الاستراتيجية التي تربط بين منظومات الطاقة والصناعة والغذاء، بما يعيد تعريف دورها من مادة كيميائية تقليدية إلى ركيزة محورية في الاقتصاد منخفض الكربون. ويمنح ذلك الدول التي تمتلك مقومات صناعية وطاقوية متكاملة أهمية متزايدة ضمن مسارات التحول العالمي للطاقة.

وتشهد صناعة الأمونيا تحولاً تدريجياً من المسارات التقليدية كثيفة الانبعاثات إلى مسارات منخفضة الكربون تشمل الأمونيا الزرقاء والخضراء. ففي حين تمثل الأمونيا الزرقاء خياراً انتقالياً عملياً على المدى القريب، مدعوماً بتطور تقنيات احتجاز وتخزين الكربون، تعكس الأمونيا الخضراء المسار طويل الأجل، اعتماداً على الهيدروجين المنتج من التحليل الكهربائي للماء باستخدام الكهرباء المتجددة، بالتوازي مع الانخفاض المتواصل في تكاليف الطاقة المتجددة والمحللات الكهربائية. ويتيح هذا التحول تبني مزيج متوازن من مسارات الإنتاج وفقاً للموارد الطبيعية والبنية التحتية والمزايا النسبية لكل دولة.

ورغم تنامي الاستخدامات غير التقليدية للأمونيا في قطاعات الطاقة والنقل، لا يزال سوق الأمونيا العالمي مرتبطاً بصورة وثيقة بقطاع الأسمدة والأمن الغذائي، حيث تستحوذ التطبيقات الزراعية على الحصة الأكبر من الطلب العالمي. وفي الوقت ذاته، يتسم السوق بتفاوت واضح في تكاليف الإنتاج وكثافة الانبعاثات، بما يعزز تنافسية المنتجين منخفضي التكلفة، لا سيما في المناطق التي تتمتع بوفرة الموارد الطاقوية وقربها من مراكز الطلب العالمية.

وفي قطاع النقل البحري، تبرز الأمونيا كأحد أبرز الخيارات لإزالة الكربون من أحد أكثر القطاعات صعوبة في خفض الانبعاثات، مستفيدة من قابليتها للتخزين والنقل على نطاق واسع، إضافة إلى إمكان استخدامها كوقود منخفض الانبعاثات الكربونية. ومع ذلك، لا يزال انتشارها التجاري مرهوناً بعدد من التحديات المرتبطة بارتفاع التكاليف، ومتطلبات السلامة، وتطوير البنية التحتية، إلى جانب الحاجة إلى أطر تنظيمية ومعايير دولية داعمة.

وعلى نطاق أوسع، يتجاوز دور الأمونيا كونها وقوداً بديلاً ليشمل دوراً استراتيجياً كحامل للهيدروجين، بما يتيح نقل الطاقة منخفضة الكربون عبر سلاسل إمداد دولية تربط بين مناطق الإنتاج ومراكز الطلب. ويعزز ذلك أهمية تطوير الموانئ والبنية التحتية المرتبطة بها، لتتحول

تدريجياً إلى مراكز طاقة متعددة الوظائف تجمع بين تموين السفن بالوقود النظيف وتداول حوامل الهيدروجين.

وفي قطاع الأسمدة، تظل الأمونيا حجر الأساس في منظومة الأمن الغذائي العالمي، إلا أن القطاع يواجه تحديات متزايدة تتعلق بكفاءة استخدام النيتروجين والآثار البيئية المرتبطة به، ما يستدعي تبني ممارسات إنتاج واستخدام أكثر استدامة تحقق التوازن بين متطلبات الأمن الغذائي والاعتبارات البيئية.

وفي هذا السياق، تتبلور أهمية الدول الأعضاء في منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك) كأحد الفاعلين الرئيسيين في هذا التحول، في ضوء ما تمتلكه من وفرة في موارد الغاز الطبيعي، وبنية تحتية صناعية متطورة، وموقع جغرافي قريب من مراكز الطلب العالمية، إلى جانب الإمكانات المتنامية في مجال الطاقة المتجددة. وتتيح هذه المقومات تبني استراتيجيات متكاملة لإنتاج الأمونيا منخفضة الانبعاثات، وتطوير مراكز إقليمية لتموين السفن بالوقود النظيف، والمساهمة في إنشاء ممرات بحرية منخفضة الانبعاثات، فضلاً عن تعزيز دورها في تجارة حوامل الهيدروجين. ومن شأن ذلك دعم إعادة تشكيل سلاسل إمداد الطاقة العالمية، وتعزيز استقرار أسواق الأسمدة، والإسهام في دعم الأمن الغذائي العالمي.

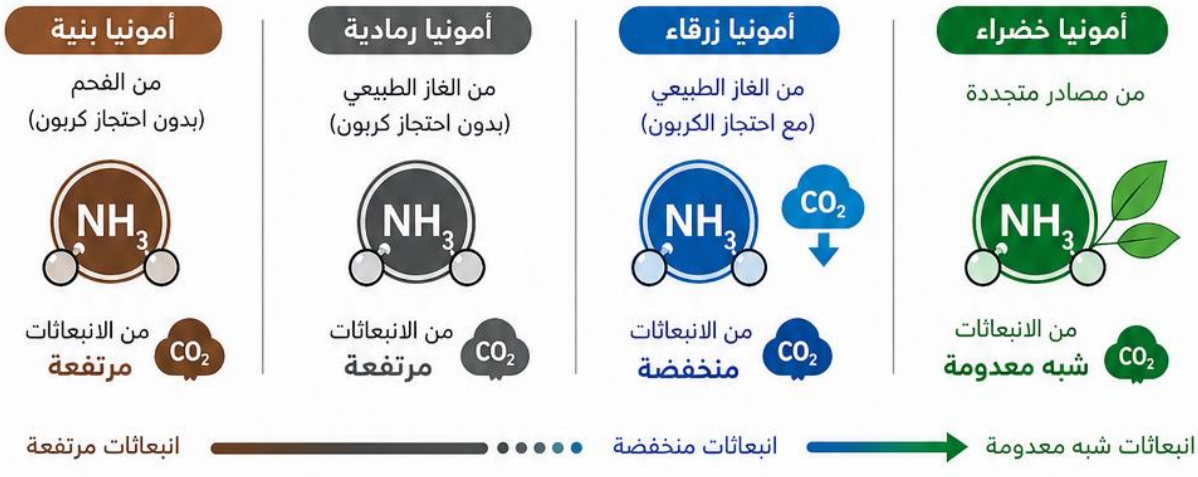
وخلصت الدراسة إلى أن صناعة الأمونيا تشهد تحولاً هيكلياً متسارعاً نحو نماذج إنتاج واستخدام منخفضة الانبعاثات، وأن هذا التحول لم يعد خياراً نظرياً، بل مساراً صناعياً قيد التشكل. كما أكدت الدراسة أن تسريع هذا التحول يتطلب تبني مسارات انتقالية مرنة تجمع بين التقنيات القائمة والحلول الناشئة، وتعزيز الاستثمار في البنية التحتية الداعمة، ولا سيما الموانئ وسلاسل الإمداد، بما يواكب الاستخدامات الجديدة في قطاعات النقل والطاقة. كذلك تبرز أهمية تطوير الأطر التنظيمية والمعايير الدولية لضمان الاستخدام الآمن والفعال، ودعم البحث والتطوير في تقنيات الهيدروجين منخفض الانبعاثات واحتجاز الكربون، إلى جانب تعزيز التعاون الدولي لخفض التكاليف وتسريع الانتشار التجاري.

OAPEC
Organization of
Arab Petroleum
Exporting Countries

تطور صناعة الأمونيا ومسارات إنتاجها في ظل التحول العالمي نحو نظم الطاقة منخفضة الكربون

الفصل الأول

مسار التحول العالمي



الفصل الأول: تطور صناعة الأمونيا ومسارات إنتاجها في ظل التحول العالمي نحو نظم الطاقة منخفضة الكربون

مقدمة

تمثل صناعة الأمونيا إحدى الركائز الأساسية للصناعات الكيميائية، إذ تُعد المادة الوسيطة الرئيسية في إنتاج الأسمدة النيتروجينية التي يعتمد عليها الأمن الغذائي العالمي، كما تدخل في طيف واسع من الصناعات ذات القيمة المضافة. وقد ارتبط تطور هذه الصناعة تاريخياً بابتكار عملية هابر–بوش في مطلع القرن العشرين، التي مكّنت من إنتاج الأمونيا على نطاق صناعي واسع، وشكلت تحولاً جوهرياً في قدرة الزراعة الحديثة على توفير المدخلات اللازمة لزيادة الإنتاج الغذائي.

وانطلاقاً من هذه الأهمية، لم يعد دور الأمونيا مقتصراً على استخداماتها التقليدية في قطاعي الزراعة والصناعات الكيميائية، بل برزت أيضاً كأحد الخيارات الواعدة في سياق التحول نحو نظم طاقة منخفضة الكربون، حيث يُنظر إليها كوقود محتمل في قطاع النقل البحري وبعض التطبيقات الصناعية، فضلاً عن دورها المتنامي بوصفها حاملاً فعالاً للهيدروجين يسهم في تسهيل نقل الطاقة وتخزينها عبر سلاسل الإمداد الدولية. وبذلك تمثل الأمونيا نقطة تقاطع بين منظومات الغذاء والطاقة والتحول المناخي، الأمر الذي يجعل تحليل تطور هذه الصناعة ومساراتها التقنية أمراً أساسياً لفهم موقعها في الاقتصاد منخفض الكربون.

وفي هذا الإطار، اكتسبت صناعة الأمونيا اهتماماً متزايداً ضمن الجهود العالمية الرامية إلى خفض الانبعاثات الصناعية، نظراً لاعتماد إنتاجها التقليدي بدرجة كبيرة على الهيدروجين كلقيم، والذي يُنتج أساساً من الوقود الأحفوري. وعليه، تتباين البصمة الكربونية لإنتاج الأمونيا تبعاً لمصدر اللقيم (الفحم أو الغاز الطبيعي) والتقنيات المستخدمة، مما دفع إلى تطوير مسارات انتقالية تستهدف خفض الانبعاثات، من أبرزها دمج تقنيات احتجاز واستخدام وتخزين الكربون ضمن العمليات التقليدية، إلى جانب التوسع في المسارات منخفضة الكربون القائمة على إنتاجه باستخدام مصادر الطاقة المتجددة.

1.1.خلفية تاريخية

يرتبط التطور الصناعي المبكر لصناعة الأمونيا بالتقدم العلمي والتكنولوجي الذي شهدته بدايات القرن العشرين. ففي عام 1903، طُوِّر مسار بيركلاند–إيده (Birkeland–Eyde Process) في النرويج بوصفه أحد أوائل المسارات الصناعية لإنتاج المركبات النيتروجينية من الهواء الجوي، حيث اعتمد على استخدام القوس الكهربائي، وهو تفريغ كهربائي عالي الشدة يولّد بلازما بدرجات حرارة مرتفعة تتيح تفاعل النيتروجين مع الأكسجين لتكوين أكاسيد النيتروجين.

ونظراً لارتفاع متطلبات الطاقة اللازمة لتوليد هذا القوس والحفاظ على ظروف التفاعل، ارتبط تطبيق هذه العملية بتوافر مصادر كهرباء رخيصة ومستقرة. وقد أسهمت الموارد الكهرومائية في النرويج في دعم انتشارها خلال تلك الفترة، إلا أن كثافة استهلاكها للطاقة حدّت من جدواها الاقتصادية خارج المناطق الغنية بالطاقة الكهرومائية، مما قيّد انتشارها الصناعي، لا سيما مع ظهور مسارات أكثر كفاءة لاحقاً.

جاء التحول الحاسم عام 1909 مع نجاح فريتز هابر (Fritz Haber) في تحقيق الإنتاج المباشر للأمونيا في المختبر، قبل أن تقوم شركة BASF بتطوير العملية صناعياً بقيادة كارل بوش (Carl Bosch)، ليبدأ أول تشغيل صناعي واسع النطاق عام 1913. وقد مثّلت عملية هابر–بوش (Haber–Bosch) نقطة انعطاف جوهرية، إذ أتاحت إنتاج الأمونيا بكميات كبيرة من خلال تفاعل النيتروجين والهيدروجين تحت ضغوط ودرجات حرارة مرتفعة وباستخدام محفزات قائمة على الحديد. وتشير التقديرات إلى أن استهلاك الطاقة في المصانع المبكرة خلال الفترة (1913–1920) بلغ نحو 90–120 جيجا جول لكل طن من الأمونيا، شاملاً الطاقة الحرارية والكهربائية المستخدمة في مختلف مراحل التشغيل. ومع التحسينات التقنية المتلاحقة، أصبحت هذه العملية، بحلول ثلاثينيات القرن العشرين، المسار الصناعي المهيمن عالمياً لإنتاج الأمونيا [1].

خلال النصف الأول من القرن العشرين، تمحور تطور صناعة الأمونيا حول تحسين الكفاءة التشغيلية وخفض كثافة استهلاك الطاقة، مع تركيز خاص على مصدر الهيدروجين بوصفه العنصر الأكثر استهلاكاً للطاقة في العملية. وفي هذا السياق، اعتمدت الصناعة مسارات متعددة لإنتاجه؛ ففي بعض الدول الأوروبية، ولا سيما تلك التي تمتعت بوفرة في موارد الطاقة

[1] IEA, Ammonia Technology Roadmap, 2021

الكهرومائية، أُنتج عبر التحليل الكهربائي للماء باستخدام الكهرباء المولدة من السدود، واستمر هذا النهج في بعض المنشآت حتى ستينيات القرن الماضي، في حين اعتمدت مناطق أخرى على تغويز الفحم لإنتاج غاز اصطناعي غني به يُفصل لاحقاً ويُستخدم في تصنيع الأمونيا.

ومع التوسع الصناعي خلال الخمسينيات والستينيات، شهدت الصناعة تقدماً متكاملاً شمل تحسين تصميم المفاعلات والضواغط، ورفع كفاءة المحفزات، إلى جانب تطوير نظم استرجاع الحرارة عبر مختلف مراحل العملية، بما في ذلك أفران الإصلاح، ومفاعلات الإصلاح وتحويل غاز/الماء، وتفاعل تصنيع الأمونيا، إضافة إلى عمليات الانضغاط والتبريد. وقد أسهم هذا التكامل الحراري في خفض استهلاك الطاقة إلى نحو 60 جيجا جول لكل طن من الأمونيا، بالتوازي مع بروز الغاز الطبيعي تدريجياً بوصفه لقيمًا أكثر كفاءة مقارنة بالفحم والتحليل الكهربائي.

تكرّس هذا التحول خلال أواخر الستينيات وسبعينيات القرن العشرين مع التوسع في استخدام الغاز الطبيعي عبر عملية الإصلاح بالبخار، لما يوفره من كفاءة أعلى وتكلفة أقل مقارنة بالمسارات التقليدية، الأمر الذي أدى إلى انتشاره السريع في العديد من المناطق الصناعية. وبحلول ثمانينيات القرن الماضي، أصبح الغاز الطبيعي المصدر السائد عالمياً لإنتاج الهيدروجين المستخدم في صناعة الأمونيا، ولا سيما في الدول التي تمتلك احتياطيات كبيرة منه[2].

منذ تسعينيات القرن الماضي، واصلت الصناعة تحقيق تحسينات تدريجية في كفاءة العمليات، مدفوعة بتطورات تصميم المفاعلات والمحفزات وأنظمة استرجاع الحرارة، إلى جانب تعزيز التكامل الحراري داخل المنشآت. وقد أسهمت هذه التطورات في خفض كثافة استهلاك الطاقة في المنشآت الحديثة إلى نحو 28–35 جيجا جول لكل طن من الأمونيا، مقارنة بمتوسط عالمي يتراوح بين 40–46 جيجا جول لكل طن. وتشير التقديرات إلى أن الحد الأدنى النظري لاستهلاك الطاقة يبلغ نحو 20–21 جيجا جول لكل طن، وهو مستوى يصعب تجاوزه بسبب القيود الثرموديناميكية المرتبطة بطبيعة تفاعل التخليق. ومع اقتراب الأداء الصناعي من هذا الحد، أصبحت فرص تحقيق وفورات إضافية كبيرة من خلال التحسينات التشغيلية وحدها أكثر محدودية[3].

[2] IEA, Ammonia Technology Roadmap, 2021

[3] IEA (2021). Ammonia Technology Roadmap: Towards More Sustainable Nitrogen Fertilizer Production. International Energy Agency, Paris.

مع دخول القرن الحادي والعشرين، أصبح واضحاً أن تحسين كفاءة الطاقة وحده لم يعد كافياً لتحقيق خفض جوهري في انبعاثات صناعة الأمونيا، في ظل الاعتماد الكبير على مسارات الإنتاج القائمة على الوقود الأحفوري—مثل الإصلاح بالبخار وتغويز الفحم—بوصفها المصدر الرئيس للانبعاثات المصاحبة للعملية. وتشير التقديرات إلى أن هذه المرحلة تمثل ما يتراوح بين 70% و80% من إجمالي انبعاثات القطاع، وهو ما يفسر التحول المتزايد نحو إعادة هيكلتها بوصفها المدخل الرئيسي لإزالة الكربون.

وانطلاقاً من ذلك، اتجه الاهتمام إلى تطوير مسارات إنتاج منخفضة الكربون، تُصنَّف وفق طبيعة المواد الخام المستخدمة ومستوى كثافة الانبعاثات المرتبطة به. ومن بين هذه المسارات، برزت الأمونيا الزرقاء بوصفها حلاً انتقالياً رئيساً، إذ تُدمج تقنيات احتجاز الكربون واستخدامه وتخزينه عبر مراحل متعددة من العملية، تشمل وحدات الإصلاح، ومراحل تحويل غاز/الماء، إضافة إلى غازات الاحتراق في الأفران والغلايات. ونظراً لأن جزءاً كبيراً من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون ينشأ في صورة تيارات غازية عالية التركيز ضمن خطوط العمليات—لا سيما بعد تحويل غاز/الماء—فإن فصلها قبل إطلاقها إلى الغلاف الجوي يُعد أكثر كفاءة من الناحية التقنية.

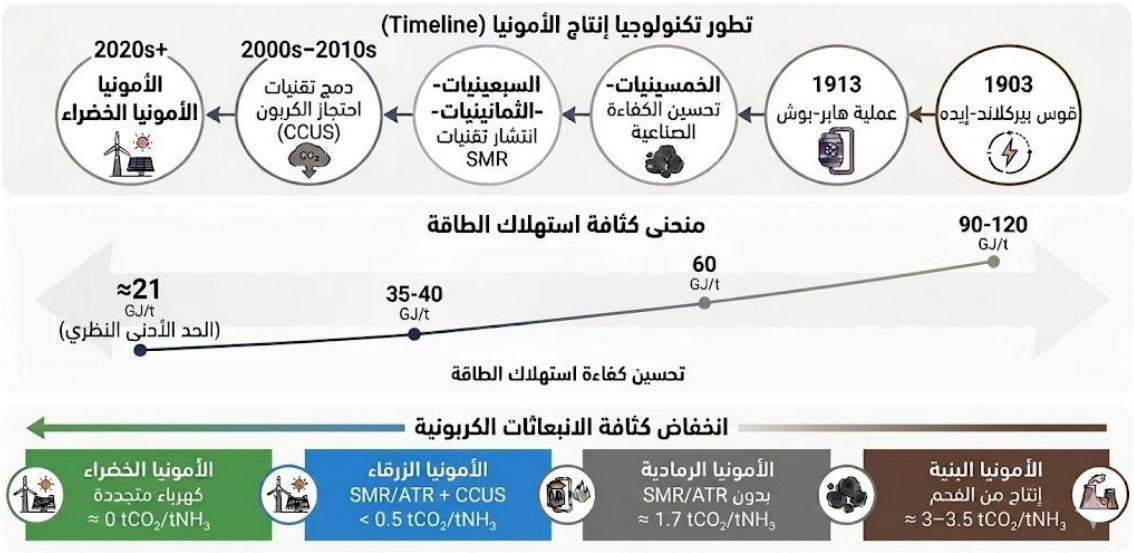
وفي هذا الإطار، يعتمد التصميم الأساسي (Basic Design) على احتجاز ثاني أكسيد الكربون من تيارات العمليات (خطوط العمليات) الناتجة عن إنتاج الهيدروجين من الغاز الطبيعي، وهي تدفقات غازية داخل وحدات المعالجة "خصوصاً بعد تفاعل تحويل غاز/الماء" تتميز بتركيز مرتفع من ثاني أكسيد الكربون وسهولة نسبية في فصله، مما يتيح تحقيق معدلات خفض تتراوح عادة بين 55% و70%. في المقابل، يوسّع التصميم المتكامل (Advanced Design) نطاق الاحتجاز ليشمل أيضاً الانبعاثات الناتجة عن احتراق الوقود في الأفران والغلايات، رغم انخفاض تركيزها وصعوبة فصلها نسبياً، الأمر الذي يتيح تحقيق معدلات خفض أعلى تصل إلى نحو 90% أو أكثر باستخدام التقنيات التجارية المتاحة حالياً.

ويعكس هذا المسار بداية تحول أوسع في صناعة الأمونيا، ينتقل فيه التركيز من تحسين كفاءة العمليات إلى إعادة تشكيل مصدر الطاقة المستخدم، تمهيداً لاعتماد مسارات أقل كثافة في الانبعاثات، وفي مقدمتها الأمونيا الخضراء القائمة على مصادر الطاقة المتجددة. وعلى الرغم من أهمية هذا المسار بوصفه حلاً انتقالياً، فإنه يظل مرتبطاً باستخدام الوقود الأحفوري، الأمر

الذي دفع إلى توجهات أعمق لإزالة الكربون تقوم على التحليل الكهربائي للماء باستخدام الكهرباء المتجددة. وبالتوازي مع ذلك، يجري تطوير تقنيات ناشئة تسعى إلى تجاوز القيود التشغيلية[4].

يمكن النظر إلى تطور صناعة الأمونيا بوصفه مساراً متدرجاً بدأ بمرحلة التأسيس الصناعي واسع النطاق، ثم انتقل إلى مرحلة تحسين كفاءة الطاقة وتعظيم الاستفادة من اللقيم الأحفوري، قبل أن يدخل حالياً مرحلة التحول الهيكلي نحو خفض الانبعاثات وإزالة الكربون، في سياق التحول العالمي نحو منظومات إنتاج صناعي أكثر استدامة [5]-[6]-[7]-[8]. يبين الشكل (1-1) مسار التطور التاريخي وكثافة الطاقة (1903-2020م) وحالة الانبعاثات.

الشكل (1-1): مسار التطور التاريخي وكثافة الطاقة (1903-2020م) وحالة الانبعاثات



المصدر: من إعداد الباحث (عدة مصادر دولية)

2.1. مسارات إنتاج الأمونيا في ظل التحول منخفض الكربون

تعتمد صناعة الأمونيا التقليدية على تقنية هابر–بوش، التي تقوم على تفاعل النيتروجين—المستخلص من الهواء عبر وحدات فصل الهواء—مع الهيدروجين المنتج من مصادر متعددة لإنتاج الأمونيا تحت ضغوط ودرجات حرارة مرتفعة وباستخدام محفزات مناسبة. ويُنتج الهيدروجين عبر مسارات تشمل إصلاح الغاز الطبيعي، أو تغويز الفحم لإنتاج غاز اصطناعي، أو

4 IEA, Energy Technology Perspectives – Industry, 2023

5 IEA, CCUS in Clean Energy Transitions, 2024

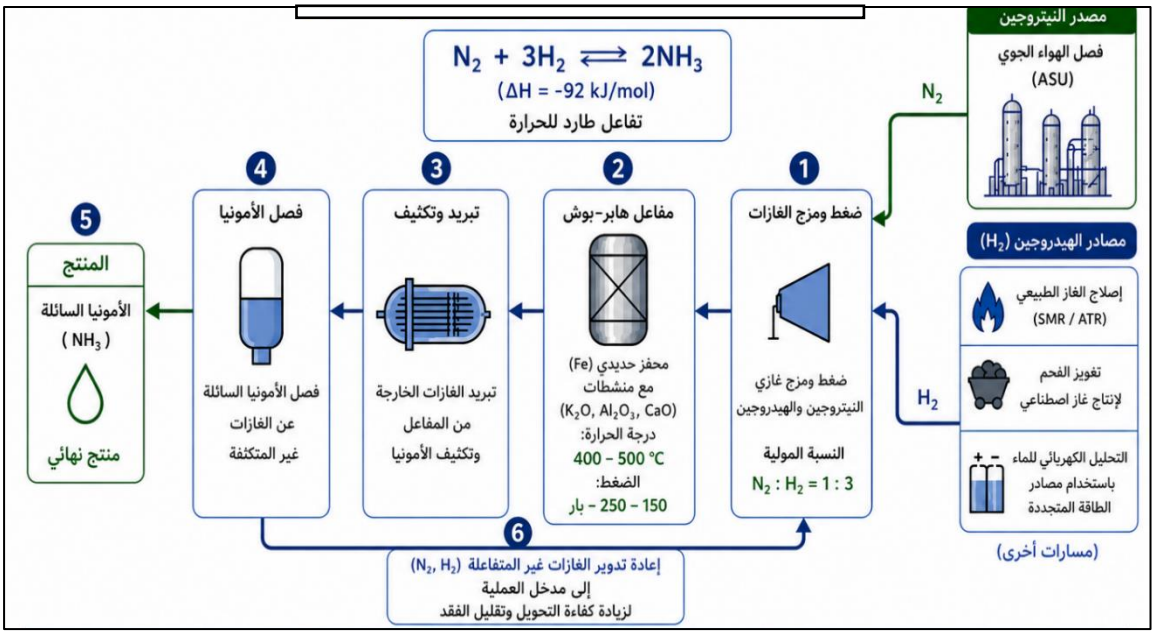
6 IEA, Ammonia Technology Roadmap, Update 2024

7 IEA, Hydrogen and Ammonia Tracking Report, 2024

8 IEA, Ammonia Technology Roadmap.

التحليل الكهربائي باستخدام مصادر الطاقة المتجددة، إضافة إلى مسارات أخرى. ويُعد مصدره العامل الحاسم في تحديد خصائص المسار الإنتاجي من حيث استهلاك الطاقة وكثافة الانبعاثات. بين الشكل (1-2) المخطط العام لعملية هابر–بوش لإنتاج الأمونيا.

الشكل (1-2): المخطط العام لعملية هابر–بوش لإنتاج الأمونيا



المصدر: RENTECH, Inc. (Process flow diagram adapted from company technical presentations on Coal-to-Ammonia)

تُصنَّف مسارات إنتاج الأمونيا وفقاً لمصدر الهيدروجين وكثافة الانبعاثات المرتبطة به، بدءاً من المسارات التقليدية المعتمدة على الوقود الأحفوري، مروراً بالمسارات الانتقالية المدعومة بتقنيات احتجاز واستخدام وتخزين الكربون، وصولاً إلى المسارات القائمة على الهيدروجين منخفض أو عديم الانبعاثات المعتمد على مصادر الطاقة المتجددة، بوصفها الاتجاه المستقبلي للصناعة.

لا يقتصر التمييز بين هذه المسارات على نوع مصدر الطاقة، بل يمتد ليشمل طبيعة توزيع انبعاثات ثاني أكسيد الكربون داخل العملية الإنتاجية، وهو ما يحدد بدوره خيارات وتقنيات احتجازه. وبناءً على ذلك، يمكن تصنيف تقنيات احتجاز الكربون في صناعة الأمونيا وفقاً لموقعها ضمن سلسلة العمليات.

يتركز الاحتجاز قبل الاحتراق **(Pre-combustion)** في مراحل إنتاج الهيدروجين، ولا سيما بعد تفاعلات الإصلاح وتفاعل تحويل غاز/الماء، إذ يُحتجز ثاني أكسيد الكربون من التيارات الغازية عالية التركيز بكفاءة مرتفعة وتكلفة أقل نسبياً، وهو ما يمثل النهج الأكثر شيوعاً في

التطبيقات الحالية. وفي المقابل، يشمل الاحتجاز بعد الاحتراق (Post-combustion) التقاط ثاني أكسيد الكربون من غازات المداخن الناتجة عن احتراق الوقود في أفران الإصلاح والغلايات، وهي تيارات منخفضة التركيز من الكربون، وتتطلب تقنيات أكثر تعقيداً واستهلاكاً للطاقة، لكنها ضرورية لتحقيق مستويات أعلى من خفض الانبعاثات. كما يمكن تطبيق احتجاز غازات الذيل (Tail Gas Capture) في المراحل النهائية من العملية لمعالجة الانبعاثات المتبقية وتعزيز كفاءة الالتقاط الكلية. يعكس هذا التصنيف أن تحقيق خفض عميق للانبعاثات في صناعة الأمونيا لا يعتمد فقط على اختيار مسار الإنتاج، بل يرتبط بدرجة تكامل منظومة احتجاز الكربون عبر مختلف نقاط تولد الانبعاثات داخل العملية، بدءاً من التيارات الغازية عالية التركيز في مراحل إنتاج الهيدروجين، وصولاً إلى الغازات المخففة في المداخن وتيارات الذيل، وهو ما يشكل الأساس للتحول نحو إنتاج أمونيا منخفضة أو شبه معدومة الانبعاثات.

1.2.1. الأمونيا البنية Brown Ammonia

يعتمد إنتاج الأمونيا البنية على الهيدروجين المُنتَج من تغويز الفحم، حيث يُستخدم الفحم بوصفه اللقيم الرئيس في هذه العملية، مما يجعل هذا المسار من أكثر مسارات الإنتاج كثافةً في الانبعاثات الكربونية مقارنةً ببقية المسارات التقليدية.

تبدأ العملية بمرحلة تحضير الفحم، التي تشمل المناولة والطحن، وفي بعض التصاميم خلطه بالماء لتكوين معلق مناسب لعملية التغويز، قبل تغذيته إلى مفاعل التغويز. داخل هذا المفاعل، يتفاعل الفحم مع الأكسجين النقي—المُنتج عبر وحدات فصل الهواء—وبخار الماء تحت درجات حرارة وضغوط مرتفعة، مولّداً غازاً اصطناعياً يتكون أساساً من أول أكسيد الكربون والهيدروجين، إلى جانب شوائب تشمل مركبات الكبريت والمواد الصلبة، ونواتج ثانوية مثل الخبث. ونظراً لارتفاع المحتوى الكربوني للفحم، يتميز هذا الغاز بارتفاع نسبة أكاسيد الكربون، ما يستلزم معالجته في مراحل لاحقة—ولا سيما عبر تفاعل تحويل غاز/الماء—لزيادة إنتاج الهيدروجين المستخدم في تصنيع الأمونيا.

وتُسجّل هذه السلسلة الإنتاجية مستويات مرتفعة من الانبعاثات، لا سيما خلال مرحلتي التغويز وتفاعل تحويل غاز/الماء، حيث يتحول أول أكسيد الكربون إلى ثاني أكسيد الكربون مع إنتاج كميات إضافية من الهيدروجين. وتشير التقديرات إلى أن كثافة الانبعاثات المباشرة في هذا المسار قد تبلغ نحو 3–3.5 طن من ثاني أكسيد الكربون / طن أمونيا، تبعاً لكفاءة المنشأة ونوع

الفحم المستخدم، وهو ما يجعله من أكثر المسارات تحدياً من الناحية البيئية في ظل التوجهات العالمية لخفض الانبعاثات الصناعية.

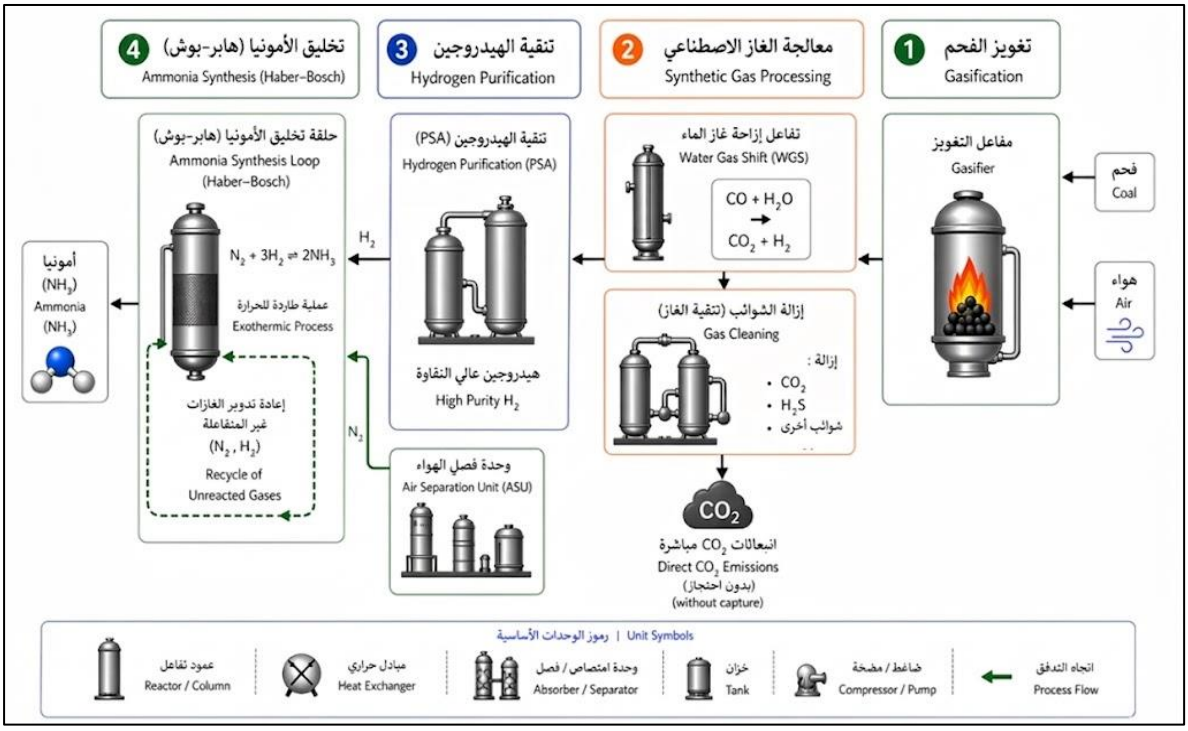
عقب مرحلة التغويز، يُبرَّد الغاز الاصطناعي وتُزال منه الشوائب، مع استرداد جزء من الحرارة في غلايات استرجاع الحرارة، قبل إدخاله إلى تفاعل تحويل غاز/الماء بنوعيه عالي ومنخفض الحرارة لتعزيز إنتاج الهيدروجين. يلي ذلك مرحلة إزالة الغازات الحمضية، حيث يُفصل ثاني أكسيد الكربون من التيارات الغازية عالية التركيز الناتجة عن تفاعل التحويل، إلى جانب إزالة مركبات الكبريت التي تُعالج عادة في وحدات كلوس لإنتاج الكبريت.

ويُعد ثاني أكسيد الكربون المنفصل في هذه المرحلة المصدر الرئيس للانبعاثات المركزة، إذ يُطلَق في المسارات التقليدية مباشرةً إلى الغلاف الجوي بعد فصله. كما تتولد انبعاثات إضافية في صورة ثاني أكسيد الكربون منخفض التركيز ضمن غازات المداخن الناتجة عن احتراق الوقود في وحدات التغويز والمرافق الحرارية، والتي تُطلَق أيضاً في غياب تقنيات الاحتجاز.

وتُستكمل تنقية الهيدروجين باستخدام تقنيات صناعية مثل الامتزاز بتأرجح الضغط (PSA)، أو—في بعض التصاميم—عبر مرحلة الميثنة (Methanation) لإزالة الآثار المتبقية من أكاسيد الكربون، بما يضمن حماية محفزات تصنيع الأمونيا. وفي المقابل، يُنتج النيتروجين من الهواء باستخدام وحدات فصل الهواء، ثم يُمزج مع الهيدروجين عالي النقاوة بنسبة مولية تقارب 1:3، ويدخل الخليط إلى مفاعل هابر–بوش لإنتاج الأمونيا البنية تحت ظروف تشغيل مرتفعة من الضغط ودرجة الحرارة. عقب ذلك، تُبرَّد الغازات الخارجة لتكثيف الأمونيا البنية وفصلها في صورة سائلة، بينما يُعاد تدوير الغازات غير المتفاعلة إلى المفاعل لتحسين كفاءة التحويل.

وفي حال تكامل المنشأة مع وحدات إنتاج اليوريا، يمكن استخدام جزء من ثاني أكسيد الكربون المفصول في تصنيع اليوريا . يبين الشكل (1-3) مخطط إنتاج الأمونيا البنية.

الشكل (1-3): مخطط إنتاج الأمونيا البنية



المصدر : RENTECH, Inc. (Process flow diagram adapted from company technical presentations on Coal-to-Ammonia)

2.2.1. الأمونيا الرمادية Grey Ammonia

يعتمد مسار إنتاج الأمونيا الرمادية على الهيدروجين المنتج من الغاز الطبيعي، إما عبر تقنية إصلاح الميثان بالبخار أو الإصلاح الحراري الذاتي من دون تطبيق تقنيات احتجاز واستخدام وتخزين الكربون . ويُعد هذا المسار الأكثر انتشاراً عالمياً في الوقت الراهن، نظراً لاعتماده على تقنيات صناعية ناضجة وبنية تحتية راسخة.

تبدأ العملية بمرحلة نزع الكبريت من الغاز الطبيعي، وهي خطوة تمهيدية حاسمة لإزالة المركبات الكبريتية، نظراً لقدرتها على تسميم المحفزات المستخدمة في مراحل الإصلاح وتفاعل تحويل غاز/الماء، بما يؤثر سلباً في كفاءة التشغيل واستقراره.

في مسار إصلاح الميثان بالبخار، يتفاعل غاز الميثان مع بخار الماء لإنتاج الغاز الاصطناعي في تفاعل ماص للحرارة، يتطلب توفير طاقة حرارية خارجية، غالباً عبر حرق جزء من الغاز الطبيعي في أفران الإصلاح للحفاظ على درجات الحرارة المرتفعة اللازمة. وتعقب هذه المرحلة عملية تحويل غاز/الماء Water–Gas Shift، حيث يتحول أول أكسيد الكربون إلى ثاني أكسيد الكربون مع إنتاج كميات إضافية من الهيدروجين، مما يعزز محتوى الهيدروجين في الغاز

الناتج، ثم تُجرى مرحلة فصل ثاني أكسيد الكربون باستخدام تقنيات صناعية شائعة، مثل الامتصاص بالأمينات أو بكربونات البوتاسيوم الساخنة، وذلك للحصول على هيدروجين عالي النقاوة. وعلى الرغم من أن هذه الخطوة تؤدي إلى إنتاج تيار مركز من ثاني أكسيد الكربون، فإن هذا الغاز—في مسار الأمونيا الرمادية—لا يُعد مُحتجزاً بالمعنى البيئي، إذ يُطلق في الغالب إلى الغلاف الجوي، أو يُستخدم جزئياً في تصنيع اليوريا. وتلي هذه المرحلة عملية الميثنة Methanation لإزالة أي آثار متبقية من أكاسيد الكربون، بهدف حماية محفزات تصنيع الأمونيا في حلقة هابر–بوش.

بالتوازي مع مسار إنتاج الهيدروجين، يُنتج النيتروجين اللازم من الهواء باستخدام وحدات فصل الهواء الجوي، ثم يُمزج مع الهيدروجين عالي النقاوة بنسبة مولية تقارب 1:3، ويدخل الخليط إلى مفاعل هابر–بوش لإنتاج الأمونيا تحت ظروف تشغيل مرتفعة من الضغط ودرجة الحرارة وبوجود محفز مناسب. عقب ذلك، تُبرّد الغازات الخارجة لتكثيف الأمونيا الرمادية وفصلها في صورة سائلة، بينما يُعاد تدوير الغازات غير المتفاعلة إلى المفاعل لتحسين كفاءة التحويل.

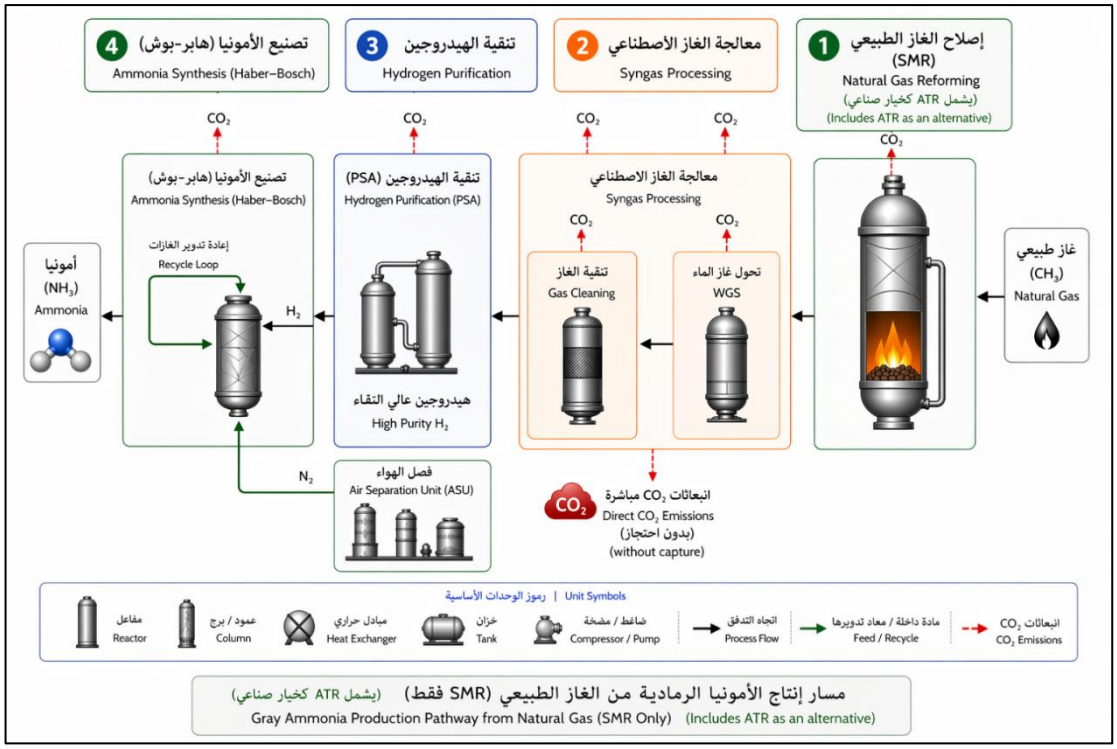
وتُعد تقنية إصلاح الميثان بالبخار الأكثر انتشاراً عالمياً في إنتاج الأمونيا، نظراً لكفاءتها التشغيلية وتكلفتها التنافسية. وتبلغ كثافة استهلاك الطاقة نحو 32 جيجا جول/طن أمونيا على أساس إجمالي، وتنخفض إلى نحو 28 جيجا جول/طن عند احتساب صافي الاستهلاك نتيجة استرجاع الحرارة. وعلى الرغم من هذا التحسن في الكفاءة، تظل هذه التقنية مرتبطة بانبعاثات مرتفعة نسبياً، تُقدر بنحو 1.8 طن من ثاني أكسيد الكربون لكل طن أمونيا.

أما في مسار الإصلاح الحراري الذاتي **(ATR)**، فيتفاعل غاز الميثان مع كلٍ من بخار الماء والأكسجين داخل مفاعل واحد، حيث تجري تفاعلات الإصلاح بالبخار والأكسدة الجزئية بصورة متكاملة، إذ توفّر حرارة الأكسدة الطاقة اللازمة لتفاعل الإصلاح، مما يعزز التكامل الحراري ويحدّ من الحاجة إلى التسخين الخارجي.

ويؤدي هذا التكوين إلى إنتاج غاز تخليق ذي محتوى أعلى من ثاني أكسيد الكربون مقارنةً بمسار إصلاح الميثان بالبخار، إلى جانب متطلبات أعلى من الطاقة الكهربائية، لا سيما لتشغيل وحدات فصل الهواء. وبوجه عام، تُقدَّر كثافة الانبعاثات المباشرة في هذا المسار بنحو 1.6 طن من ثاني أكسيد الكربون لكل طن أمونيا، مع بقائه ضمن المسارات المعتمدة على الوقود الأحفوري

لإنتاج الهيدروجين، وما يرتبط بذلك من انبعاثات كربونية. يبين الشكل (1-4) مخطط إنتاج الامونيا الرمادية.

الشكل (1-4): مخطط إنتاج الأمونيا الرمادية



المصدر: (IEA),2019، *The Future of Hydrogen*

3.2.1. الأمونيا الزرقاء Blue Ammonia

يعتمد إنتاج الأمونيا الزرقاء على نفس الأساس التقني المستخدم في إنتاج الأمونيا الرمادية، حيث يُنتج الهيدروجين من الغاز الطبيعي عبر تقنيات الإصلاح، سواء بإصلاح الميثان بالبخار أو الإصلاح الحراري الذاتي. غير أن ما يميّز هذا المسار لا يتمثل في تغيير جوهر العملية الصناعية، بل في دمج تقنيات احتجاز واستخدام وتخزين الكربون ضمن منظومة إنتاج الهيدروجين والطاقة، بما يتيح خفض الانبعاثات الكربونية مع الحفاظ على البنية التشغيلية القائمة. ويُعرف الهيدروجين الناتج في هذا السياق بالهيدروجين الأزرق.

وفي هذا الإطار، تُعد مرحلة إنتاج الهيدروجين الموقع الرئيس لاحتجاز الكربون في صناعة الأمونيا، إذ يتولّد خلالها الجزء الأكبر من ثاني أكسيد الكربون، ولا سيما خلال تفاعلات الإصلاح وتفاعل تحويل غاز/الماء. ويكون في صورة تيارات غازية عالية التركيز، مما يسهل فصله بكفاءة باستخدام تقنيات الاحتجاز مقارنةً بالمراحل الأخرى من العملية. يمكن تصنيف نقاط احتجاز الكربون داخل العملية إلى ثلاثة مواقع رئيسية.

يتمثل الموقع الأول في الاحتجاز قبل الاحتراق (Pre-combustion) ، ويشمل فصل ثاني أكسيد الكربون من التيارات الغازية عالية التركيز الناتجة عن تفاعل التحويل ضمن إنتاج الغاز الاصطناعي .ويتجلى ذلك بوضوح في مسار إصلاح الميثان بالبخار، حيث يُستخدم عادة أكثر من 60% من الغاز الطبيعي كلقيم، مما يؤدي إلى تكوين تيار مركز من ثاني أكسيد الكربون يسهل فصله بكفاءة عالية باستخدام تقنيات الامتصاص بالمذيبات الكيميائية أو الفيزيائية، وبمعدلات فصل مرتفعة وتكاليف تشغيلية أقل نسبياً. كما لا يتطلب هذا التيار سوى الضغط ليكون جاهزاً للاستخدام أو التخزين الجيولوجي الدائم. ويُعرف هذا النهج بالتصميم الأساسي Basic Design، ويُعد الخيار الأكثر انتشاراً في المشروعات الحالية، حيث يحقق خفضاً في الانبعاثات يتراوح عادة بين 55% و70% مقارنة بالإنتاج التقليدي.

أما الموقع الثاني، فيتمثل في الاحتجاز بعد الاحتراق (Post-combustion) ، حيث يتواجد ثاني أكسيد الكربون بتركيز منخفض ضمن غازات المداخن الناتجة عن احتراق الوقود لتوفير الطاقة الحرارية اللازمة لعمليات الإصلاح. ونظراً لانخفاض تركيزه في هذه الغازات، فإن فصله يتطلب تقنيات احتجاز إضافية أكثر تعقيداً واستهلاكاً للطاقة.

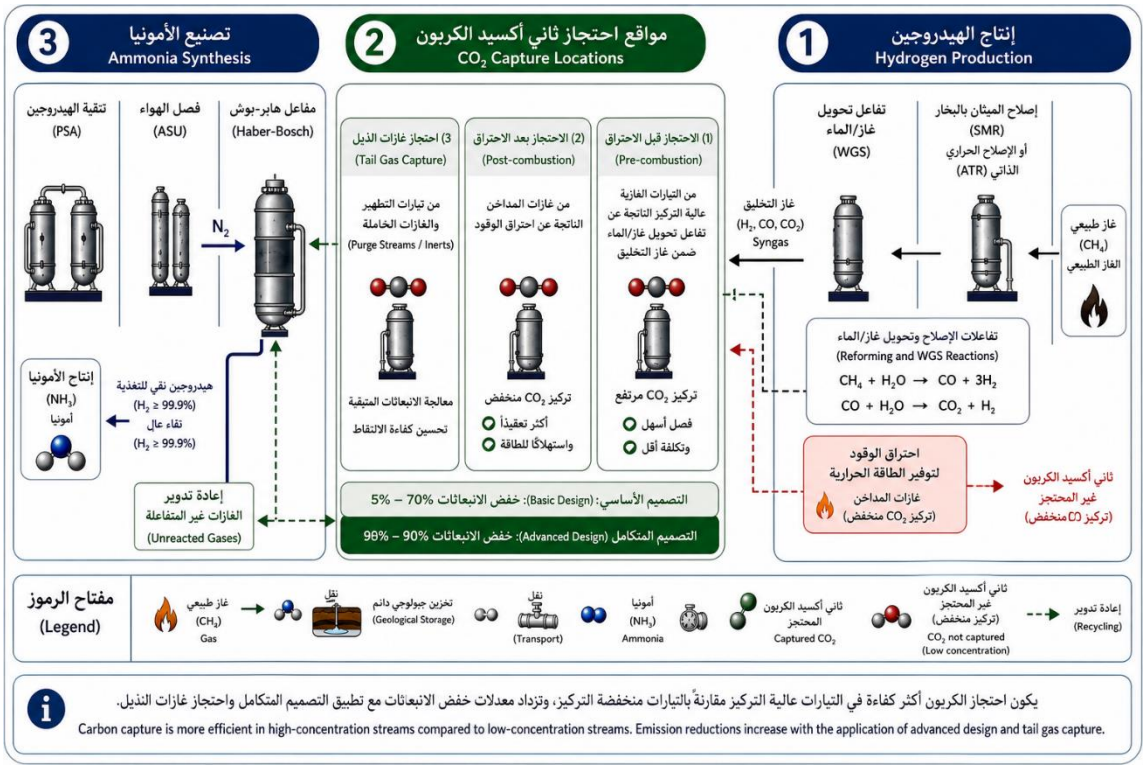
وفي هذا السياق، تتجه بعض المشروعات المتقدمة إلى تبنّي التصميم المتكامل (Advanced Design)، الذي يوسّع نطاق الاحتجاز ليشمل—إلى جانب التيارات الغازية عالية التركيز—غازات المداخن منخفضة التركيز، بما يسهم في رفع معدلات خفض الانبعاثات إلى نحو 85–90% . ويُضاف إلى ذلك موقع ثالث تكميلي يتمثل في احتجاز غازات الذيل (Tail Gas Capture)، والذي يُطبّق في المراحل النهائية من العملية لمعالجة الانبعاثات المتبقية من تيارات التطهير Purge Streams [9] أو الغازات غير المتفاعلة، بما يعزز كفاءة الالتقاط الكلية ويدعم الوصول إلى مستويات أعلى من خفض الانبعاثات.

تعد مرحلة إنتاج الهيدروجين وتنقيته، يُنتج النيتروجين من الهواء باستخدام وحدات فصل الهواء الجوي، ثم يُمزج مع الهيدروجين بنسبة مولية تقارب 1:3، ويدخل الخليط إلى مفاعل هابر–بوش لإنتاج الأمونيا تحت ظروف تشغيل مرتفعة من الضغط ودرجة الحرارة وبوجود محفز مناسب. ثم تُبرّد الغازات الخارجة لتكثيف الأمونيا وفصلها في صورة سائلة، بينما يُعاد تدوير الغازات غير المتفاعلة إلى المفاعل لتحسين كفاءة التحويل.ويبين الشكل (1-5)

[9] تيارات غازية تُسحب من حلقة إعادة التدوير للحد من تراكم الغازات الخاملة والمكونات غير المرغوب فيها، بما يحافظ على كفاءة التفاعل واستقرار التشغيل.

مخطط إنتاج الأمونيا الزرقاء، في التصميمين الأساسي والمتقدم من حيث نطاق احتجاز ثاني أكسيد الكربون.

الشكل (1-5): مخطط إنتاج الأمونيا الزرقاء في التصميمين الأساسي والمتقدم لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون



المصدر: IEA (2021)، Global CCS Institute (2022)، DOE (2023).

1.4.2.1.الأمونيا الخضراء Green Ammonia

يمثل إنتاج الأمونيا الخضراء المسار الأكثر اتساقاً مع أهداف خفض الانبعاثات وتحقيق الحياد الكربوني، إذ يعتمد على إنتاج الهيدروجين عبر تقنيات التحليل الكهربائي للماء باستخدام الكهرباء المولدة من مصادر الطاقة المتجددة، من دون الاعتماد على الوقود الأحفوري. وعلى الرغم من هذا التحول الجوهري في مصدر إنتاج الهيدروجين، فإن المراحل اللاحقة من العملية الصناعية تظل دون تغييرات جوهرية، حيث تستمر عملية تصنيع الأمونيا في الاعتماد على مسار هابر–بوش التقليدي، الذي يقوم على تفاعل الهيدروجين مع النيتروجين تحت ظروف تشغيل مرتفعة من الضغط والحرارة وباستخدام محفزات مناسبة.

تبدأ سلسلة الإنتاج بمرحلة التحليل الكهربائي للماء لإنتاج الهيدروجين باستخدام الكهرباء المتجددة، وذلك عبر تقنيات تجارية معتمدة، من أبرزها التحليل الكهربائي القلوي (Alkaline

(Electrolysis والتحليل الكهربائي بغشاء تبادل البروتون (PEM) ، والتي تختلف من حيث الكفاءة التشغيلية ومستوى النضج التقني.

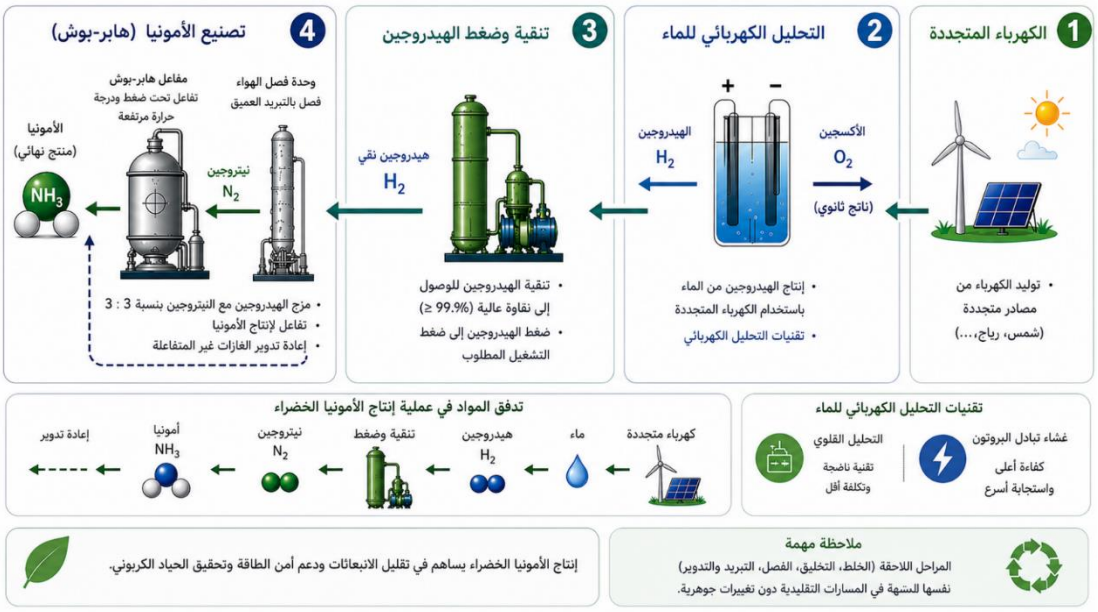
في تقنية التحليل القلوي، يُستخدم محلول قلوي—غالباً هيدروكسيد البوتاسيوم—كإلكتروليت لنقل الأيونات بين القطبين، وتمتاز هذه التقنية بنضجها الصناعي وتكاليفها الاستثمارية المنخفضة نسبياً. في المقابل، تعتمد تقنية غشاء تبادل البروتون على غشاء بوليمري صلب يسمح بانتقال البروتونات فقط، ما يتيح تشغيلها عند كثافات تيار أعلى، أي تمرير كمية أكبر من التيار الكهربائي لكل وحدة مساحة داخل الخلية، وهو ما ينعكس في زيادة معدل إنتاج الهيدروجين وقدرة أعلى على الاستجابة السريعة لتذبذب إمدادات الكهرباء من المصادر المتجددة. ومع ذلك، يرتبط هذا النمط التشغيلي عادةً بتكاليف رأسمالية أعلى. وقد أسهمت التطورات الحديثة في تصميم الخلايا الكهروكيميائية ومواد الأقطاب وأنظمة القدرة الكهربائية في تحسين كفاءة هذه التقنيات وتعزيز موثوقيتها التشغيلية.

وبالتوازي مع إنتاج الهيدروجين، يُوفَّر النيتروجين اللازم عبر وحدات فصل الهواء باستخدام تقنيات فصل تقليدية، مع بقاء هذه المرحلة دون تغييرات جوهرية مقارنةً ببقية المسارات الإنتاجية. عقب ذلك، يُمزج الهيدروجين عالي النقاوة مع النيتروجين بنسبة مولية تقارب 1:3، ويدخل الخليط إلى مفاعل هابر–بوش لإنتاج الأمونيا تحت ظروف تشغيل مرتفعة من الضغط والحرارة، ثم تُبرَّد الغازات الخارجة لتكثيف الأمونيا وفصلها في صورة سائلة، بينما يُعاد تدوير الغازات غير المتفاعلة إلى المفاعل لتحسين كفاءة التحويل[10]. يبين **الشكل (1-6)** مخطط إنتاج الأمونيا الخضراء". ويبين **الشكل (1-7)** مقارنة أنواع الأمونيا.

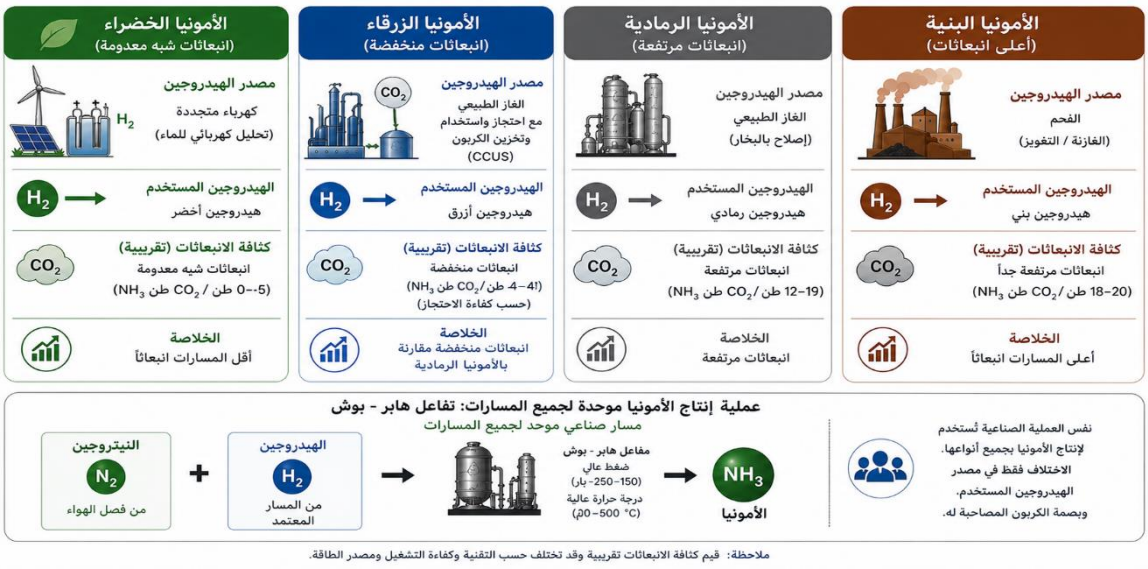
10 Appl, M., Ammonia: Principles and Industrial Practice, Wiley-VCH

الشكل (1-6): مخطط إنتاج الأمونيا الخضراء

المصدر: من إعداد الباحث استناداً إلى مراجع دولية متخصصة في مسارات إنتاج الأمونيا الخضراء.



الشكل (1-7): مقارنة أنواع الأمونيا



المصدر: من إعداد الباحث استناداً إلى مراجع دولية متخصصة في مسارات إنتاج الأمونيا

1.4.2.1. كفاءة منظومة الأمونيا الخضراء

يُعد تحسين كفاءة إنتاج الأمونيا الخضراء من القضايا المحورية في الأبحاث الحديثة، نظراً لأن إنتاج الهيدروجين عبر التحليل الكهربائي للماء يمثل المرحلة الأكثر استهلاكاً للطاقة، وبالتالي العامل الحاسم في تحديد كفاءة المنظومة وتكلفتها. وتشير الدراسات إلى أن هذه العملية تتطلب حد أدنى نظرياً من الجهد الكهربائي—أي فرق الجهد اللازم لدفع التفاعل وفصل الماء إلى

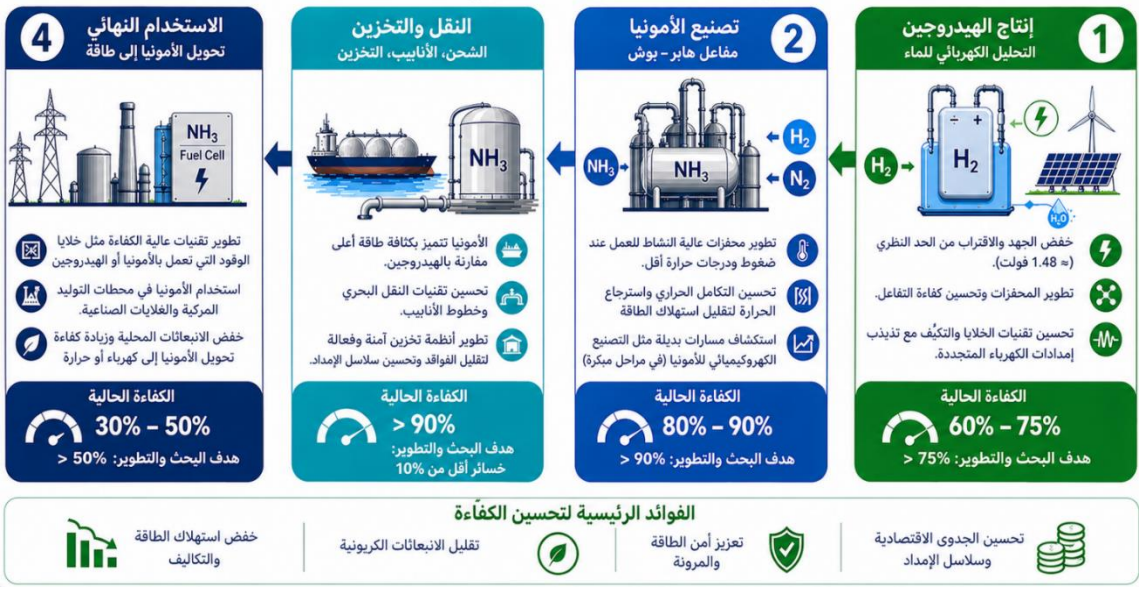
هيدروجين وأكسجين—يبلغ نحو 1.48فولت .غير أن التشغيل الفعلي يستلزم جهد أعلى نتيجة الفواقد داخل النظام، مثل مقاومة المواد والخسائر المرتبطة بنقل الشحنات وتنشيط التفاعل. ومن ثم، فإن تقليل الجهد المستخدم والاقتراب من هذا الحد المثالي يُسهم في رفع كفاءة إنتاج الهيدروجين وخفض استهلاك الطاقة وتكلفتها.

وفي هذا الإطار، يلعب تطوير المواد الحفازة وأنظمة التحليل الكهربائي دوراً رئيسياً في تحسين الأداء، إذ تتيح المحفزات المتقدمة تسريع التفاعلات وتقليل الطاقة اللازمة لبدئها، في حين يسهم تحسين تقنيات خلايا التحليل الكهربائي—سواء القلوية أو المعتمدة على أغشية تبادل البروتون—في تعزيز استقرار التشغيل وزيادة القدرة على التكيّف مع تذبذب إمدادات الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة، ولا سيما في الأنظمة المعتمدة على الطاقة الشمسية وطاقة الرياح.

لا يقتصر تحسين الكفاءة على مرحلة إنتاج الهيدروجين، بل يمتد إلى مرحلة تصنيع الأمونيا في مفاعل هابر–بوش، حيث تتركز الجهود على تطوير محفزات تتيح تشغيل العملية عند ضغوط ودرجات حرارة أقل، بما يقلل استهلاك الطاقة ويحسن كفاءة استخدام الحرارة داخل النظام. وبالتوازي مع ذلك، تتجه بعض الأبحاث إلى استكشاف تقنيات بديلة، مثل الإنتاج المباشر للأمونيا باستخدام الكهرباء، وهي تقنيات واعدة على المدى الطويل، لكنها لا تزال في مراحلها المبكرة. وعلى مستوى المنظومة ككل، تُعد كفاءة النقل والتخزين عاملاً مهماً في الجدوى الاقتصادية، إذ تتميز الأمونيا بقدرتها على تخزين الطاقة بكثافة أعلى مقارنة بالهيدروجين، ما يجعلها أكثر ملاءمة للنقل والتخزين على نطاق واسع. وتسعى الدراسات الحديثة إلى تطوير وسائل النقل البحري وخطوط الأنابيب وتقنيات التخزين بهدف تقليل الفواقد وتحسين كفاءة سلاسل الإمداد. وفي ضوء ذلك، يُعد تقييم كفاءة دورة الطاقة الكاملة—التي تشمل الإنتاج والنقل والتخزين والاستخدام النهائي—أمراً أساسياً لتحديد دور الأمونيا الخضراء في أنظمة الطاقة المستقبلية. ويعتمد ذلك على تطوير تقنيات فعّالة لتحويل الأمونيا إلى طاقة، مثل خلايا الوقود ومحطات توليد الكهرباء، بما يعزز من دورها كوسيط لتخزين الطاقة ونقلها واستخدامها[11]. يبين الشكل (1-8) مخطط كفاءة منظومة الامونيا الخضراء.

11 International Renewable Energy Agency, Green Hydrogen Cost Reduction, 2020.

الشكل (1-8) : مخطط كفاءة منظومة الامونيا الخضراء



المصدر: من إعداد الباحث استناداً إلى مراجع دولية متخصصة في مسارات إنتاج الأمونيا

3.1. كثافة استهلاك الطاقة والانبعاثات في صناعة الأمونيا ومحدداتها

تُظهر البيانات الحديثة الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة أن صناعة الأمونيا تُعد من أكثر الأنشطة الصناعية كثافةً في استهلاك الطاقة والانبعاثات الكربونية على المستوى العالمي، وهو ما يعكس الطبيعة الهيكلية لهذا القطاع، إذ تتركز الحصة الأكبر من استهلاك الطاقة والانبعاثات في مرحلة إنتاج الهيدروجين اللازمة لعملية تصنيع الأمونيا، والتي تُعد الأكثر كثافة في الطاقة ضمن هذه الصناعة. إذ يستهلك هذا القطاع نحو 2% من إجمالي الاستهلاك النهائي للطاقة عالمياً، بما يعادل نحو 8.6 إكسا جول سنوياً، كما يسهم بنحو 1.3% من إجمالي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المرتبطة بالطاقة، أي ما يقارب 450 مليون طن سنوياً.

يرتبط هذا المستوى المرتفع من الاستهلاك والانبعاثات بشكل مباشر بطبيعة مسارات الإنتاج التقليدية، حيث يُستخدم الوقود الأحفوري ليس فقط كمصدر للطاقة الحرارية، بل أيضاً كلقيم لإنتاج الهيدروجين اللازم لعملية التخليق وفق مسار هابر–بوش، مما يؤدي إلى انبعاثات مزدوجة ناتجة عن احتراق الوقود والتفاعلات الكيميائية. ومن ثم، فإن أي تحول نحو خفض الانبعاثات في هذا القطاع يظل مرهوناً بدرجة كبيرة بتغيير مصدر الهيدروجين وتحسين كفاءة العمليات الصناعية[12].

12 (IEA) ،Ammonia Technology Roadmap ،Net Zero by 2050 – Industry Updates (2024).

في هذا السياق، يرتبط الأداء البيئي لصناعة الأمونيا ارتباطاً وثيقاً بتوزيع مزيج اللقيم المستخدم عالمياً، إذ تعكس مسارات الإنتاج المختلفة مستويات متفاوتة من كثافة الانبعاثات. وتشير البيانات إلى هيمنة المسارات المعتمدة على الغاز الطبيعي، التي تمثل نحو 73% من الإنتاج العالمي، نظراً لما توفره من توازن نسبي بين الكفاءة التشغيلية والتكلفة. في المقابل، يعتمد نحو 26% من الإنتاج على تغويز الفحم—لا سيما في الصين—وهو ما يرتبط بكثافة انبعاثات أعلى نتيجة الطبيعة الكربونية المرتفعة لهذا اللقيم. أما المسارات المعتمدة على المنتجات النفطية، مثل النافثا والزيوت الثقيلة، فلا تمثل سوى حصة هامشية تُقدّر بنحو 1%، بسبب ارتفاع تكلفتها وكثافة انبعاثاتها [13].

على الرغم من التقدم التقني، لا تزال مسارات الإنتاج القائمة على التحليل الكهربائي لإنتاج الهيدروجين الأخضر محدودة الانتشار التجاري، إذ تمثل حالياً أقل من 0.3% من إجمالي الإنتاج العالمي. ويعكس ذلك فجوة بين الإمكانات التقنية والجدوى الاقتصادية، في ظل التحديات المرتبطة بتكاليف الإنتاج، وتوافر الكهرباء المتجددة بأسعار تنافسية، وتطوير البنية التحتية الداعمة.

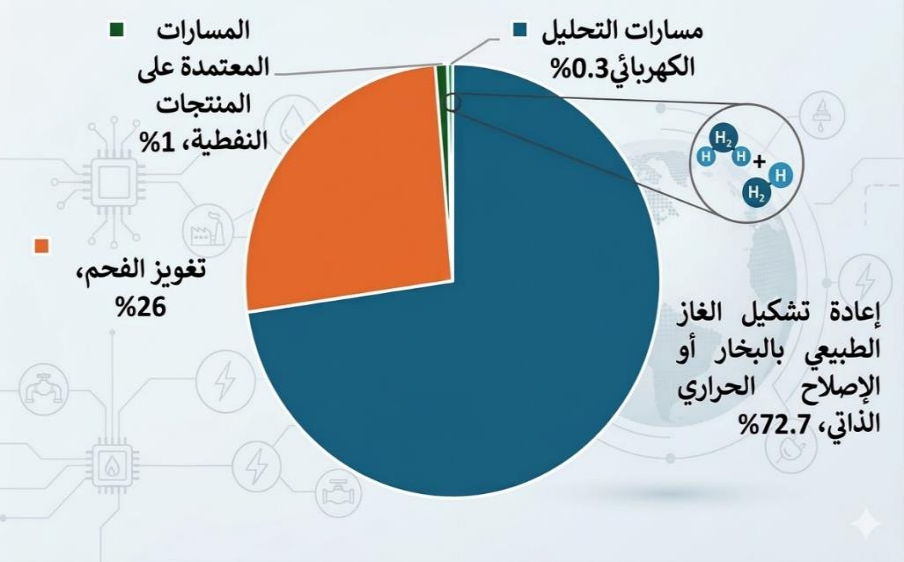
يشير هذا التوزيع إلى أن هيكل الإنتاج العالمي سيظل معتمداً على الوقود الأحفوري في الأجل القريب، مما يجعل مسار إزالة الكربون قائماً في المقام الأول على حلول انتقالية، تشمل تحسين كفاءة العمليات القائمة ودمج تقنيات احتجاز واستخدام وتخزين الكربون، إلى جانب التوسع التدريجي في إنتاج الهيدروجين منخفض الانبعاثات[14-15]. يبين **الشكل (1-9)** التوزيع النسبي لمزيج اللقيم المستخدم في الإنتاج العالمي للأمونيا.

13 IFA, Global Ammonia Production and Feedstock Mix, 2024

14 International Fertilizer Association (IFA) (2023). Ammonia Production and Energy Use

15 IRENA. Innovation Outlook: Renewable Ammonia. International Renewable Energy Agency. (2022).

الشكل (1-9): التوزيع النسبي لمزيج اللقيم المستخدم في الإنتاج العالمي للأمونيا



المصدر: IEA 2024

لا يكتمل فهم البصمة الكربونية لصناعة الأمونيا دون النظر إلى التوزيع الجغرافي للإنتاج والتجارة الدولية، لما لذلك من تأثير مباشر على توزيع الانبعاثات بين الدول والمناطق. إذ تُعد الصين المنتج الأكبر عالمياً بحصة تقارب 30%، ويعتمد جزء كبير من إنتاجها على مسارات تغويز الفحم، مما ينعكس في ارتفاع كثافة الانبعاثات مقارنة بالمناطق التي تعتمد على الغاز الطبيعي.

في المقابل، تسهم كل من روسيا ودول الشرق الأوسط والولايات المتحدة والاتحاد الأوروبي والهند بحصص تتراوح بين 8% و10% لكل منها، مع تباين واضح في البصمة الكربونية يعكس اختلاف مزيج اللقيم ومسارات الإنتاج. فبينما تعتمد بعض الدول بدرجة أكبر على الفحم، تعتمد مناطق أخرى—مثل الشرق الأوسط وأمريكا الشمالية—بصورة رئيسية على الغاز الطبيعي، مما يمنحها ميزة نسبية من حيث انخفاض كثافة الانبعاثات.

مما تقدم نستنتج أن البصمة الكربونية لصناعة الأمونيا تتحدد من خلال تفاعل مجموعة من العوامل، تشمل خصائص العمليات الصناعية، ومزيج اللقيم المستخدم، والتوزيع الجغرافي للإنتاج، وأنماط التجارة الدولية، بما في ذلك تدفقات نقل الأمونيا بين المناطق.

4.1.التجارة الدولية وهيكل الأصول الصناعية كعوامل محدِّدة للبصمة الكربونية ومسار خفض الانبعاثات

أصبحت التجارة الدولية للأمونيا ومشتقاتها عاملاً مهماً في إعادة توزيع الإنتاج والاستهلاك عبر الحدود، بما يضيف بعداً إضافياً لتعقيد البصمة الكربونية للقطاع. إذ يُصدَّر نحو

10% من إجمالي الإنتاج العالمي من الأمونيا إلى الأسواق الخارجية، في حين يُتداول نحو 30% من الإنتاج العالمي لليوريا عبر التجارة الدولية، وهو ما يعكس درجة أعلى من التكامل التجاري في أسواق الأسمدة. ويعني ذلك أن جزءاً من الانبعاثات المرتبطة بإنتاج الأمونيا يتولد في الدول المنتِجة، بينما تُستهلك المنتجات النهائية في دول أخرى، مما يخلق فجوة جغرافية بين مواقع الإنتاج والاستهلاك، ويطرح تحديات إضافية فيما يتعلق بتوزيع المسؤوليات المرتبطة بخفض الانبعاثات.

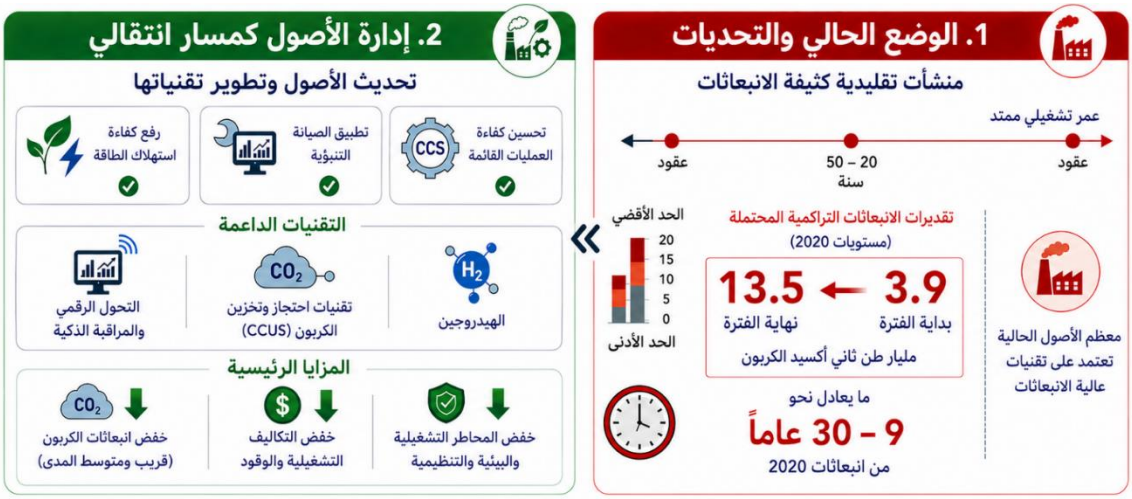
في هذا السياق، يبرز التباين الجغرافي في مسارات الإنتاج بوصفه عاملاً مرتبطاً بطبيعة الأصول الصناعية القائمة وأعمارها التشغيلية، والتي تُعد من أبرز المحددات الهيكلية لمستويات الانبعاثات الحالية والمستقبلية. إذ تعتمد غالبية منشآت إنتاج الأمونيا حول العالم على تقنيات تقليدية كثيفة الانبعاثات، ولا تزال ضمن عمرها التشغيلي الطبيعي الذي يتراوح عادة بين 20 و50 عاماً. وتشير التقديرات إلى أنه في حال استمرار تشغيل هذه المنشآت دون إدخال تحسينات جوهرية على كفاءة العمليات أو تطبيق تقنيات فعّالة لخفض الانبعاثات، فإنها قد تسهم بانبعاثات تراكمية تتراوح بين 3.9 و13.5 مليار طن من ثاني أكسيد الكربون خلال فترة تشغيلها المتبقية، وهو ما يعادل نحو 9 إلى 30 عاماً من الانبعاثات عند مستويات عام 2020[16].

في ظل القيود التي تفرضها الأصول الصناعية القائمة وطول أعمارها التشغيلية، تبرز إدارة الأصول وتحديثها تقنياً كأحد المسارات الانتقالية الرئيسية لخفض الانبعاثات في قطاع الأمونيا. ويتيح هذا النهج تحقيق خفض ملموس في الانبعاثات على المدى القريب والمتوسط من خلال تحسين كفاءة العمليات القائمة ودمج تقنيات خفض الانبعاثات، دون الحاجة إلى استبدال كامل وفوري للبنية التحتية الصناعية. وبذلك، يسهم هذا المسار في الحد من المخاطر الاقتصادية والتشغيلية المرتبطة بعمليات التحول الجذري السريع، مع توفير مساحة زمنية لتطوير ونشر التقنيات منخفضة الكربون على نطاق أوسع[17].يبين الشكل (1-10) تأثير الأصول الصناعية القائمة واعمارها التشغيلية على مسارات خفض الانبعاثات.

16 IEA – Net Zero Emissions by 2050, 2023.

17 (IPCC AR6 2023؛ IFA Nutrient Management 2023).

الشكل (1-10): تأثير الأصول الصناعية القائمة واعمارها التشغيلية على مسارات خفض الانبعاثات



المصدر: إعداد الباحث، استناداً إلى International Energy Agency، Ammonia Technology Roadmap, 2023؛ وبيانات صناعية.

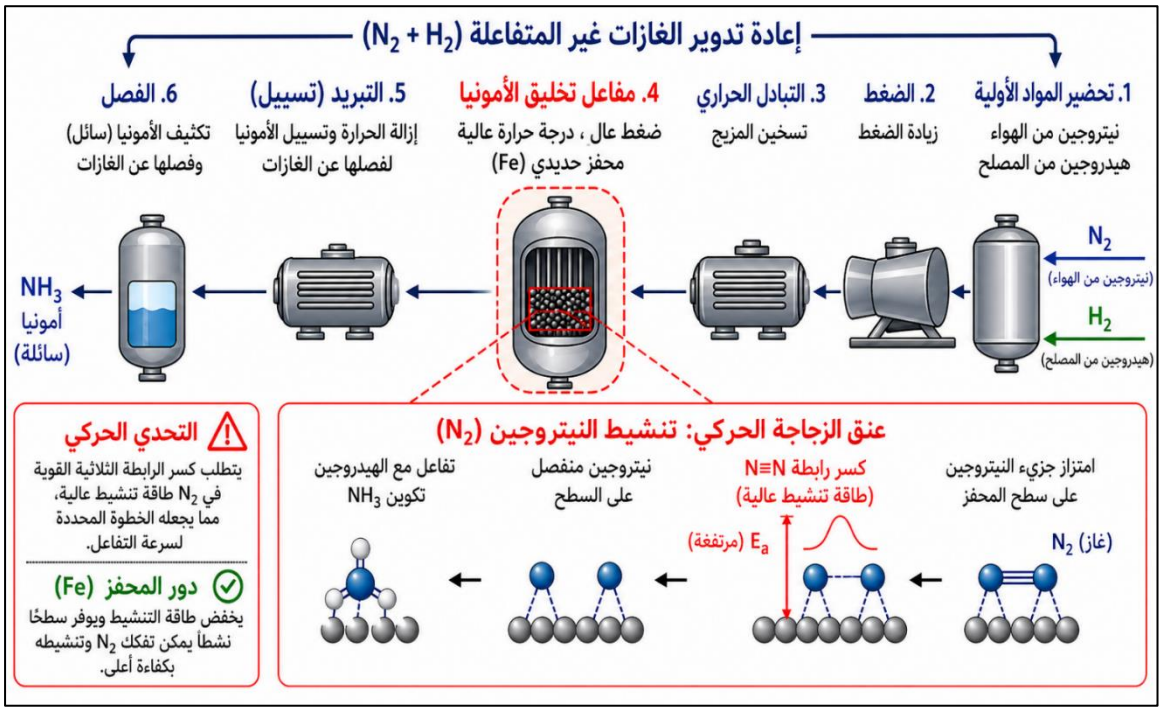
5.1. التقنيات الناشئة لإنتاج الأمونيا منخفضة الكربون

شهدت السنوات الأخيرة تحولاً نوعياً في توجهات البحث والتطوير في صناعة الأمونيا، حيث لم يعد التركيز مقتصراً على تحسين كفاءة إنتاج الهيدروجين، بل امتد ليشمل معالجة القيود الحركية المرتبطة بمرحلة التصنيع نفسها. وفي هذا الإطار، سلطت التقنيات الناشئة الضوء على أهمية تحسين تنشيط جزيء النيتروجين(N_2) ، بوصفه العامل الحاسم في تحديد سرعة التفاعل وكفاءة العملية، نظراً لقوة الرابطة الثلاثية التي تربط ذرتيه وما تفرضه من متطلبات طاقة مرتفعة. في هذا السياق، يبين الشكل (1-10) أن مفاعل التصنيع في عملية هابر–بوش يمثل الحلقة الحاكمة حركياً في عملية إنتاج الأمونيا، حيث تُعد خطوة تنشيط جزيء النيتروجين—وخاصة كسر الرابطة الثلاثية—عنق الزجاجة الحركي الذي يحد من سرعة التفاعل. ويفسر ذلك الحاجة إلى التشغيل تحت ظروف مرتفعة من الضغط ودرجة الحرارة لتحقيق معدلات إنتاج صناعية ملائمة.

واستجابةً لهذا التحدي، تتجه الجهود البحثية نحو تطوير تقنيات قادرة على خفض طاقة التنشيط المرتبطة بتفعيل النيتروجين، بما يسهم في تحسين الحركية kinetics وتقليل متطلبات الطاقة الإجمالية للعملية. وتشمل هذه التقنيات التحفيز المتقدم—ولا سيما محفزات الذرة المفردة والتحفيز الكهروكيميائي، والتحفيز الضوئي، والتحفيز الضوئي البلازموني، إضافة إلى مسارات الإنتاج المباشر للأمونيا التي تتجاوز جزئياً القيود المفروضة في المسار التقليدي.

وعلى الرغم من الإمكانات الواعدة لهذه التقنيات في خفض استهلاك الطاقة والانبعاثات الكربونية، لا تزال معظمها في مراحل مبكرة أو متوسطة من التطوير، مع تباين في مستويات الجاهزية التقنية، الأمر الذي يحد من انتشارها الصناعي واسع النطاق في الوقت الراهن مقارنةً بعملية عملية هابر–بوش التقليدية [18]. يبين الشكل (1-11) مخطط إنتاج الأمونيا مع إبراز تنشيط النيتروجين كخطوة محددة لسرعة التفاعل.

الشكل (1-11): مخطط إنتاج الأمونيا مع إبراز تنشيط النيتروجين كخطوة محددة لسرعة التفاعل



المصدر: من إعداد الباحث استناداً إلى مراجع دولية متخصصة في مسارات إنتاج الأمونيا

1.5.1.تقنية محفزات الذرة المفردة (Single-Atom Catalysts – SACs)

تمثل محفزات الذرة المفردة أحد المسارات البحثية الواعدة لتحسين كفاءة إنتاج الأمونيا، نظراً لقدرتها على معالجة التحدي الجوهري في هذه الصناعة والمتمثل في تنشيط جزيء النيتروجين وكسر الرابطة الثلاثية القوية فيه. ويعتمد هذا النهج على تثبيت ذرات فلزية منفردة—مثل الحديد أو الروثينيوم أو الكوبالت—على دعامات صلبة، بما يتيح تحقيق أقصى استفادة

18 (Chemical Society Reviews, 2024)

ممكنة من كل ذرة فلزية بوصفها موقعاً نشطاً، مع توفير بيئة إلكترونية دقيقة تسهم في تحسين انتقائية التفاعل.

تُظهر هذه المحفزات قدرة ملحوظة على تعزيز امتصاص جزيء النيتروجين وإضعاف روابطه، مما يؤدي إلى خفض طاقة التنشيط اللازمة للتفاعل. كما تُبين الدراسات أن تصميم هذه المواقع على المستوى الذري يمكن أن يحسن آليات التفاعل في كلٍ من الأنظمة الحرارية والمسارات الكهروكيميائية، بما يتيح إجراء التفاعل عند ظروف تشغيل أكثر اعتدالًا مقارنةً بعملية عملية هابر-بوش .إذ تشير التقديرات إلى إمكانية تشغيل بعض هذه الأنظمة عند درجات حرارة تتراوح بين 25 و300 مْ، وضغوط منخفضة نسبياً لا تتجاوز 10 بار، مقابل نحو 400–500 مْ و150–300 بار في العملية التقليدية، وهو ما ينعكس في خفض استهلاك الطاقة—الذي قد يصل في بعض التطبيقات البحثية إلى نحو 50%—إضافةً إلى تقليل الانبعاثات الكربونية، لا سيما عند دمج هذه التقنيات مع مصادر الطاقة المتجددة.

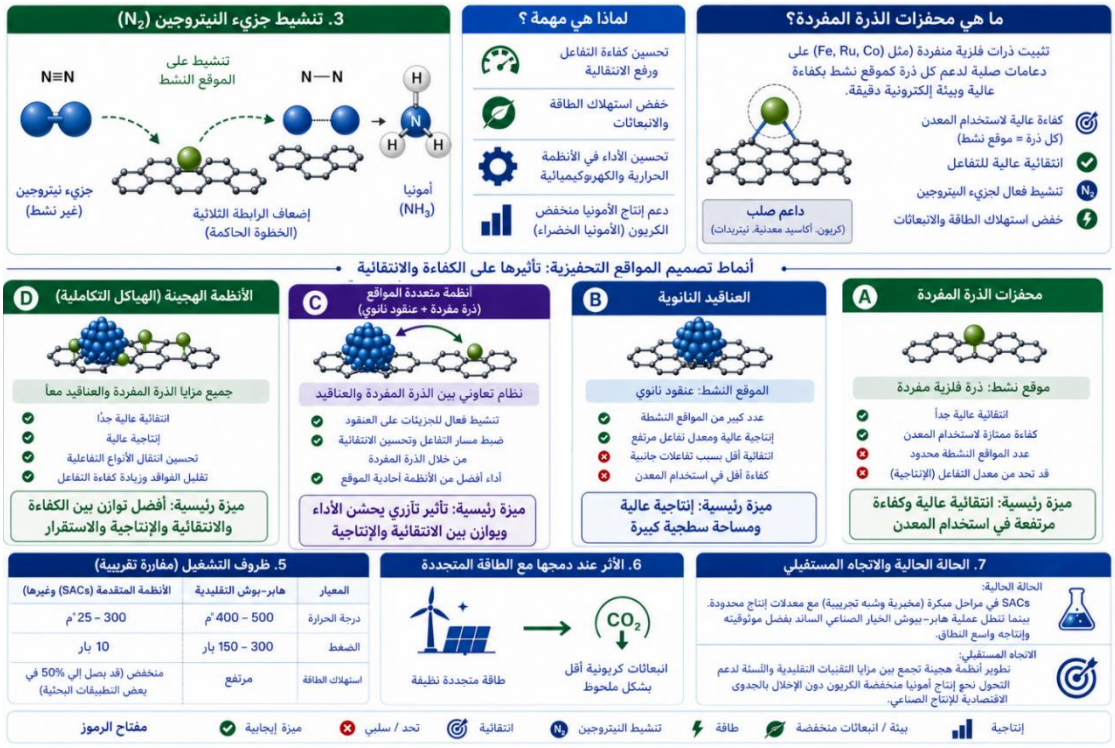
وعلى الرغم من هذه المزايا، فإن الاستفادة العملية من محفزات الذرة المفردة لا تزال مقيدة بعدد من التحديات، أبرزها محدودية عدد المواقع النشطة، وصعوبة الحفاظ على استقرار الذرات المنفردة ومنع تكتلها تحت ظروف التشغيل، فضلًا عن التحديات المرتبطة بالتوسع الصناعي. وفي هذا الإطار، يوضح الشكل (1-12) أن كفاءة التفاعل لا تعتمد فقط على نوع المحفز، بل على طبيعة توزيع المواقع النشطة ضمن البنية التحفيزية. فبينما تُظهر **محفزات الذرة المفردة** كفاءة عالية في استخدام المعدن وانتقائية مرتفعة، فإن محدودية عدد هذه المواقع قد تقيد الإنتاجية الكلية. في المقابل، توفر **العناقيد النانوية** عدداً كبيراً من المواقع الفعالة يدعم الإنتاج على نطاق واسع، إلا أنها قد تعاني من انخفاض الانتقائية.

وانطلاقًا من ذلك، تبرز **الأنظمة متعددة المواقع**—التي تجمع بين الذرات المفردة والعناقيد النانوية—بوصفها حل تكاملي، حيث تسهم العناقيد في تنشيط الجزيئات، بينما تضبط الذرات المفردة مسار التفاعل وتحسن انتقائيته. وتذهب **الأنظمة التحفيزية الهجينة** إلى أبعد من ذلك، إذ تدمج مزايا هذين النهجين ضمن بنية واحدة، بما يعزز انتقال الأنواع التفاعلية ويحد من الفواقد، وينعكس إيجاباً على الكفاءة الكلية للعملية.

وعلى الرغم من هذه الإمكانات، لا تزال محفزات الذرة المفردة في مراحل مبكرة من حيث الجاهزية التقنية، إذ تقتصر تطبيقاتها على النطاقين المخبرى وشبه التجريبي مع معدلات إنتاج محدودة، في حين تظل عملية هابر-بوش الخيار الصناعي السائد بفضل قدرتها على تحقيق إنتاج

واسع النطاق بكفاءة تشغيلية عالية وموثوقية مثبتة. ومن هذا المنطلق، تتركز الجهود البحثية الحالية على تطوير أنظمة تحفيزية هجينة تجمع بين مزايا التقنيات التقليدية والناشئة، بما يدعم التحول نحو إنتاج أمونيا منخفضة الكربون دون الإخلال بالجدوى الاقتصادية للإنتاج الصناعي.

الشكل (1-12): محفزات الذرة المفردة والأنظمة الهجينة في إنتاج الأمونيا



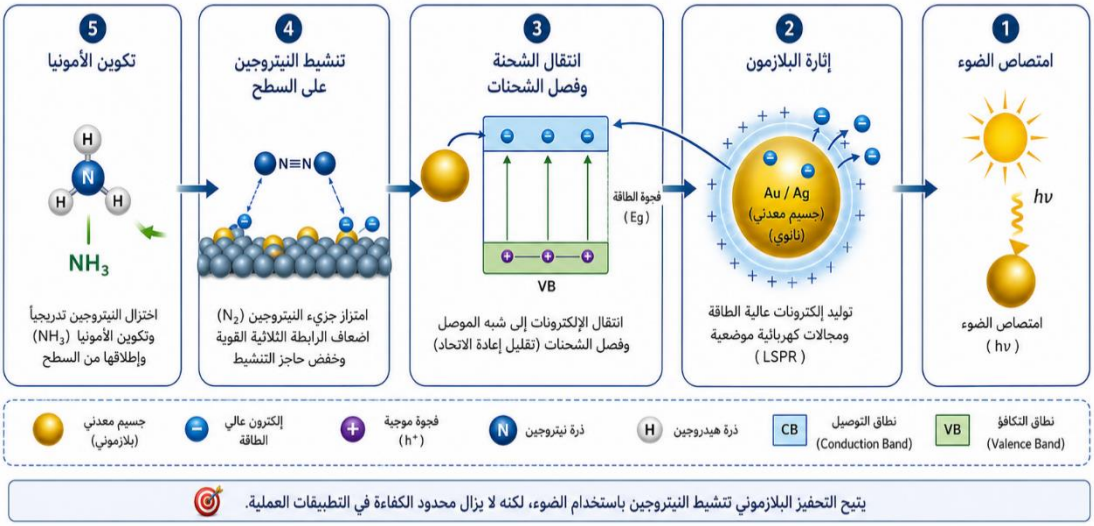
2.5.1. تقنية التحفيز الضوئي البلازموني (Plasmonic Photocatalysis)

يعتمد هذا المسار على ظاهرة الرنين البلازموني السطحي الموضعي Localized Surface Plasmon Resonance – LSPR في الجسيمات المعدنية النانوية، حيث يؤدي امتصاص الضوء إلى توليد إلكترونات عالية الطاقة ومجالات كهربائية موضعية مكثفة على سطح المحفز. وتُسهم هذه الإلكترونات في تنشيط جزيئات النيتروجين الممتزة عبر إضعاف الروابط الثلاثية، مما يخفض حاجز التنشيط للتفاعل. ويتيح ذلك إجراء اختزال النيتروجين في ظروف تشغيل أكثر اعتدالًا مقارنةً بعملية هابر-بوش، مع إمكانية الاستفادة المباشرة من الطاقة الشمسية. كما يؤدي دمج المواد البلازمونية مع أشباه الموصلات إلى تحسين فصل الشحنات وتقليل إعادة الاتحاد (Recombination)، بما يعزز كفاءة التفاعل.

ومع ذلك، لا تزال هذه التقنية محدودة من حيث التطبيق العملي، نتيجة انخفاض الكفاءة الكمية ومعدلات الإنتاج، إضافةً إلى تحديات استقرار المواد تحت الإشعاع المستمر. وبناءً على

ذلك، تُصنَّف ضمن المراحل المبكرة جدًا من الجاهزية التقنية(TRL≈1) ، مع اقتصارها حالياً على نطاق إثبات المفهوم المختبري. يوضح الشكل (1-13) إنتاج الأمونيا بالأنظمة البلازمونية- شبة الموصلة وانتقال الشحنة..

الشكل (1-13): مخطط إنتاج الأمونيا بالأنظمة البلازمونية–شبه الموصلة وانتقال الشحنة



المصدر Adapted from representative literature on plasmonic photocatalysis (e.g., Chemical Society Reviews; Nature: Materials reviews)

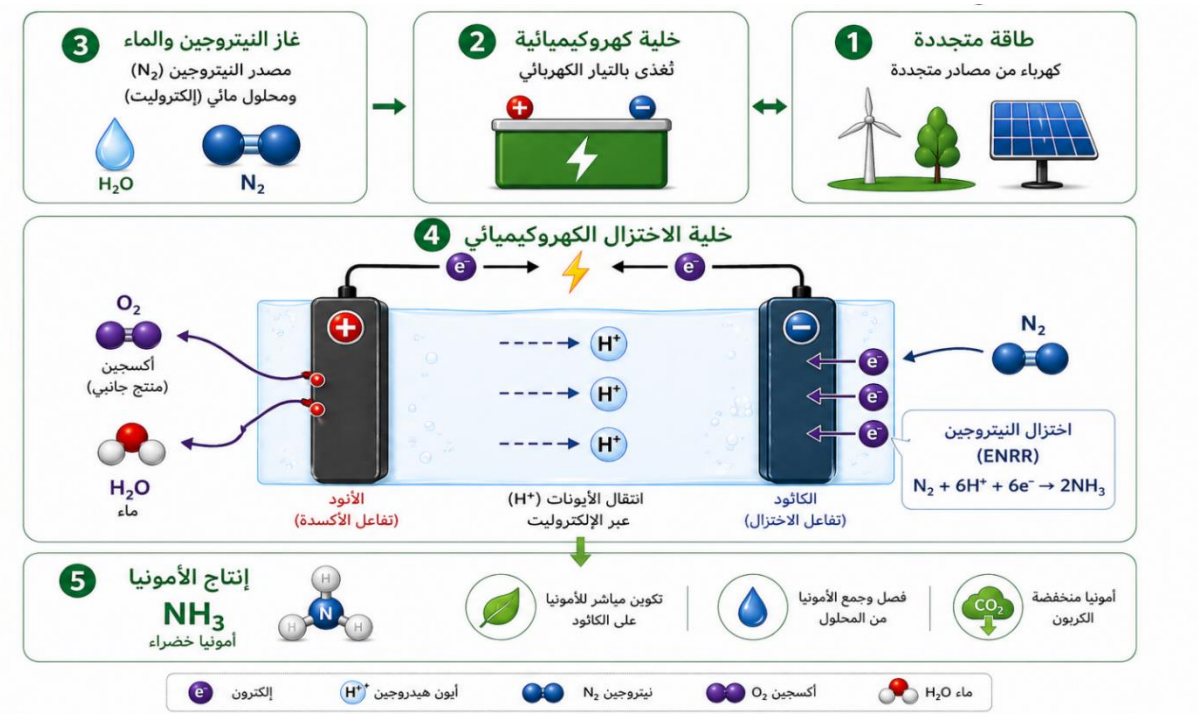
3.5.1. تقنية المسارات الكهروكيميائية لإنتاج الأمونيا

تركّز المسارات الكهروكيميائية لإنتاج الأمونيا على اختزال النيتروجين مباشرةً عند الأقطاب الكهربائية باستخدام تيار كهربائي، يُفضّل أن يكون من مصادر متجددة، دون الحاجة إلى إنتاج الهيدروجين في مرحلة منفصلة كما في عملية هابر-بوش .ويُعد تفاعل الاختزال الكهروكيميائي للنيتروجين Electrochemical Nitrogen Reduction Reaction – ENRR المسار الرئيس في هذه التقنيات، إلى جانب أنظمة وسيطة تنقل المكافئات الاختزالية عبر مواد تفاعلية. وتتميز هذه المقاربة بإمكانية التشغيل في ظروف معتدلة من حيث درجة الحرارة والضغط، إضافةً إلى قابليتها للدمج المباشر مع مصادر الطاقة المتجددة، مما يتيح نماذج إنتاج لامركزية تعزز مرونة سلاسل الإمداد، خاصة في المناطق البعيدة عن البنية الصناعية التقليدية.

ومع ذلك، لا تزال هذه التقنيات تواجه تحديات رئيسية، أبرزها انخفاض معدلات الإنتاج، وتراجع الكفاءة نتيجة التفاعلات الجانبية—وخاصة تفاعل توليد الهيدروجين—إضافةً إلى محدودية استقرار المحفزات أثناء التشغيل. وبناءً على ذلك، تُصنَّف هذه المسارات ضمن المراحل المبكرة من الجاهزية التقنية، حيث تظل في نطاق البحث والتطوير. وعلى الرغم من

ذلك، فإنها تمثل أحد الاتجاهات المستقبلية الواعدة لإنتاج الأمونيا منخفضة الكربون.[19] ويوضح الشكل (1-14) إنتاج الأمونيا الخضراء بتقنية الاختزال الكهروكيميائي للنيتروجين.

الشكل (1-14): إنتاج الامونيا الخضراء بتقنية الاختزال الكهروكيميائي للنيتروجين



المصدر: Electrochemical ammonia synthesis

يتضح من التحليل أن مسارات إنتاج الأمونيا شهدت تحولًا تدريجيًا من الاعتماد شبه الكامل على الوقود الأحفوري إلى مزيج متنوع يشمل حلولًا انتقالية وأخرى منخفضة الكربون. ويخضع هذا التحول لمجموعة من المحددات الاقتصادية والتقنية، في مقدمتها تكلفة إنتاج الهيدروجين وتوافر البنية التحتية الداعمة. وفي هذا السياق، تبرز الأمونيا الزرقاء بوصفها خيارًا انتقاليًا يدعم خفض الانبعاثات على المدى المتوسط، مستفيدةً من البنية التحتية القائمة، في حين تمثل الأمونيا الخضراء المسار الاستراتيجي طويل الأجل لتحقيق إنتاج منخفض الكربون يتماشى مع أهداف الحياد الكربوني.

وعليه، فإن مستقبل صناعة الأمونيا لن يعتمد على مسار تقني واحد، بل على مزيج متكامل من الحلول، يتطور تدريجيًا وفقًا للتقدم التكنولوجي، وتكلفة الطاقة، والسياسات المناخية.

19 Chemical Society Reviews, 2024 – Comparative review of electrochemical ammonia production pathways.

قائمة مراجع الفصل الأول

1. International Energy Agency (2021). *Ammonia Technology Roadmap: Towards More Sustainable Nitrogen Fertilizer Production*. Paris.
2. Smil, V. (2001). *Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production*. MIT Press.
3. International Energy Agency (2023). *Ammonia Technology Roadmap*. Paris.
4. International Energy Agency (2023). *Energy Technology Perspectives – Industry*. Paris.
5. International Energy Agency (2024). *CCUS in Clean Energy Transitions*. Paris.
6. International Energy Agency (2024). *Hydrogen and Ammonia Tracking Report*. Paris.
7. International Energy Agency (2023). *Net Zero Emissions by 2050 – Industry*. Paris.
8. Liu, X. et al. (2020). *Life Cycle Assessment of Coal-Based Ammonia Production in China*. Journal of Cleaner Production.
9. Nielsen, A. et al. (2018). *Ammonia Production from Coal and Natural Gas*. Energy Policy.
10. U.S. Department of Energy (2023). *Blue Ammonia Lifecycle Emissions*.
11. International Renewable Energy Agency (2018). *Hydrogen from Renewable Power*. Abu Dhabi.
12. Air Products. *Air Separation Technologies*.
13. Appl, M. (1999). *Ammonia: Principles and Industrial Practice*. Wiley-VCH.
14. U.S. Department of Energy (2020). *Hydrogen Production: Electrolysis*.
15. International Renewable Energy Agency (2020). *Green Hydrogen Cost Reduction*. Abu Dhabi.
16. Nature Energy (2021). *Electrochemical Ammonia Synthesis: State of the Art*.
17. International Fertilizer Association (2023). *Ammonia Production and Energy Use*.
18. International Renewable Energy Agency (2022). *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*. Abu Dhabi.
19. International Fertilizer Association (2024). *Global Ammonia Production and Feedstock Mix*.
20. Intergovernmental Panel on Climate Change (2023). *Sixth Assessment Report (AR6)*.
21. Food and Agriculture Organization & United Nations Environment Programme (2022). *Nitrogen Use Efficiency Assessment*.
22. International Energy Agency (2021). *Global Hydrogen Review*. Paris.
23. Chemical Society Reviews (2024). *Advances in Catalytic Ammonia Synthesis Technologies*.
24. Zhang, X. et al. (2023). *Single-Atom Catalysts for Nitrogen Activation*. Nature Catalysis.

OAPEC
Organization of
Arab Petroleum
Exporting Countries

الفصل الثاني

هيكل سوق الأمونيا العالمي والتحولات التنافسية

التحول منخفض الكربون
نحو أمونيا نظيفة
ومستدامة تنافسياً

محركات السوق
طلب متزايد مدفوع
بالصناعة والطاقة

التجارة والتوزيع
شبكة إمداد عالمية
مرنة وموثوقة

الإنتاج العالمي
قدرة إنتاج متنامية
وتوسع جغرافي

سوق منخفض الكربون ← تحول تنافسي نحو مستقبل منخفض الكربون — سوق تقليدي

الفصل الثاني: هيكل سوق الأمونيا العالمي والتحولات التنافسية

مقدمة

يشهد سوق الأمونيا العالمي تحولًا هيكلياً متسارعًا يعيد صياغة أسس التنافس بين المنتجين، في ظل تفاعل معقد بين تطورات أسواق الطاقة وتغير مزيج اللقيم وتصاعد الضغوط المرتبطة بخفض الانبعاثات الكربونية. ولم يعد التنافس قائمًا على وفرة الموارد أو انخفاض التكاليف التشغيلية فحسب، بل أصبح يتحدد بدرجة متزايدة بقدرة المنتجين على التكيف مع التحولات في هيكل الطلب، إلى جانب تبني مسارات إنتاج أكثر كفاءة وأقل كثافة كربونية. وفي هذا السياق، تشهد خريطة الإنتاج والاستهلاك العالمية تحولات ملحوظة، مع بروز تباينات إقليمية في تكاليف الإنتاج ومزيج اللقيم ومستويات كثافة الانبعاثات، الأمر الذي ينعكس مباشرة على أنماط التجارة الدولية وإعادة تموضع مراكز التنافس، إضافة إلى تطور سلاسل الإمداد العالمية. وفي المقابل، تسهم الاستخدامات الناشئة للأمونيا، لا سيما دورها كحامل للهيدروجين ووقود منخفض الكربون، في إعادة تشكيل ديناميكيات السوق، مع فتح مجالات جديدة للتنافس والاستثمار، إلى جانب بروز عوامل جديدة تحدد مسار النمو والتنافسية في سياق التحول نحو اقتصاد منخفض الكربون.

1.2. تطور نمو الإنتاج العالمي للأمونيا ومحركاته الهيكلية والتنافسية

شهد سوق الأمونيا العالمي خلال الفترة 2024–2025 نمواً تدريجياً في مستويات الإنتاج، حيث ارتفع الإنتاج العالمي من نحو 189.8 مليون طن في عام 2024 إلى حوالي 193.7 مليون طن في عام 2025، مدفوعاً بالتوسع في الطاقات الإنتاجية في عدد من المناطق الصناعية الرئيسة، ولا سيما في آسيا والشرق الأوسط.

ويعزى الجزء الأكبر من هذه الزيادة إلى التوسعات التقليدية كبيرة الحجم، سواء من خلال تحسين معدلات التشغيل في المنشآت القائمة أو دخول مشروعات جديدة تعتمد على مسارات الإنتاج التقليدية إلى حيز التشغيل الفعلي. وفي هذا السياق، شهد عام 2025 دخول مشروع Beaumont في الولايات المتحدة إلى مرحلة الإنتاج بطاقة تقارب 1.1 مليون طن سنوياً، وهو ما يمثل إحدى أكبر الإضافات الفعلية للطاقة الإنتاجية خلال هذه الفترة، مع توجه مستقبلي لدمجه بتقنيات احتجاز الكربون. وتعكس هذه التطورات استمرار دور المشروعات التقليدية في تلبية النمو الكمي في الطلب العالمي.

في المقابل، بدأت مشروعات الأمونيا منخفضة الانبعاثات في تسجيل حضور تدريجي، رغم محدودية مساهمتها الكمية في الوقت الراهن. ففي هذا السياق، بدأ مشروع Envision في الصين إنتاج الأمونيا الخضراء في مرحلة تشغيل أولية منذ مارس 2024، قبل أن يدخل مرحلة التشغيل التجاري خلال عام 2025 بطاقة تُقدّر بنحو 300–320 ألف طن سنوياً، ليُعد من أوائل المشروعات التي نقلت الأمونيا منخفضة الكربون إلى نطاق شبه تجاري. كما دخل مشروع Skovgaard في الدنمارك الخدمة في أواخر عام 2025، معتمداً على نظم تشغيل ديناميكية مرتبطة بالطاقة المتجددة، في خطوة تعكس تطور النماذج التشغيلية لهذا النوع من المشروعات.

وتعكس هذه التطورات نمطاً مزدوجاً في نمو القطاع، حيث تقود التوسعات التقليدية الجزء الأكبر من الزيادة في الإنتاج العالمي، في حين تمثل مشروعات الأمونيا منخفضة الانبعاثات بداية تحول هيكلي تدريجي في منظومة الإنتاج. ويُفسر هذا التباين الزيادة المحدودة، ولكن المستمرة في إجمالي الإنتاج خلال هذه الفترة، في ظل تداخل اعتبارات التوسع الكمي مع التحول النوعي في أنماط الإنتاج. يبين **الشكل (2-1)** نمو إنتاج الأمونيا العالمي (2024-2025)، ومساهمة المشاريع الجديدة.

الشكل (2-1): نمو إنتاج الأمونيا العالمي (2024-2025)، ومساهمة المشاريع الجديدة

المصدر: Researchgate

وعلى الرغم من هذا النمو التدريجي، لم يكن مسار الإنتاج العالمي مستقراً بالكامل خلال السنوات الأخيرة، إذ تأثر بعدد من الصدمات الهيكلية، كان أبرزها أزمة الطاقة في أوروبا، والتي انعكست بشكل مباشر على مستويات الإنتاج والتوازنات الإقليمية في السوق.

2.2. التوزيع الجغرافي للإنتاج ومراكز النمو

يتسم التوزيع الجغرافي لإنتاج الأمونيا العالمي بدرجة عالية من التركز الإقليمي، مع تباينات واضحة في هيكل الإنتاج ومستويات التنافسية بين المناطق. وتستحوذ منطقة آسيا والمحيط الهادئ على الحصة الأكبر من الإنتاج العالمي، بنحو 50–55%، مدفوعة بالطلب المرتفع على الأسمدة في الاقتصادات الزراعية الكبرى، خاصة الصين والهند. ويعتمد جزء كبير من الإنتاج في الصين على الفحم كمصدر لإنتاج الهيدروجين.

في المقابل، تمثل منطقة الشرق الأوسط وأفريقيا نحو 12–15% من الإنتاج العالمي، وتتمتع بميزة تنافسية قائمة على توافر الغاز الطبيعي منخفض التكلفة، إلى جانب إمكانات متزايدة في مجال الطاقة المتجددة. وقد شهدت المنطقة خلال السنوات الأخيرة توجهاً متصاعداً نحو تطوير مشروعات الأمونيا منخفضة الانبعاثات، خاصة تلك الموجهة للتصدير، بما يعزز دورها كمركز رئيسي للإمدادات في السوق العالمي.[20]

أما أمريكا الشمالية، فتستحوذ على نحو 13–15% من الإنتاج العالمي، مستفيدة من وفرة الغاز الصخري التي أسهمت في خفض تكاليف اللقيم وتعزيز القدرة التنافسية. في حين تمثل أوروبا نحو 10–12% من الإنتاج العالمي، إلا أنها واجهت تحديات كبيرة نتيجة ارتفاع أسعار الغاز بعد عام 2022، ما أدى إلى خفض أو إيقاف جزء من قدراتها الإنتاجية، ومن ثم تزايد اعتمادها النسبي على الواردات، رغم تحسن نسبي في عام 2024.[21]

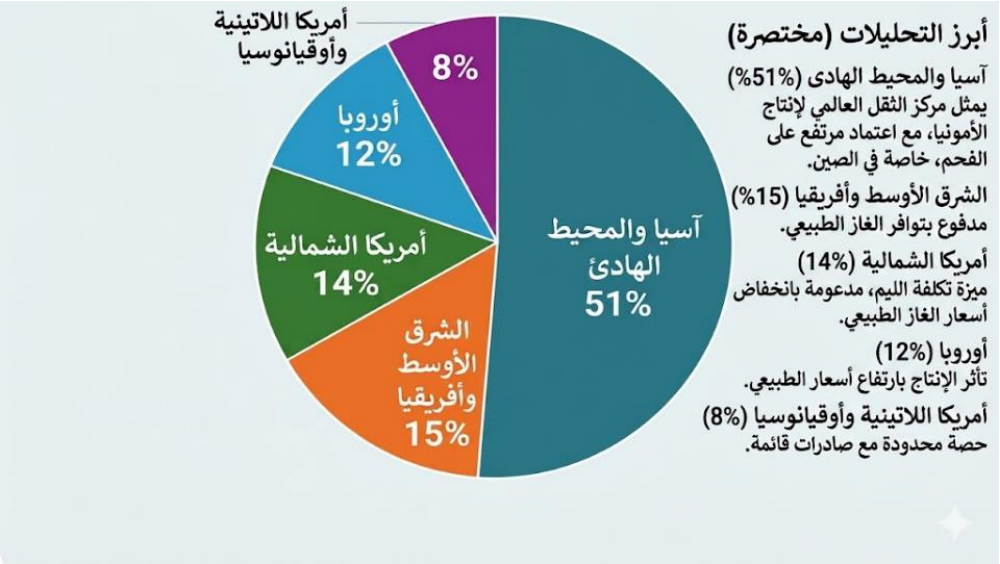
وتساهم كل من أمريكا اللاتينية وأوقيانوسيا بنحو 6–8% من الإنتاج العالمي، مع نمو تدريجي يرتبط بالاستخدامات الصناعية، خاصة في قطاعات التعدين وإنتاج المتفجرات، إلى جانب التوسع في تطوير مشروعات أمونيا خضراء مرتبطة بموانئ التصدير.

20 (U.S. Department of Energy. (2023). Inflation Reduction Act Guidebook: Clean Energy and Climate Investments.

21 (U.S. Energy Information Administration, 2024; BloombergNEF, 2023).

يعكس هذا التباين الجغرافي أن هيكل الإنتاج العالمي لا تحكمه وفرة الموارد والطلب الإقليمي فحسب، بل يتشكل أيضاً من خلال تفاعل مجموعة من العوامل الهيكلية، تشمل تكاليف الإنتاج، والسياسات التنظيمية، وتكامل سلاسل الإمداد، وتوزيع الأصول الصناعية. ومن ثم، يُتوقع أن يشهد العقد القادم تحولات تدريجية في مراكز العرض وأنماط التجارة العالمية، مع بروز مناطق جديدة للإنتاج منخفض الكربون، وتزايد أهمية التكامل بين الإنتاج والتصدير والخدمات اللوجستية. يبين **الشكل (2-2)** التوزيع الجغرافي لإنتاج الأمونيا العالمي حسب المناطق في عام 2024.

الشكل (2-2): التوزيع الجغرافي لإنتاج الأمونيا العالمي حسب المناطق في عام 2024



المصدر: من إعداد الباحث، استناداً إلى تقارير وكالة الطاقة الدولية (IEA) والاتحاد الدولي للأسمدة(IFA) ، إلى جانب بيانات صناعية حديثة

2.2.2.دور المشهد التنافسي وهيكل الشركات في نمو الإنتاج

يتسم سوق الأمونيا العالمي بدرجة متوسطة من التركّز الصناعي، إذ يستحوذ أكبر خمسة منتجين على نحو 35% من إجمالي الطاقة الإنتاجية المركبة عالمياً في عام 2024[22]، وهو ما يمنح هذه الشركات دوراً محورياً في توجيه قرارات الاستثمار والتوسع، وبالتالي التأثير المباشر في وتيرة نمو الإنتاج العالمي. تتصدر شركة CF Industries قائمة المنتجين بطاقة إنتاجية تبلغ نحو 10.4 مليون طن سنوياً، مستفيدة من انخفاض أسعار الغاز الطبيعي، وهو ما يمنحها ميزة تنافسية

22 International Energy Agency (IEA), Ammonia Technology Roadmap, 2021 & Update 2024.
International Fertilizer Association (IFA), Ammonia Production & Capacity Statistics, 2023–2024.
CRU Group, Ammonia Market Outlook, 2024.

واضحة في تكاليف الإنتاج ويعزز قدرتها على التوسع. كما تمتلك الشركة مجمعات إنتاج رئيسية في الولايات المتحدة وكندا والمملكة المتحدة، بما يرسخ حضورها في أسواق رئيسية.

تليها Yara International [23] ، بطاقة تُقدّر بنحو 6.4 مليون طن سنوياً، مدعومة بمحفظة أعمال متنوعة وانتشار جغرافي واسع، إلى جانب استثماراتها في مشروعات الأمونيا منخفضة الكربون ضمن استراتيجيتها للتحول. كما تضم قائمة كبار المنتجين شركات Nutrient و OCI Global و SABIC Agri-Nutrients، التي تستفيد من تنوع أصولها الإنتاجية وانتشارها الجغرافي، بما يمنحها مرونة في التعامل مع تقلبات الأسواق الإقليمية[24].

وفي الشرق الأوسط، تبرز المنطقة—وخاصة الدول الأعضاء في منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول—بوصفها مركزاً مهماً للإنتاج. ففي دولة قطر، تُعد Qatar Fertilizer Company (QAFCO) [25]، من أبرز المنتجين بطاقة تقارب 3.8 مليون طن سنوياً، إلى جانب خطط شركة قطر للطاقة لتطوير مشروعات أمونيا منخفضة الكربون، بما يعزز دور المنطقة في دعم نمو الإمدادات العالمية. كما تلعب التحالفات التكنولوجية دوراً متزايداً في إعادة تشكيل خريطة التنافسية، حيث طورت Johnson Matthey و Thyssenkrupp Uhde حلولاً متقدمة لإنتاج الأمونيا الزرقاء قادرة على احتجاز ما يصل إلى 99% من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، بما يفتح المجال أمام توسيع الإنتاج منخفض الانبعاثات على نطاق أوسع.

كما تتجه شركات مثل Trafigura و Mitsui & Co. إلى تعزيز مواقعها في سلاسل الإمداد العالمية من خلال الاستثمار في البنية التحتية اللوجستية، بما في ذلك مرافق التخزين والشحن، استعداداً للنمو المتوقع في تجارة الأمونيا، سواء كوقود بحري منخفض الكربون أو كحامل للهيدروجين.

يعكس هذا المشهد أن هيكل السوق لا يقتصر على تحديد مواقع الإنتاج الحالية، بل يسهم أيضاً في توجيه مسارات نمو الإنتاج المستقبلي، من خلال تفاعل عوامل التكلفة، والتكنولوجيا، والسياسات، وتكامل سلاسل الإمداد.

---

23 Yara International Annual Report 2024.

24 (Nutrient, 2024; OCI Global, 2024; SABIC Agri-Nutrients, 2024; IFA, 2023)

25 Qatar Fertilizer Company (QAFCO) Company Profile & Annual Data

QatarEnergy Sustainability & Project Reports, 2023–2024

Gulf Petrochemical Industries Company (GPIC) Annual Report 2023

3.2.2. تكاليف إنتاج الأمونيا (الفجوة بين المسارات التقليدية والمنخفضة الكربون)

تشير التقديرات إلى أن تكلفة إنتاج الأمونيا عبر المسارات منخفضة الكربون تزيد بنحو 10–90% مقارنة بالمسارات التقليدية، وهو نطاق يعكس تباين هيكل التكاليف بين هذه المسارات.

يرتبط هذا التباين بشكل رئيس بتكلفة إنتاج الهيدروجين منخفض الكربون، وأسعار الكهرباء المتجددة، ومستوى كفاءة التقنيات، إضافة إلى تكاليف احتجاز الكربون والبنية التحتية المرتبطة به. كما يتأثر بمدى توافر آليات تسعير الكربون والأطر التنظيمية الداعمة.

تظهر البيانات تفاوتاً واضحاً في التكاليف حسب المسار التقني، حيث تتراوح تكاليف إنتاج الأمونيا البنية ما بين 350–450 دولار/طن [26]، بينما تتراوح تكاليف إنتاج الأمونيا الرمادية ما بين 290–400 دولار/طن [27]، في حين تتراوح تكاليف إنتاج الأمونيا الزرقاء ما بين 320–820 دولار/طن [28]، أما الأمونيا الخضراء فتتراوح تكاليف إنتاجها ما بين 400–1240 دولار/طن [29].

تعكس هذه الفروقات اختلاف مستويات النضج التقني والبنية الصناعية. تستفيد المسارات التقليدية من سلاسل إمداد مستقرة، مما يمنحها ميزة تكلفة حالياً. في المقابل، تعتمد المسارات منخفضة الانبعاثات على تقنيات أحدث أو مدخلات طاقة أعلى تكلفة.

ترتبط التكاليف كذلك بكثافة استهلاك الطاقة، التي تمثل أحد المحددات الرئيسية لتكلفة الإنتاج. تتأثر هذه العلاقة بمستوى أسعار الطاقة، حيث يمكن لوفرة اللقيم منخفض التكلفة في بعض المناطق أن تخفف من أثر ارتفاع الاستهلاك.

تشير الاتجاهات المستقبلية إلى احتمال تقلص فجوة التكاليف تدريجياً خلال الفترة (2025–2030)، مدفوعة بتطور التقنيات وتراجع تكاليف الطاقة المتجددة، إلى جانب دور الحوافز التنظيمية في دعم انتشار المسارات منخفضة الكربون.

---

26 IEA, The Future of Hydrogen, 2019.

IEA, Coal Gasification and Hydrogen Production Pathways, technical annexes.

World Bank / IEA, CCUS in Coal-Based Industries, 2020.

27 International Energy Agency (IEA), Ammonia Technology Roadmap, 2021.

IEA, Global Hydrogen Review, 2022–2023.

28 IEA, Ammonia Technology Roadmap, 2021.

Global CCS Institute, Blue Ammonia: Cost and Deployment Pathways, 2022.

29 IEA, Global Hydrogen Review, 2022–2024.

IRENA, Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysis, 2023.

4.2.2. تأثير أزمة الطاقة في أوروبا على إنتاج الأمونيا

شهدت أسواق الطاقة العالمية، ابتداءً من النصف الثاني من عام 2021، تصاعداً حاداً في الاضطرابات بلغ ذروته خلال عام 2022، فيما يُعدّ أحد أبرز الصدمات الهيكلية التي أعادت تشكيل ديناميكيات سوق الأمونيا العالمي. فقد أدى الارتفاع غير المسبوق في أسعار الغاز الطبيعي في أوروبا إلى زيادة كبيرة في تكاليف الإنتاج، مما انعكس مباشرة على مستويات التشغيل والإمدادات.

كما شهدت الصناعة موجة واسعة من تقليص أو توقف الإنتاج في عدد كبير من المنشآت، مع امتداد تأثيرات هذه الصدمة إلى عام 2023، قبل أن تبدأ في الانحسار التدريجي خلال عام 2024. وتشير التقديرات إلى أن الطاقة الإنتاجية المتأثرة تراوحت بين نحو 4.5 و7 ملايين طن سنوياً، مع توقف مؤقت لما يزيد على 70% من القدرة الإنتاجية في بعض الفترات خلال ذروة الأزمة.

وقد اضطرت العديد من الشركات الكبرى إلى اتخاذ إجراءات تشغيلية استثنائية للتعامل مع هذه الظروف. ففي المملكة المتحدة، أعلنت شركة CF Industries إغلاق مصنع Ince بشكل دائم خلال عام 2022، مع تشغيل محدود لمصنع Billingham نتيجة ارتفاع تكاليف الطاقة. كما خفّضت شركة Yara International إنتاجها في عدد من منشآتها الأوروبية إلى نحو 30–40% من الطاقة التشغيلية خلال عام 2022، مع استمرار بعض القيود خلال عام 2023. وفي ألمانيا، قامت شركة BASF بتقليص إنتاج الأمونيا في مجمع Ludwigshafen ، مع التحول جزئياً إلى الاستيراد لتغطية احتياجاتها، فيما لجأت شركة OCI N.V. إلى تعليق أو خفض الإنتاج في هولندا خلال فترات الذروة. وتعكس هذه التطورات كيف تحولت الأزمة من مجرد ارتفاع دوري في الأسعار إلى عامل مؤثر في إعادة توزيع الإنتاج العالمي، وتعزيز تنافسية المناطق منخفضة التكلفة، وزيادة حساسية السوق لتقلبات أسواق الطاقة. يبين الشكل (2-3) تأثير أزمة الطاقة في أوروبا على إنتاج الأمونيا (2021-2024).

الشكل (2-3): تأثير أزمة الطاقة في أوروبا على إنتاج الأمونيا (2021-2024)

المصدر: من إعداد الباحث، استناداً إلى بيانات International Energy Agency (IEA)، وInternational Fertilizer Association، وتقارير الشركات (CF Industries، Yara International، BASF، OCI N.V.)، وتحليل الأمانة العامة لأوابك.

أسهمت هذه التطورات في إعادة توجيه الاستثمارات العالمية نحو مناطق تتمتع بوفرة في موارد الطاقة منخفضة التكلفة أو بانخفاض كثافة الكربون، كما سرّعت من وتيرة التحول نحو مسارات إنتاج منخفضة الانبعاثات. وقد تجلّى ذلك في إرجاء أو إعادة تصميم عدد من المشروعات في الأسواق مرتفعة التكلفة، كما في بعض المبادرات الأوروبية المرتبطة بالهيدروجين والأمونيا منخفضة الكربون مثل H2Teesside و H2H Saltend ، مقابل تسارع الاستثمار في مناطق ذات ميزات تنافسية في الطاقة والبنية التحتية، كما يظهر في مشروعات الأمونيا الخضراء في الشرق الأوسط، بما في ذلك مشروع نيوم في المملكة العربية السعودية ومجمع تعزيز في دولة الإمارات، إضافة إلى عدد من المبادرات في عُمان ومصر. كما شهدت أستراليا وأمريكا اللاتينية إعادة تصميم بعض المشروعات—مثل AREH وHIF Global من خلال تجزئتها أو تأجيل قرار الاستثمار النهائي لحين تأمين عقود شراء وتمويل مستقر. وفي هذا السياق، تداخلت ديناميكيات السوق مع التفاوتات الجغرافية في مزيج اللقيم والأطر التنظيمية، بما أثّر مباشرة على تنافسية الإنتاج ومسارات التحول منخفض الكربون، وأسهم في إعادة تشكيل خريطة الاستثمار والإنتاج على المستوى العالمي.

3.2. تطور الطلب العالمي على الأمونيا ومحركاته الهيكلية

على مستوى الطلب الكلي، تشير التقديرات إلى أن الاستهلاك العالمي للأمونيا بلغ نحو 200–204 ملايين طن في عام 2025، مع استمرار هيمنة قطاع الأسمدة النيتروجينية على هيكل الاستخدامات. كما يُتوقع أن يشهد الطلب المرتبط بالقطاع الزراعي نموًا معتدلًا يقدَّر بنحو 2% سنويًا حتى عام 2030، مدعوماً بالنمو السكاني وتحسن الإنتاجية الزراعية، وهو ما يوفر قاعدة طلب مستقرة تدعم استمرارية الإنتاج العالمي.

وبالإضافة إلى ذلك، تُستخدم كميات أقل من الأمونيا في عدد من الصناعات الكيميائية، بما في ذلك إنتاج البلاستيك، والألياف الصناعية، والمتفجرات، فضلًا عن استخدامها كمادة وسيطة في بعض الصناعات الدوائية. وعلى الرغم من محدودية هذه الاستخدامات مقارنة بقطاع الأسمدة، فإنها تمثل قاعدة طلب صناعي مستقرة ومستمرة.[30]

1.3.2. تحليل السوق حسب المنتج والاستخدام وأثره في نمو الإنتاج

يُعد هيكل السوق حسب نوع المنتج وأنماط الاستخدام من العوامل الأساسية التي تحدد اتجاهات الطلب، وبالتالي وتيرة نمو الإنتاج العالمي للأمونيا. ففيما يتعلق بنوع المنتج، تسيطر الأمونيا السائلة على السوق العالمي بحصة تقارب 95% من الكميات المتداولة في عام 2024، ويرجع ذلك إلى كثافتها الطاقية المرتفعة وسهولة تخزينها ونقلها عبر الموانئ وخطوط الأنابيب مقارنة بالحالة الغازية. كما تدعم هذه الخصائص دورها المتنامي في تطبيقات الطاقة، لا سيما كوقود بحري محتمل، وهو ما يُتوقع أن يدفع نموها بمعدل سنوي يقارب 1.94% حتى عام 2030، مدعوماً بالتوسع في مراكز التزويد بالوقود والتطورات في تقنيات التخزين المبرد وأنظمة العزل.

في المقابل، تظل الأمونيا الغازية محدودة الانتشار، حيث لا تمثل سوى نحو 5% من إجمالي الاستخدامات العالمية، نتيجة ارتفاع تكاليف النقل والتخزين تحت ضغوط مرتفعة، إضافة إلى القيود التنظيمية المرتبطة بالسلامة. ومع ذلك، تحتفظ هذه الصورة بأهمية في عدد من التطبيقات الصناعية المتخصصة التي تتطلب تغذية غازية مباشرة، مثل إنتاج الكابرولاكتام المستخدم في صناعة ألياف النايلون-6، وتصنيع بعض البوليمرات والراتنجات الصناعية، فضلاً

30 IEA – Ammonia Technology Roadmap (2021)

عن استخدامها في إنتاج نترات الأمونيوم للمتفجرات، ومعالجة المياه، وأنظمة خفض أكاسيد النيتروجين (DeNOx) في الصناعات الثقيلة.

ومن حيث الاستخدامات النهائية، يظل القطاع الزراعي المحرك الرئيسي للطلب العالمي على الأمونيا، إذ يستحوذ—بصورة مباشرة وغير مباشرة—على الحصة الأكبر من الاستهلاك، والتي تتراوح في المجمل بين نحو 70% و80% من الاستخدامات العالمية، مدفوعًا بالاستخدام الواسع في إنتاج الأسمدة النيتروجينية، مثل اليوريا ونترات الأمونيوم وفوسفات الأمونيوم ومركبات NPK. ويعكس هذا الدور المحوري أهمية الأمونيا كركيزة أساسية لدعم الإنتاج الزراعي وتعزيز الأمن الغذائي العالمي[31].

في المقابل، تشهد الاستخدامات غير الزراعية نمواً متسارعاً، حيث يُعد قطاع التبريد الصناعي الأسرع نمواً بمعدل يقارب 3.1% سنوياً، مدفوعاً بالتحول نحو المبردات الطبيعية والتخلص التدريجي من مركبات HFCs، إلى جانب الكفاءة التشغيلية المرتفعة لأنظمة التبريد بالأمونيا مقارنة بالبدائل[32]. كما يساهم قطاع التعدين بنحو 5% [33] من الطلب العالمي، في حين تستحوذ كل من الصناعات الدوائية ومعالجة المياه على نحو 3% [34] لكل منهما، بينما تظل الاستخدامات الأخرى عند حدود 0.1 % [35]. يبين **الشكل (2-4)** توزع استهلاك الأمونيا العالمي حسب القطاعات في عام 2024، إلى جانب آفاق النمو حتى عام 2030.

31 Mordor Intelligence, Ammonia Market Report 2025–2030

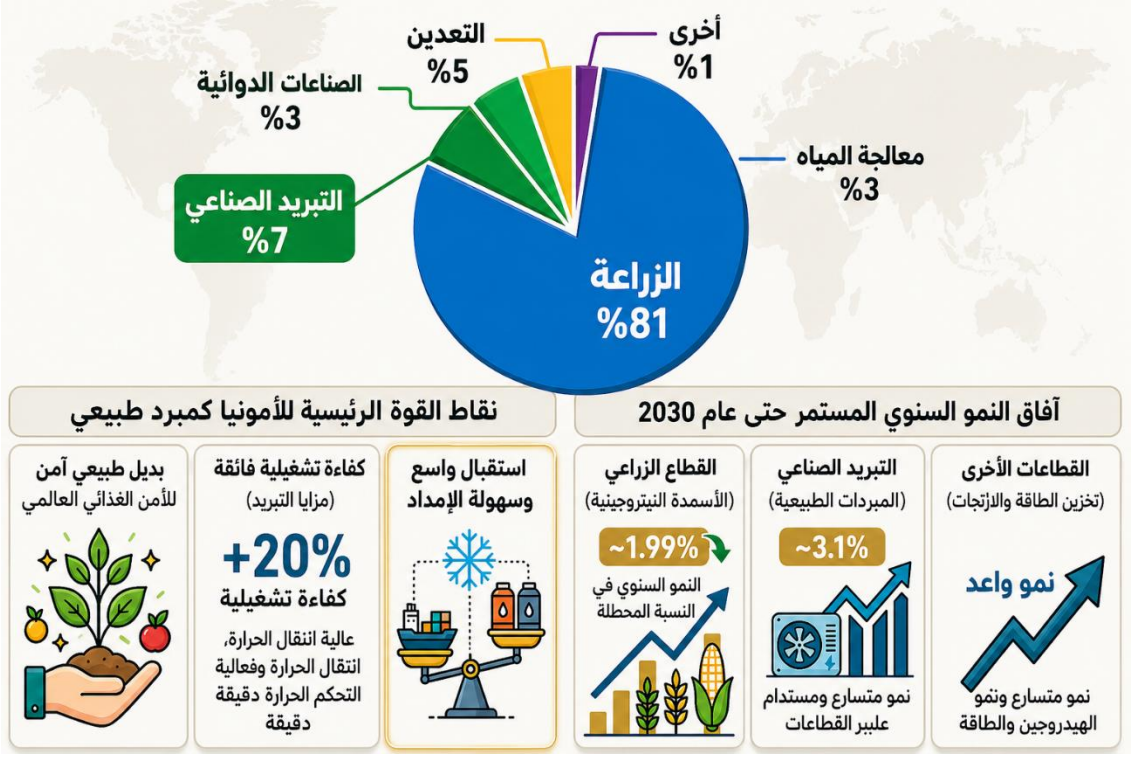
32 International Institute of Refrigeration, Ammonia Refrigeration Report, 2022–2024

33 US Geological Survey, Minerals Yearbook – Nitrogen & Explosives, 2023

34 European Chemicals Agency, Ammonia Uses & Safety Profile, 2023

35 International Energy Agency, Hydrogen & Ammonia Reports, 2024

الشكل (2-4): توزع استهلاك الأمونيا العالمي حسب القطاعات (2024)، وافاق النمو المستدام حتى 2030



المصدر: Ammonia Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts

2.3.2. آفاق نمو الطلب حتى عام 2030

تشير التقديرات إلى أن الطلب العالمي على الأمونيا قد يرتفع إلى نحو 210.8 مليون طن بحلول عام 2030، بمعدل نمو سنوي مركب يقارب 1.9%. ويعزى هذا النمو إلى عدة عوامل، من أبرزها النمو السكاني العالمي، وزيادة الطلب على الغذاء، واستمرار الاعتماد على الأسمدة النيتروجينية لتحسين إنتاجية المحاصيل.

كما يعكس هذا الاتجاه بداية تحول تدريجي في هيكل الطلب، مع بروز استخدامات جديدة للأمونيا في قطاع الطاقة، خاصة في سياق التحول نحو أنظمة طاقة منخفضة الكربون، حيث يُنظر إلى الأمونيا باعتبارها ناقلاً فعالًا للهيدروجين ووقودًا محتملاً في قطاعات يصعب خفض انبعاثاتها، مثل النقل البحري والصناعات الثقيلة.[36]

36 IFA – International Fertilizer Association Market Outlook

3.3.2. سيناريوهات الطلب حتى 2050

تشير السيناريوهات المستقبلية إلى أن مسار الطلب العالمي على الأمونيا حتى عام 2050 سيعتمد بدرجة كبيرة على وتيرة التحول الطاقي ومستوى تبني التطبيقات منخفضة الكربون. ففي إطار السيناريو المرجعي Stated Policies Scenario – STEPS ، من المتوقع أن يستمر نمو الطلب بوتيرة معتدلة مدفوعاً أساساً بقطاع الأسمدة النيتروجينية، ليصل إلى نحو 240-250 مليون طن بحلول عام 2050، مع استمرار هيمنة الاستخدامات التقليدية على هيكل الطلب العالمي.

أما في سيناريو التعهدات المعلنة Announced Pledges Scenario – APS ، والذي يفترض تسارع تنفيذ السياسات المناخية، فمن المرجح أن يشهد الطلب نمواً أكثر وضوحاً ليصل إلى نحو260-280 مليون طن بحلول عام 2050، مدفوعاً بالتوسع في استخدام الأمونيا في قطاع الطاقة، لا سيما بوصفها وقوداً منخفض الكربون في النقل البحري ووسيطاً لنقل الهيدروجين على المستوى الدولي. في المقابل، يعكس سيناريو الحياد الكربوني Net Zero Emissions – NZE تحول هيكلي أعمق في أنماط الطلب، حيث قد يتجاوز الاستهلاك العالمي 300 مليون طن بحلول عام 2050. ويعود ذلك إلى الاستخدام المكثف للأمونيا منخفضة الانبعاثات في تطبيقات الطاقة، بما في ذلك نقل الهيدروجين عبر سلاسل الإمداد العالمية، واستخدامها كوقود في قطاع الشحن البحري، فضلًا عن توظيفها في توليد الطاقة في بعض الأسواق. وفي هذا السياق، يُتوقع أن تنخفض الحصة النسبية للاستخدامات التقليدية لصالح الاستخدامات الطاقية، بما يسهم في تنويع قاعدة الطلب العالمي[37]. وفي ضوء تطورات العرض والطلب، يتحدد توازن السوق العالمي للأمونيا من خلال التفاعل بين القدرات الإنتاجية من جهة، وأنماط الاستهلاك من جهة أخرى.

4.2. توازن السوق بين الإنتاج والاستهلاك

يتسم سوق الأمونيا بدرجة من التوازن النسبي بين الإنتاج والاستهلاك، مع فروقات محدودة يتم تعويضها عبر التجارة الدولية والتخزين، مما يسهم في استقرار السوق على المدى القصير. ويرجع ذلك إلى أن إنتاج الأمونيا يتم في الغالب استجابةً للطلب الفعلي، في ظل محدودية قدرات

37 Food and Agriculture Organization (FAO), Fertilizer and Food Security Reports, 2023

DNV, Energy Transition Outlook, 2024

International Renewable Energy Agency (IRENA), Global Hydrogen Trade Outlook, 2022

التخزين مقارنةً ببعض السلع الطاقية الأخرى. فعلى الرغم من إمكانية تخزين الأمونيا في صورة سائلة تحت ضغط أو عند درجات حرارة منخفضة، فإن طبيعتها الكيميائية واعتبارات السلامة والتكلفة تجعل تخزينها على نطاق واسع ولفترات طويلة أقل شيوعاً مقارنة بالنفط أو الغاز الطبيعي، مما يجعل السوق أكثر اعتماداً على التوازن اللحظي بين الإنتاج والاستهلاك، مدعوماً بالتجارة الدولية لضمان استقرار الإمدادات.[38]

5.2. تطور أسعار الأمونيا في الأسواق العالمية

اتسمت أسعار الأمونيا العالمية قبل عام 2021 بدرجة من الاستقرار النسبي، حيث تحركت ضمن نطاقات معتدلة تراوحت بين 200 و350 دولاراً للطن، مدفوعة بتوازن العرض والطلب في قطاع الأسمدة، مع ارتباط وثيق بتقلبات أسعار الغاز الطبيعي.

ابتداءً من عام 2021، دخلت السوق مرحلة صدمة حادة نتيجة الارتفاع غير المسبوق في أسعار الغاز الطبيعي، إلى جانب اضطرابات سلاسل الإمداد العالمية وتعافي الطلب الزراعي بعد الجائحة، ما أدى إلى قفزة كبيرة في الأسعار بلغت ذروتها خلال عام 2022 عند مستويات تجاوزت 1200 دولار للطن في عدد من الأسواق.

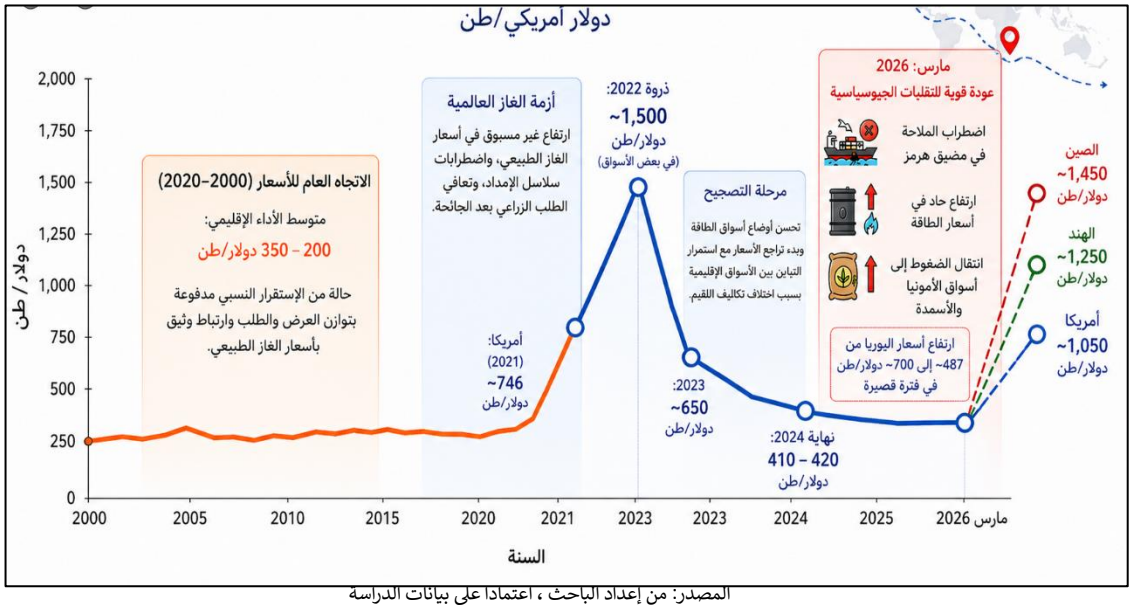
ومع تحسن أوضاع أسواق الطاقة بدءاً من عام 2023، بدأت الأسعار في التراجع التدريجي، لتسجل مستويات تراوحت بين 410 و420 دولاراً للطن في بعض مناطق الإنتاج الرئيسية بحلول عام 2024، مع استمرار التباين بين الأسواق الإقليمية نتيجة اختلاف تكاليف اللقيم.

إلا أن عام 2026 شهد عودة قوية للتقلبات، مدفوعة بتطورات جيوسياسية أبرزها اضطراب الملاحة في مضيق هرمز، مما أدى إلى ارتفاع حاد في أسعار الطاقة وانتقال هذه الضغوط إلى أسواق الأمونيا والأسمدة، حيث سجلت الأسعار قفزات حادة، بما في ذلك ارتفاع أسعار اليوريا من نحو 487 إلى قرابة 700 دولار للطن خلال فترة قصيرة.

تعكس هذه التطورات ترابطاً متزايداً بين أسواق الطاقة والبتروكيماويات والزراعة، بما يشير إلى دخول سوق الأمونيا مرحلة أكثر حساسية للتقلبات الجيوسياسية، مع بقاء أسعارها مرتبطة بشكل وثيق بتطورات أسواق الطاقة.. يبين الشكل (2-5) تطور أسعار الامونيا العالمية وتأثيرها بالطاقة والجيوسياسة (2000-2026).

38 IRENA – Innovation Outlook: Renewable Ammonia (2022)

الشكل (2-5): تطور أسعار الأمونيا العالمية وتأثرها بالطاقة والجيوسياسة (2000-2026)



المصدر: من إعداد الباحث ، اعتمادا على بيانات الدراسة

6.2. سوق الأمونيا العالمي والتحول منخفض الانبعاثات (آفاق 2030)

تشير التقديرات إلى تسارع نمو إمدادات الأمونيا منخفضة الانبعاثات خلال السنوات المقبلة، مع توقع ارتفاع الطاقة الإنتاجية بشكل ملحوظ بحلول عام 2030 وفق سيناريوهات متعددة، في ظل عدم وجود تقديرات كمية دقيقة متفق عليها لحجم هذه الإمدادات، نتيجة تباين مستويات تقدم المشروعات واختلاف الأطر التنظيمية الداعمة. وتُظهر البيانات أن أكثر من 70% من المشروعات في مراحل متقدمة من التخطيط أو التنفيذ، في حين تظل النسبة المتبقية عرضة للتأجيل أو الإلغاء في حال ضعف الطلب أو غياب الحوافز. وفي السيناريو المرتفع، قد تمثل هذه الإمدادات نحو 13% من إجمالي السوق العالمي بنهاية العقد.

ومن المتوقع أن تقود الأمونيا الزرقاء نمو الإمدادات على المدى القريب، نظراً لارتفاع مستوى جاهزية مشروعاتها واقترابها من قرارات الاستثمار النهائي، مستفيدة من البنية التحتية القائمة للغاز وتقنيات احتجاز الكربون. وفي المقابل، يكتسب مسار الأمونيا الخضراء زخماً متزايداً مدفوعاً بالسياسات المناخية والدعم الحكومي، مع توقع تسارع نموه على المدى المتوسط والطويل بالتوازي مع انخفاض تكاليف الطاقة المتجددة وتطور تقنيات التحليل الكهربائي.

كما يُرجّح أن يتجه جزء كبير من الإمدادات الجديدة إلى التصدير، مدفوعاً بفجوة التكلفة بين مناطق الإنتاج ومراكز الطلب، لا سيما في أوروبا وآسيا. غير أن تحقق هذا التوسع يظل مرهوناً

بتوافر اتفاقيات شراء طويلة الأجل Offtake Agreements، التي لا تزال محدودة نسبياً في الوقت الراهن، ما قد يقيد نمو التجارة الفعلية إلى مستويات أدنى من الإمكانات المتاحة.

وفي ضوء ما سبق، يتضح أن سوق الأمونيا العالمي يدخل مرحلة جديدة تتسم بارتفاع درجة الترابط مع أسواق الطاقة العالمية، وتزايد تأثير العوامل الجيوسياسية في تحديد توازناته. ولم يعد تطور السوق محكوماً فقط بالعوامل التقليدية للعرض والطلب، بل أصبح يعكس تفاعلاً معقداً بين تكاليف اللقيم، وتوجهات السياسات المناخية، والتحولات في أنماط التجارة الدولية. وعليه، فإن المرحلة المقبلة ستتسم بإعادة تشكيل هيكل السوق العالمي، بما يعزز من تنافسية المنتجين منخفضي التكلفة، ويدفع نحو تبني استراتيجيات أكثر مرونة لإدارة المخاطر، في ظل بيئة سوقية أكثر تقلباً وتعقيداً [39].

7.2. التحديات الرئيسية في سوق الأمونيا العالمي

رغم العوامل الداعمة للنمو، يواجه سوق الأمونيا مجموعة من التحديات الهيكلية التي تؤثر في وتيرة التحول نحو مسارات منخفضة الكربون.

يتمثل التحدي الأبرز في ارتفاع تكاليف الإنتاج، حيث لا تزال الأمونيا منخفضة الانبعاثات— سواء الزرقاء أو الخضراء—أعلى تكلفة مقارنة بالإنتاج التقليدي، نتيجة ارتفاع تكلفة الهيدروجين منخفض الكربون ومتطلبات البنية التحتية.

يبرز أيضاً تحدٍ مرتبط بعدم نضج الأطر التعاقدية، إذ لا تزال العديد من المشروعات في مراحل التطوير دون التوصل إلى اتفاقيات شراء طويلة الأجل، مما يحد من وضوح الرؤية الاستثمارية.

كما يؤدي تفاوت السياسات المناخية والأطر التنظيمية بين الدول إلى تباين مستويات الدعم والحوافز، وهو ما ينعكس مباشرة على تنافسية الإنتاج بين المناطق المختلفة.

تظل الصناعة كذلك شديدة الحساسية لتقلبات أسعار الغاز الطبيعي، نظراً لاعتماده كلقيم رئيسي في إنتاج الهيدروجين، الأمر الذي يجعل السوق عرضة لتقلبات أسواق الطاقة العالمية.

39 (BloombergNEF, 2023; BloombergNEF, 2024).

قائمة مراجع الفصل الثاني

1. International Energy Agency (IEA). (2024). *World Energy Outlook 2024*. Paris.
2. British Petroleum (BP). (2023). *Statistical Review of World Energy*. World Bank. (2024). *Commodity Markets Outlook: Energy and Non-Energy Price Projections*. Washington, D.C.
3. Food and Agriculture Organization (FAO). (2023). *World Fertilizer Trends and Outlook to 2024*. Rome.
4. International Fertilizer Association (IFA). (2023). *Annual Fertilizer Consumption Report*. Paris.
5. International Fertilizer Association (IFA). (2024). *Public Summary: Medium-Term Fertilizer Outlook 2024–2028*. Paris.
6. U.S. Geological Survey (USGS). (2024). *Mineral Commodity Summaries: Nitrogen (Fixed) Ammonia*. Washington, D.C.
7. Organization of Arab Petroleum Exporting Countries (OAPEC). (2024). *Annual Statistical Report 2023*. Kuwait.
8. Wood Mackenzie. (2023). *Ammonia Market Service: Supply, Demand, and Cost Curve Analysis*.
9. S&P Global Commodity Insights. (2023). *Low-Carbon Ammonia: Price Assessments and Market Development*.
10. S&P Global. (2024). *Energy Transition Outlook: The Role of Ammonia in Industrial Decarbonization*.
11. International Energy Agency (IEA). (2023). *Ammonia Technology Roadmap: Towards More Sustainable Nitrogen Fertilizer Production*. Paris.
12. International Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*. Abu Dhabi.
13. BloombergNEF. (2023). *Global Ammonia Market Strategy and Net-Zero Scenarios*. New York.
14. BloombergNEF. (2024). *2H 2024 Hydrogen Market Outlook*. New York. European Commission. (2023). *Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM): Implementation and Impact on Fertilizer Sector*. Brussels.
15. Oxford Institute for Energy Studies (OIES). (2021). *The Geopolitics of the Global Energy Transition: Hydrogen and Ammonia*.
16. Patonia, A., & Poudineh, R. (2022). *Global Trade of Low-Carbon Ammonia: Regulatory and Economic Challenges*. Oxford Institute for Energy Studies.
17. Yara International. (2023). *Clean Ammonia: Scaling up the Green and Blue Transition*.

OAPEC
Organization of
Arab Petroleum
Exporting Countries
الفصل الثالث
دور الأمونيا في الشحن البحري
ومنظومة نقل الهيدروجين منخفض الكربون
N
H3
H3
NH3
AMMONIA
NH3
H2
تقنية دافعة نحو
اقتصاد منخفض الكربون
منظومة متكاملة
لنقل الأمونيا والطاقة
نقل بحري آمن وفعال
وقابل للتوسع عالمياً
CO2
السلامة والامتثال
والمخاطر التقنية
البنية التحتية
والموانئ الجاهزة للمستقبل
N2
حلول وقود نظيف
وسبل انبعاثات منخفضة
مستقبل مستدام للأمونيا والهيدروجين
نحو منظومة شحن بحري نظيفة

الفصل الثالث: دور الأمونيا في الشحن البحري ومنظومة نقل الهيدروجين منخفض الكربون

مقدمة

يشهد قطاع النقل البحري تحولات متسارعة في إطار الجهود الدولية الرامية إلى خفض الانبعاثات الكربونية، باعتباره أحد القطاعات صعبة الخفض (**Hard-to-Abate Sectors**) التي تعتمد بدرجة كبيرة على الوقود الأحفوري عالي الكثافة الكربونية. وفي هذا السياق، برزت مجموعة من البدائل منخفضة الكربون، من بينها الأمونيا، التي تكتسب أهمية متزايدة بوصفها خياراً واعداً لإزالة الكربون من هذا القطاع، نظراً لخصائصها التي تتيح استخدامها كوقود خالٍ من الكربون عند الاحتراق.

غير أن أهمية الأمونيا في سياق التحول الطاقي لا تقتصر على دورها كوقود بحري، بل تمتد لتشمل دوراً استراتيجياً ضمن منظومة نقل وتجارة الهيدروجين منخفض الكربون على المستوى العالمي. ففي ظل التباين الجغرافي بين مناطق إنتاج الطاقة المتجددة منخفضة التكلفة، ومراكز الطلب الصناعي في أوروبا وشرق آسيا، تتزايد الحاجة إلى تطوير وسائل فعّالة لنقل الطاقة عبر مسافات طويلة، وهو ما يعزز من مكانة الأمونيا كأحد أبرز حوامل الهيدروجين القابلة للتطبيق على نطاق تجاري.

وفي هذا الإطار، لا يمكن النظر إلى استخدام الأمونيا كوقود بحري ودورها كحامل للهيدروجين بوصفهما مسارين منفصلين، بل يمثلان مسارين متكاملين ضمن منظومة واحدة، حيث يسهم التوسع في استخدامها كوقود بحري في تحفيز تطوير البنية التحتية اللازمة لإنتاجها وتخزينها وتداولها، في حين تدعم سلاسل إمدادها العالمية كحامل للهيدروجين نمو الطلب عليها وتعزز جدواها الاقتصادية. ومن ثم، تنشأ علاقة تكاملية بين جانبي العرض والطلب، تسهم في إعادة تشكيل سلاسل إمداد الطاقة منخفضة الكربون على المستوى الدولي.

1.3. دور الأمونيا في قطاع النقل البحري وإزالة الكربون

في ظل التوجه العالمي نحو التحول إلى أنظمة طاقة منخفضة الكربون، يواجه قطاع الشحن البحري ضغوطاً متزايدة لخفض انبعاثاته، نتيجة اعتماده التاريخي على الوقود الأحفوري. وفي هذا الإطار، اعتمدت المنظمة البحرية الدولية في عام 2023 استراتيجية محدثة تستهدف

تحقيق صافي انبعاثات صفرية من الشحن الدولي بحلول عام 2050، إلى جانب أهداف مرحلية لزيادة استخدام الوقود أو مصادر الطاقة منخفضة أو شبه الصفرية الانبعاثات.

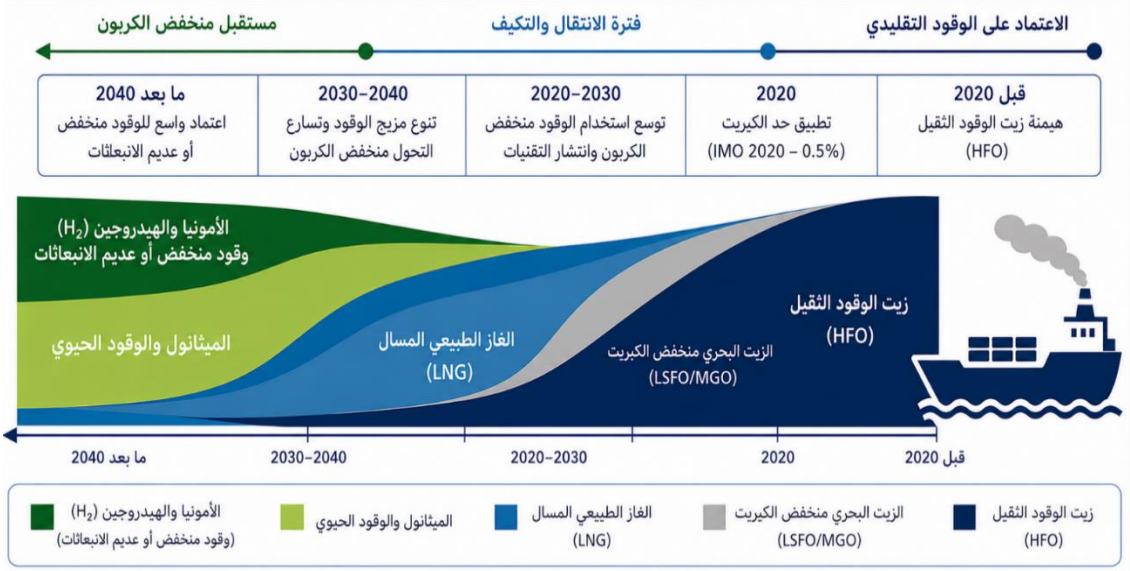
تقليدياً، اعتمد القطاع على زيت الوقود الثقيل، نظراً لانخفاض تكلفته وارتفاع كثافته الطاقية، إلا أن آثاره البيئية السلبية، ولا سيما محتواه المرتفع من الكبريت، أدت إلى تشديد الأطر التنظيمية. وقد أسهمت لائحة المنظمة البحرية الدولية لعام 2020، التي خفّضت الحد الأقصى لمحتوى الكبريت في الوقود البحري إلى نحو 0.5%، في تسريع التحول نحو وقود منخفض الكبريت أو تبني تقنيات لمعالجة غازات العادم، بالتوازي مع تنامي الاهتمام بتطوير بدائل منخفضة الكربون.

ومع تصاعد متطلبات الامتثال البيئي، برزت مجموعة من الخيارات البديلة لوقود الشحن البحري، من أبرزها الغاز الطبيعي المسال، والوقود الحيوي، والميثانول، والهيدروجين، والتي يُتوقع أن تسهم في تنويع مزيج الوقود مستقبلاً وخفض الانبعاثات المرتبطة بالقطاع. وتشير الاتجاهات الحديثة إلى أن الطلب على الطاقة في قطاع الشحن شهد تراجعاً مؤقتاً خلال فترات الاضطرابات العالمية، قبل أن يعاود التعافي التدريجي مع استعادة النشاط التجاري الدولي، مع توقعات باستمرار هذا المسار على المدى الطويل، وإن بوتيرة قد تتأثر بإجراءات كفاءة الطاقة وتسريع التحول نحو وقود منخفض الكربون.

وعلى الرغم من تمتع زيت الوقود الثقيل بكثافة طاقية مرتفعة تعزز كفاءة التشغيل، فإنه يرتبط بمستويات عالية من الانبعاثات، مما يحد من استمرارية استخدامه في ظل التشريعات البيئية المتزايدة. وفي المقابل، يُعد الغاز الطبيعي المسال خياراً انتقالياً يجمع بين خفض نسبي للانبعاثات وكفاءة تشغيلية مناسبة، رغم التحديات المرتبطة بانبعاثات الميثان. كما يبرز الميثانول كخيار مرن من حيث التخزين والتداول، خاصة عند إنتاجه من مصادر منخفضة الكربون، في حين يتميز الهيدروجين بانعدام الانبعاثات عند الاستخدام، إلا أنه يواجه تحديات تقنية تتعلق بالتخزين والنقل[40]. يوضح الشكل (3-1) تطور وقود الشحن البحري. كما يبيّن الجدول (3-1) مقارنة بين الخصائص الفنية والبيئية لأبرز أنواع الوقود البحري.

40 (IMO, 2023)

الشكل (3-1): تطور وقود الشحن البحري



المصدر: من إعداد الباحث ، اعتمادا على بيانات الدراسة

الجدول (3-1): مقارنة بين الخصائص الفنية والبيئية لأبرز أنواع الوقود البحري

الوقود	كثافة الطاقة (ميجا جول/كجم)	خفض الانبعاثات الكربونية	حالة التطور	ملاحظات رئيسية
زيت الوقود الثقيل (HFO)	40	مرتفع الانبعاثات	ناضج	تكلفة منخفضة وتوافر واسع، لكن انبعاثات عالية
الغاز الطبيعي المسال (LNG)	~50	خفض نسبي للانبعاثات (حوالي 15–23%)	انتشار متزايد	كفاءة تشغيلية جيدة، مع انبعاثات ميثان محدودة
الميثانول	~20	خفض الانبعاثات عند الإنتاج منخفض الكربون (حتى 25%)	مرحلة التوسع	سهولة التخزين والنقل، قابل للإنتاج من مصادر متعددة
الهيدروجين (H_2)	~120 (كتلي) منخفض حجميًا	صفر كربون عند الاستخدام	قيد التطوير	كثافة طاقة كتلية مرتفعة، تحديات التخزين والنقل
الأمونيا (NH_3)	~18.6	صفر كربون عند الاحتراق * (مع انبعاثات غير مباشرة حسب مسار الإنتاج)	مرحلة تجريبية متقدمة	قابلة للتخزين في صورة سائلة عند ضغط معتدل أو 33°م، مناسبة للرحلات الطويلة

* تعتمد الانبعاثات غير المباشرة على مصدر إنتاج الأمونيا (رمادية، زرقاء، خضراء).

المصدر: من إعداد الباحث ، اعتمادا على بيانات الدراسة

في هذا السياق، تبرز الأمونيا كأحد الخيارات الواعدة على المدى الطويل، لكونها وقوداً خالياً من الكربون عند الاحتراق، إلى جانب قابليتها الأفضل نسبياً للتخزين والنقل مقارنة بالهيدروجين، رغم انخفاض كثافة طاقتها. ويعكس هذا التنوع في البدائل توجهاً نحو مزيج وقود متكامل، تؤدي فيه بعض الخيارات دوراً انتقالياً، في حين تبرز الأمونيا والهيدروجين كركائز رئيسية للتحول منخفض الكربون.

وانطلاقاً من هذه الخصائص، تُعد الميزة البيئية الأبرز للأمونيا في عدم إنتاج انبعاثات مباشرة من ثاني أكسيد الكربون عند الاستخدام، مما يجعلها خياراً مناسباً لتحقيق أهداف إزالة الكربون في قطاع الشحن البحري. كما يمكن أن تسهم الأمونيا منخفضة الانبعاثات، ولا سيما المنتجة من مصادر متجددة، في خفض البصمة الكربونية للقطاع بشكل كبير، إلى جانب تحسين جودة الهواء، خاصة في المناطق الساحلية والموانئ.

وبناءً على ذلك، يُتوقع أن تشهد تركيبة الوقود في قطاع الشحن البحري تحولاً هيكلياً خلال العقود القادمة، مدفوعاً بتشديد السياسات المناخية والتقدم التقني، بما يعزز الاعتماد على الوقود منخفض الكربون، ويعزز في الوقت ذاته من دور الأمونيا كأحد العناصر المحورية في مسارات إزالة الكربون في هذا القطاع.

2.3. فرص استخدام الأمونيا كوقود بحري

تتمتع الأمونيا بخصائص تشغيلية تجعلها خياراً عملياً نسبياً كوقود بحري، إذ يمكن تخزينها ونقلها في صورة سائلة عند ضغط معتدل أو عند درجة حرارة تقارب -33°م، وهي ظروف أقل تعقيداً مقارنة بالهيدروجين السائل، مما يقلل من متطلبات التخزين على متن السفن ويعزز ملاءمتها للرحلات البحرية الطويلة.

وتشير التقديرات إلى أن الطلب على الأمونيا في قطاع الشحن البحري قد يبدأ عند مستويات محدودة، تتراوح بين 2 و3 ملايين طن سنوياً بحلول عام 2030، بالتزامن مع دخول السفن العاملة بالأمونيا مرحلة التشغيل التجاري. ومن المرجح أن يتسارع هذا النمو خلال العقد التالي ليصل إلى نحو 40–60 مليون طن سنوياً بحلول عام 2040، وفق سيناريوهات التحول الطاقي المتقدمة. وعلى المدى الطويل، تشير بعض السيناريوهات الأكثر طموحاً إلى إمكانية تجاوز الطلب مستوى 150–200 مليون طن سنوياً بحلول عام 2050، في حال اعتماد الأمونيا على نطاق واسع كوقود بديل في الملاحة الدولية.

غير أن تحقق هذه التوقعات يظل مرهوناً بعدد من العوامل، في مقدمتها تطور الأطر التنظيمية، وتوافر البنية التحتية اللازمة، وتحسن الجدوى الاقتصادية مقارنة بالوقود التقليدي.

وفي إطار مزيج الوقود المستقبلي، يُتوقع أن تتكامل الأمونيا مع أنواع وقود أخرى منخفضة الكربون، حيث قد يلعب الميثانول دوراً انتقالياً في المدى القريب، بينما تبرز الأمونيا كخيار

استراتيجي في المدى المتوسط والطويل، لا سيما في السفن الكبيرة والرحلات العابرة للمحيطات[41].

2.2.3. تطور الأسطول البحري العامل بالأمونيا

لم يكن استخدام الأمونيا كوقود بحري، حتى وقت قريب، يتجاوز كونه خياراً نظرياً ضمن سيناريوهات التحول الطاقي. غير أن التطورات التقنية وتسارع الاستثمارات أسهما في دفع هذا المسار نحو مراحل أكثر تقدماً من التطبيق، مع بدء إدراج الأمونيا ضمن خطط تطوير السفن المستقبلية.

وقد انعكس هذا التحول في تزايد الاهتمام بتصميم وبناء سفن قادرة على العمل بالأمونيا، سواء من خلال تطوير محركات ثنائية الوقود أو اعتماد أنظمة دفع مخصصة، إلى جانب تنفيذ مشروعات تجريبية تهدف إلى اختبار الجوانب التشغيلية والسلامة. كما يشهد القطاع تنامياً في الطلبات الأولية لبناء سفن تعمل بالأمونيا، بالتوازي مع جهود تطوير البنية التحتية الداعمة، لا سيما في الموانئ.

ويشير هذا التطور إلى انتقال تدريجي من مرحلة المفهوم إلى مرحلة التطبيق، وإن كان على نطاق محدود حتى الآن، مع توقعات بتسارع وتيرة الانتشار خلال السنوات القادمة في ضوء التقدم التقني وتزايد الضغوط التنظيمية لخفض الانبعاثات.

بدأت أولى السفن المرتبطة باستخدام الأمونيا في الظهور، مع دخول سفن تجريبية مصممة لتكون جاهزة للعمل بالأمونيا ***(Ammonia-ready)*** إلى الخدمة منذ عام 2022، وارتفاع عددها تدريجياً ليصل إلى نحو 30 سفينة بحلول منتصف عام 2025، وهو ما يعكس تنامي اهتمام شركات الشحن وبناء السفن بتبني تقنيات الدفع منخفضة الكربون. يبين **الشكل (3-2)** أحد السفن التجريبية المستخدمة لاختبار الأمونيا كوقود بحري.

41 (DNV, 2023; IEA, 2024).

الشكل (3-2): أحد السفن التجريبية المستخدمة لاختبار الأمونيا كوقود بحري

المصدر: Maritime and Port Authority of Singapore (MPA). (2024).
World's first use of ammonia as a marine fuel in a dual-fuel ammonia-powered vessel.

وبالتوازي مع ذلك، يشهد تطوير التقنيات المرتبطة باستخدام الأمونيا تقدماً متسارعاً، حيث تعمل شركات تصنيع المحركات البحرية على تطوير محركات ثنائية الوقود قادرة على العمل بالأمونيا، من بينها شركات Everllence و WinGD و J-Eng، مع دخول بعض هذه المحركات مراحل التشغيل التجريبي أو الاستعداد للخدمة خلال الفترة 2025–2026. كما حصلت بعض النماذج—مثل محرك HiMSEN H22CDF-LA الذي طورته شركة Hyundai Heavy Industries على اعتماد من هيئات التصنيف البحري، إلى جانب تطوير أنظمة وقود متكاملة من قبل شركات مثل Wärtsilä و Alfa Laval، وهو ما يعكس انتقال القطاع من مرحلة التطوير إلى مراحل متقدمة من التطبيق العملي.

كما تؤكد المشاريع التجريبية—مثل سفينة Green Pioneer التابعة لشركة Fortescue، إلى جانب مبادرات مماثلة في اليابان والصين—إمكانية استخدام الأمونيا عملياً في التشغيل البحري، بما يعزز الثقة في الجدوى التقنية لهذا المسار ويدعم انتقاله من مرحلة التجريب إلى التطبيق الفعلي.

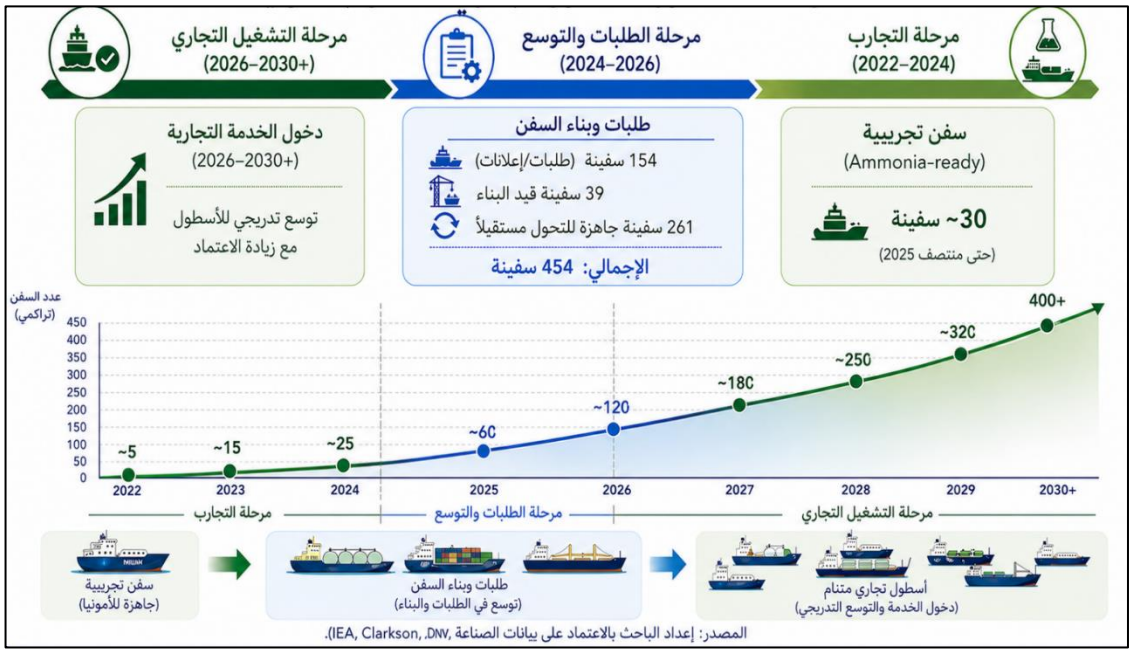
وفي موازاة ذلك، يشهد جانب الطلب توسعاً ملحوظاً، لا سيما في قطاع بناء السفن، حيث بلغ عدد السفن القادرة على استخدام الأمونيا قيد الطلب نحو 39 سفينة بحلول أغسطس 2025، معظمها من ناقلات الأمونيا وسفن الشحن الجاف، مع بدء تسليم الدفعات الأولى اعتباراً

من عام 2026. كما تشير البيانات إلى أن إجمالي السفن التي تم طلبها أو الإعلان عنها للعمل بالأمونيا وصل إلى نحو 154 سفينة حتى سبتمبر 2025، إضافة إلى 261 سفينة مصممة لتكون جاهزة للتحول إلى هذا الوقود مستقبلاً.

ويعكس هذا الزخم في الطلب تسارع وتيرة تبني الأمونيا كوقود بحري بديل، مدفوعاً بتزايد الضغوط التنظيمية والتقدم التقني. ومع دخول أولى السفن التجارية العاملة بالأمونيا الخدمة خلال الفترة 2026–2027، يُتوقع أن يشهد القطاع تحولاً تدريجياً نحو الاستخدام الفعلي لهذا الوقود، بما يمثل نقطة تحول مهمة في مسار إزالة الكربون من الشحن البحري.

وبناءً على ذلك، يتضح أن تطور تقنيات المحركات وأنظمة الوقود، إلى جانب توسع الطلب على السفن العاملة بالأمونيا، يشكلان معاً أساساً متيناً لانتقال هذا الوقود من مرحلة المبادرات التجريبية إلى التبني التجاري، مع ما يحمله ذلك من انعكاسات محتملة على أسواق الطاقة وسلاسل إمداد الوقود البحري منخفض الكربون[42]. يبين **الشكل (3-3)** تطور الأسطول البحري العامل بالأمونيا.

الشكل (3-3): تطور الأسطول البحري العامل بالأمونيا



المصدر: إعداد الباحث بالاعتماد على بيانات الصناعة، DNV، Clarkson، IEA).

42 (DNV, 2023; Getting to Zero Coalition, 2025)

3.2.3. تطور البنية التحتية للتزويد بالأمونيا

حتى عام 2020، لم تكن هناك بنية تحتية مخصصة لتزويد السفن بالأمونيا كوقود بحري. غير أن الفترة اللاحقة شهدت تسارعاً ملحوظاً في هذا المجال، مدفوعاً بتنامي الاهتمام العالمي بإزالة الكربون من قطاع النقل البحري. وبحلول عام 2025، أظهرت مجموعة من المشاريع التجريبية—في دول مثل أستراليا والصين واليابان وهولندا وسنغافورة والمملكة المتحدة—إمكانية نقل الأمونيا وتداولها بأمان لاستخدامها كوقود للسفن، بما يمثل خطوة أساسية نحو تطوير سلاسل إمداد بحرية لهذا الوقود.

وفي هذا الإطار، بدأت عدد من الموانئ العالمية الرئيسية اتخاذ خطوات عملية للاستعداد لعمليات التزويد بالأمونيا. فقد نفذ ميناء روتردام عمليات تجريبية لنقل الأمونيا، في حين أعلنت كل من سنغافورة وروتردام بلوغ مستويات متقدمة من الجاهزية، تراوحت بين 6 و7 وفق مؤشرات جاهزية البنية التحتية للوقود البحري. كما حصلت النرويج على موافقة لإنشاء محطة مخصصة للأمونيا، بينما اتخذت اليابان خطوة نوعية بطلب أول سفينة مخصصة لتزويد السفن بالأمونيا، والمتوقع دخولها الخدمة بحلول عام 2027.

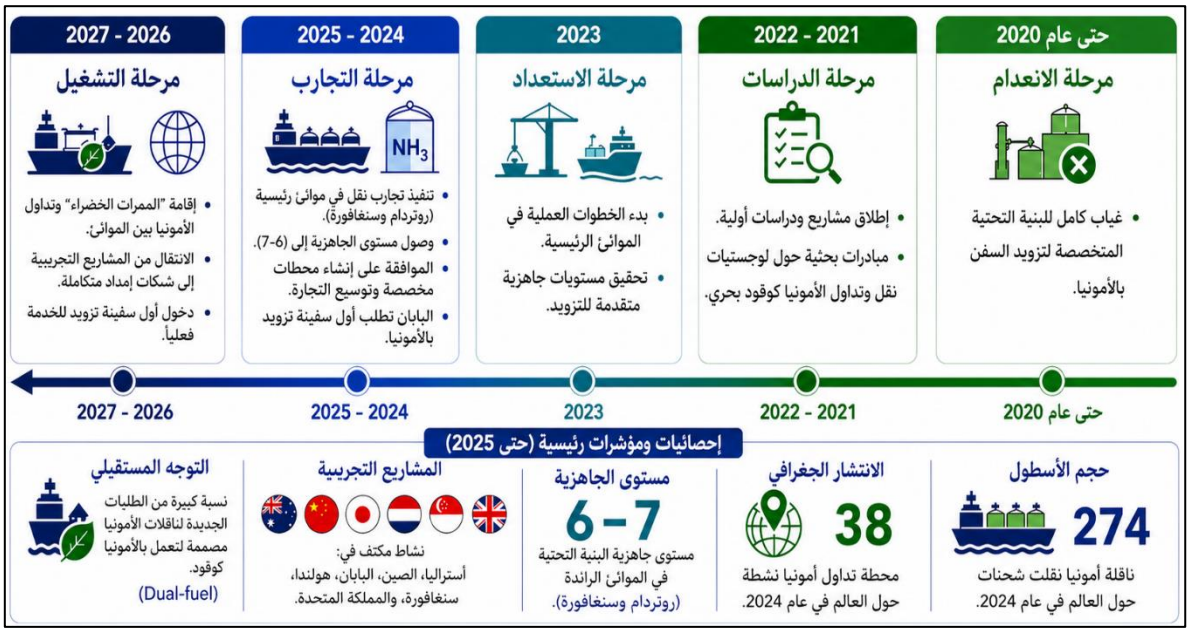
ومن المتوقع أن تلعب ناقلات الأمونيا دوراً محورياً في دعم هذا التحول، مستفيدة من شبكة النقل العالمية القائمة. فقد تم نقل الشحنات عبر نحو 274 ناقلة بين 38 محطة حول العالم في عام 2024، وهو ما يعكس وجود قاعدة لوجستية يمكن البناء عليها. كما أن نسبة كبيرة من الطلبات الجديدة لهذه السفن تُصمَّم لتكون قادرة على استخدام الأمونيا كوقود، مما يعزز من جاهزية القطاع في المراحل المبكرة من التحول.

وفي سياق متصل، يبرز مفهوم "الممرات الخضراء (Green Corridors)" كأحد المحركات الرئيسية لتطوير البنية التحتية، حيث يجري إنشاء مسارات ملاحية مخصصة بالتعاون بين الموانئ والحكومات، بهدف ضمان توافر الوقود منخفض الكربون في نقاط استراتيجية على امتداد سلاسل الإمداد. وقد أسهمت هذه المبادرات في تحويل المشاريع التجريبية—في موانئ مثل روتردام وسنغافورة—إلى نواة لشبكات إمداد متكاملة، بما يعزز ثقة السوق في استخدام الأمونيا كوقود بحري[43].

43 Global Maritime Forum. (2023). The Annual Progress Report on Green Shipping Corridors. Copenhagen.
Getting to Zero Coalition. (2023). Green Corridors: Leveraging Synergy for Zero-Emission Shipping.

وعلى الرغم من أن هذه البنية لا تزال في مراحلها المبكرة، فإن التطورات الأخيرة تشير إلى تراجع تدريجي في العوائق المرتبطة بها، وتهيئة الظروف لتوسعها على نطاق أوسع خلال السنوات المقبلة، بما يدعم التحول نحو الشحن منخفض الكربون[44] . يبين الشكل (3-4) تطور البنية التحتية لتزويد السفن بالأمونيا (2020-2027).

الشكل (3-4): تطور البنية التحتية لتزويد السفن بالأمونيا (2020-2027)



المصدر: من إعداد الباحث، اعتماداً على بيانات وتقارير International Energy Agencyو International Renewable Energy Agencyو DNV .

3.3. التحديات التقنية والتنظيمية والاقتصادية لاستخدام الأمونيا كوقود بحري

على الرغم من الإمكانات الكبيرة التي تتيحها الأمونيا بوصفها وقوداً منخفض الكربون يمكن أن يسهم بفعالية في إزالة الكربون من قطاع النقل البحري، فإن الانتقال نحو استخدامها على نطاق واسع لا يزال يواجه مجموعة مترابطة من التحديات التي تتجاوز الجوانب التقنية البحتة. فاعتماد هذا الوقود يتطلب معالجة متوازنة لثلاثة أبعاد رئيسة: التحديات التقنية المرتبطة بخصائصه التشغيلية وكفاءة استخدامه، والتحديات التنظيمية التي تتعلق بتطوير أطر السلامة والمعايير الدولية، إضافة إلى التحديات الاقتصادية المرتبطة بالتكلفة وتنافسية سلاسل الإمداد.

44 DNV, Ammonia as a marine fuel: Prospects and challenges,2025.

وتعكس هذه التحديات طبيعة المرحلة الانتقالية التي يشهدها القطاع البحري، حيث يتقدم تطوير التقنيات—لا سيما في تصميم المحركات وأنظمة الوقود—بوتيرة متسارعة، في حين لا تزال الأطر التنظيمية والبنية التحتية الداعمة في طور التكيف مع متطلبات هذا التحول. كما أن التداخل بين هذه الأبعاد يجعل من الصعب التعامل مع كل تحدٍ بمعزل عن الآخر، إذ إن أي تقدم تقني لا يحقق أثره الكامل دون بيئة تنظيمية داعمة، ولا يمكن ترسيخه دون جدوى اقتصادية واضحة.

1.3.3. التحديات التقنية

لا تزال الجوانب التقنية تمثل أحد أبرز محددات الانتشار الواسع لهذا الخيار. وترتبط هذه التحديات بخصائص الأمونيا الفيزيائية والكيميائية، وما تفرضه من متطلبات خاصة على تصميم أنظمة الوقود، وكفاءة تشغيل المحركات، وسلامة التخزين والنقل. كما تتداخل هذه العوامل مع اعتبارات الأداء والكفاءة التشغيلية للسفن، مما يجعل معالجة التحديات التقنية شرطاً أساسياً لضمان موثوقية هذا الوقود وقدرته على المنافسة ضمن منظومة النقل البحري منخفضة الكربون.

1.1.3.3.كثافة الطاقة ومتطلبات التخزين

تتميز الأمونيا بكثافة طاقة أقل مقارنة بالوقود البحري التقليدي، الأمر الذي يستلزم استخدام كميات أكبر من الوقود للحصول على نفس مستوى الطاقة، وينعكس ذلك في زيادة المساحة المخصصة لخزانات الوقود على متن السفن. ويترتب على ذلك مفاضلة تصميمية مباشرة بين سعة الحمولة والمدى التشغيلي للسفينة، وهو ما يمثل أحد أبرز التحديات الهندسية المرتبطة باستخدام هذا الوقود. ومع ذلك، تشير الاتجاهات الحالية في تصميم السفن إلى إمكانية التعامل مع هذا التحدي من خلال تطوير تصاميم مخصصة تأخذ في الاعتبار خصائص الأمونيا، إلى جانب استخدام أنظمة الوقود المزدوج، وتحسين استراتيجيات التزويد بالوقود في الموانئ.

بناءً على ذلك، لم يعد انخفاض كثافة الطاقة يُنظر إليه بوصفه عائقاً تقنياً حاسماً، بل تحدياً تصميمياً يمكن إدارته من خلال الموازنة بين سعة التخزين، والمدى التشغيلي، وتواتر عمليات التزويد بالوقود ضمن نماذج التشغيل الحديثة.

2.1.3.3. انبعاثات أكاسيد النيتروجين وانبعاث الأمونيا غير المحترقة

على الرغم من أن الأمونيا تُعد وقوداً خالياً من الكربون عند الاحتراق، فإن استخدامها في محركات الاحتراق الداخلي قد يؤدي إلى تكوين أكاسيد النيتروجين، وهي ملوثات هوائية تسهم في تكوين الضباب الدخاني والأمطار الحمضية. ويعتمد مستوى هذه الانبعاثات بشكل رئيسي على نوع المحرك وتقنيات الاحتراق المستخدمة، ما يجعلها تحدياً تقنياً وبيئياً في آنٍ واحد.

ولمواجهة هذه المشكلة، يجري تطوير حلول تقنية متقدمة تشمل استخدام أنظمة الاختزال التحفيزي الانتقائي (SCR)، إلى جانب تصميم محركات احتراق محسّنة تهدف إلى تقليل تكوين أكاسيد النيتروجين عند المصدر.

وفي السياق ذاته، تبرز ظاهرة الأمونيا غير المحترقة (Ammonia Slip) بوصفها أحد التحديات المرتبطة بكفاءة الاحتراق، حيث قد يؤدي احتراق غير كامل إلى انبعاث كميات من الأمونيا إلى الغلاف الجوي. ويستدعي ذلك تحسين كفاءة أنظمة الاحتراق، وضبط ظروف التشغيل، وتكاملها مع أنظمة معالجة الانبعاثات، بما يضمن تحقيق الأداء البيئي المستهدف لأنظمة الدفع البحرية المعتمدة على الأمونيا[45] .

2.3.3. تحديات السلامة وإدارة المخاطر

يمثل البعد المرتبط بالسلامة وإدارة المخاطر أحد أكثر الجوانب حساسية في مسار اعتماد الأمونيا كوقود بحري، نظراً لارتباطه المباشر بحماية الطواقم، وضمان سلامة العمليات، والحد من التأثيرات المحتملة على البيئة المحيطة. وعلى الرغم من المزايا البيئية التي توفرها الأمونيا، فإن خصائصها الفيزيائية والكيميائية تفرض مجموعة من المخاطر التي تتطلب فهماً دقيقاً ومنظومة إدارة متقدمة لضمان استخدامها بصورة آمنة.

ولا تقتصر هذه التحديات على طبيعة المادة ذاتها، بل تمتد لتشمل ظروف التشغيل البحرية، وإمكانية حدوث تسربات، ومتطلبات الاستجابة لحالات الطوارئ. كما تستلزم إدارة هذه المخاطر تحقيق تكامل فعّال بين التصميم الهندسي لأنظمة الوقود، وتطبيق إجراءات تشغيل صارمة، إلى جانب توظيف أدوات تحليل ونمذجة متقدمة لتقييم السيناريوهات المحتملة وتعزيز جاهزية الاستجابة.

45 (IEA, 2024).

1.2.3.3. السمية والخصائص الفيزيائية

تُعد سمّية الأمونيا من أبرز التحديات المرتبطة باستخدامها كوقود بحري. فعلى الرغم من أنها تكون في الظروف القياسية غازاً عديم اللون ذا رائحة نفاذة يمكن اكتشافها عند تركيزات منخفضة نسبياً (نحو 2–5 جزء في المليون)، فإنها في تطبيقات النقل والتخزين البحري تُستخدم في حالتها السائلة تحت ضغط معتدل أو عند درجات حرارة منخفضة. وعند حدوث أي تسرب، تتحول الأمونيا السائلة بسرعة إلى الحالة الغازية، مكوّنة سحباً سامة قابلة للانتشار.

وقد يؤدي التعرض لتركيزات مرتفعة من الأمونيا إلى آثار صحية متزايدة الخطورة، إذ يسبب التعرض لمستويات تتراوح بين 25–50 جزء في المليون تهيجاً في العينين والجهاز التنفسي، في حين قد تصبح التركيزات التي تقارب 300 جزء في المليون خطرة على الحياة أو الصحة بشكل مباشر.

وترتبط هذه التأثيرات بطبيعتها القلوية، حيث تتفاعل الأمونيا مع الرطوبة لتكوين هيدروكسيد الأمونيوم، وهو مركب ذو خصائص مهيّجة وتآكليه قد يؤدي إلى تلف الأنسجة والمعدات عند التعرض لتركيزات مرتفعة. ولا تقتصر التحديات على السمية، بل تشمل أيضاً خصائصها الفيزيائية والكيميائية، إذ تمتلك الأمونيا نطاق اشتعال في الهواء يتراوح بين نحو 15–28% حجماً، ما يتيح إمكانية اشتعالها في ظروف محددة، رغم أن درجة الاشتعال الذاتي المرتفعة نسبياً (حوالي 651 °م) تجعل قابليتها للاشتعال أقل مقارنة بالوقود الهيدروكربوني التقليدي.

وبناءً على ذلك، يُنظر إلى الأمونيا في قطاع النقل البحري بوصفها وقوداً يتطلب إدارة متقدمة للمخاطر، تقوم على فهم خصائصها السمية والفيزيائية، وتطبيق معايير تصميم وتشغيل صارمة، بما يضمن حماية الطواقم ويحد من احتمالات التعرض، خاصة في ظل التحول السريع من الحالة السائلة إلى الغازية عند التسرب[46].

2.2.3.3. مخاطر التسرب وانتشار الغاز

ترتبط مخاطر استخدام الأمونيا كوقود بحري بإمكانية حدوث تسربات من أنظمة الوقود أو أثناء عمليات التزويد في الموانئ. ونظراً لأن الأمونيا تُخزن وتُنقل في هذه التطبيقات في حالتها

46 EMSA, Safety of Ammonia for use in ships,2024

السائلة، فإن أي تسرب يؤدي إلى تبخرها السريع وتحولها إلى غاز، مكوِّناً سحباً سامة قابلة للانتشار في الهواء، خاصة في البيئات المغلقة أو في ظروف الطقس المستقرة.

ويعتمد تقييم هذه المخاطر على استخدام أدوات تحليل متقدمة، من أبرزها نماذج محاكاة انتشار الغازات (Gas Dispersion Modelling) ، التي تتيح تقدير مسار سحابة الأمونيا وتحديد نطاق انتشارها، بما يشمل تحديد مناطق الخطر المحتملة داخل السفينة، مثل مآخذ الهواء، وغرف المحركات، ومناطق إقامة الطاقم، فضلاً عن تحديد ما يُعرف بمناطق السمية (Toxic Zones) .وللحد من هذه المخاطر، تُعتمد مجموعة من الإجراءات الهندسية والتشغيلية المتكاملة، تشمل تصميم أنظمة تهوية فعّالة للحد من تراكم الغاز وتسريع تشتته، إلى جانب التحكم في اتجاه تدفق الهواء داخل السفينة لمنع انتقاله إلى المناطق الحساسة. كما يمكن، في بعض الحالات، استخدام أنظمة الرش المائي أو الستائر المائية لتقليل تركيز الأمونيا في الهواء والحد من انتشار السحابة الغازية، مع مراعاة إدارة المياه الناتجة نظراً لطبيعتها القلوية.

وبناءً على ذلك، يمثل التحكم في مخاطر التسرب وانتشار الغاز أحد العناصر الحاسمة لضمان التشغيل الآمن للأمونيا كوقود بحري، حيث يتطلب تكاملاً بين أدوات النمذجة المتقدمة، والتصميم الهندسي، وإجراءات التشغيل، بما يسهم في تقليل احتمالات التعرض وتعزيز جاهزية أنظمة الاستجابة للطوارئ. يبين الشكل(3-5) أبرز تحديات السلامة المرتبطة باستخدام الامونيا كوقود بحري.

الشكل(3-5): أبرز تحديات السلامة المرتبطة باستخدام الامونيا كوقود بحري

1. السمية والخصائص الفيزيائية والكيميائية للأمونيا

تُعدّ سمّية الأمونيا من أبرز التحديات.
غاز عديم اللون ذو رائحة نفاذة، يمكن اكتشافها عند تركيزات منخفضة نسبياً (نحو 2–5 جزء في المليون)، مما يتيح الإنذار المبكر.

شاحنة نقل الأمونيا (NH_3)

$$NH_3 + H_2O \rightleftarrows NH_4^+ + OH^-$$
(تمثيل مبسط)

يتراوح نطاق الاشتعال في نحو 15–28% حجماً.

خصائص الاشتعال والتأكل:

- كما تمتلك الأمونيا نطاق اشتعال في الهواء بتراوح بين نحو 15–28% حجماً، وهو ما يعني إمكانية اشتعالها في ظروف معينة.
- ورغم أن درجة الاشتعال الذاتي المرتفعة نسبياً (نحو 651°م) تجعل قابليتها للاشتعال أقل مقارنة بالوقود الهيدروكربوني التقليدي.
- تتفاعل مع الرطوبة لتكوين هيدروكسيد الأمونيوم، وهو مركب مهيّج وتأكلي قد يؤدي إلى تلف الأنسجة والمعدات عند التعرض لتركيزات مرتفعة.

تأثيرات صحية حسب التركيز

الكشف بالرائحة	2–5 ppm
تهيج في التفينين والجهاز التنفسي	25–50 ppm
خطر على الحياة أو الصحة مباشرة	≈ 300 ppm

يتطلب استخدام الأمونيا كوقود بحري منظومة متكاملة لإدارة المخاطر، تجمع بين التصميم الهندسي، وأنظمة السلامية، والإجراءات التشغيلية، بما يضمن حماية الطواقم وتقليل احتمالات التعرض للغاز في مختلف ظروف التشغيل.

2. مخاطر التسرب وانتشار الغاز

مخاطر تسربات من أنظمة الوقود أو أثناء التزود في الموانئ، مما قد يؤدي إلى تكوّن سحب غازية سامة سريعة الانتشار، خاصة في البيئات المغلقة أو ضعيفة التهوية.

نماذج محاكاة انتشار الغازات (Gas Dispersion Modelling)

- تتيح نماذج انتشار الغازات تقدير مسار السحابة وتحديد مناطق الخطر (Toxic Zones) داخل السفينة:

مناطق إقامة الطاقم | غرف المحركات | مأخذ الهواء

إجراءات الحد من المخاطر

- أنظمة تهوية فعّالة: للحد من تراكم الغاز وتسريع تشتته في المساحات المغلقة.
- التحكم في اتجاه تدفق الهواء (Airflow Control) لمنع انتقال الغاز إلى المناطق الحساسة.
- أنظمة رش المياه / الستائر المائية (Water Spray / Curtain) لتقليل تركيز الأمونيا في الهواء والحد من انتشار السحابة الغازية.
- التعامل مع المياه الناتجة نظراً لطبيعتها القلوية.

التحكم في مخاطر التسرب وانتشار الغاز هو عنصر حاسم لضمان التشغيل الآمن الأمونيا كوقود بحري، ويتطلب تكاملاً بين النمذجة المتقدمة، والتصميم الهندسي، وإجراءات التشغيل، لتعزيز الجاهزية للاستجابة للطوارئ وتقليل احتمالات التعرض.

المصدر: إعداد الباحث بالاعتماد على: DNV (2022) • IRENA (2023) • EMSA (2024)

3.2.3.3. متطلبات السلامة التشغيلية في استخدام الأمونيا كوقود بحري

في ضوء التحديات المرتبطة بالخصائص الفيزيائية والكيميائية للأمونيا، وما يرتبط بها من مخاطر السمية والتسرب وانتشار الغازات، يبرز البعد التشغيلي بوصفه عاملاً حاسماً في تمكين الاستخدام الآمن للأمونيا كوقود بحري. ولا يقتصر ذلك على تطوير التقنيات، بل يتطلب تبني منظومة متكاملة لإدارة المخاطر تقوم على التكامل بين التصميم الهندسي، وأنظمة السلامة، والإجراءات التشغيلية، إلى جانب تأهيل الكوادر البشرية.

يمثل التصميم الهندسي خط الدفاع الأول في الحد من المخاطر، حيث يتطلب استخدام الأمونيا اعتماد أنظمة وقود مغلقة ومزدوجة الجدران، مزودة بأنظمة كشف مبكر للتسرب وآليات عزل تلقائي. ونظراً لأن الأمونيا تُخزن على متن السفن في حالتها السائلة تحت ضغط أو تبريد، فإن تصميم الخزانات يجب أن يراعي معايير دقيقة للضغط ودرجة الحرارة لضمان استقرارها في مختلف ظروف التشغيل. كما يستلزم ذلك استخدام مواد مقاومة للتآكل، إلى جانب الفصل المكاني بين أنظمة الوقود والمناطق الحيوية على متن السفينة، بما يقلل من احتمالات التعرض في حال حدوث تسرب وتبخر سريع إلى الحالة الغازية.

وفي هذا الإطار، تتطلب إدارة مخاطر الأمونيا نشر منظومات متقدمة للرصد المستمر، تشمل أجهزة استشعار عالية الحساسية قادرة على اكتشاف تركيزات منخفضة جداً من الغاز، وربطها بأنظمة إنذار مبكر. ويُعد التكامل بين هذه الأنظمة وغرف التحكم عاملاً أساسياً لضمان الاستجابة الفورية، حيث يمكن تفعيل إجراءات الإغلاق التلقائي أو تشغيل أنظمة التهوية القسرية عند تجاوز الحدود الآمنة.

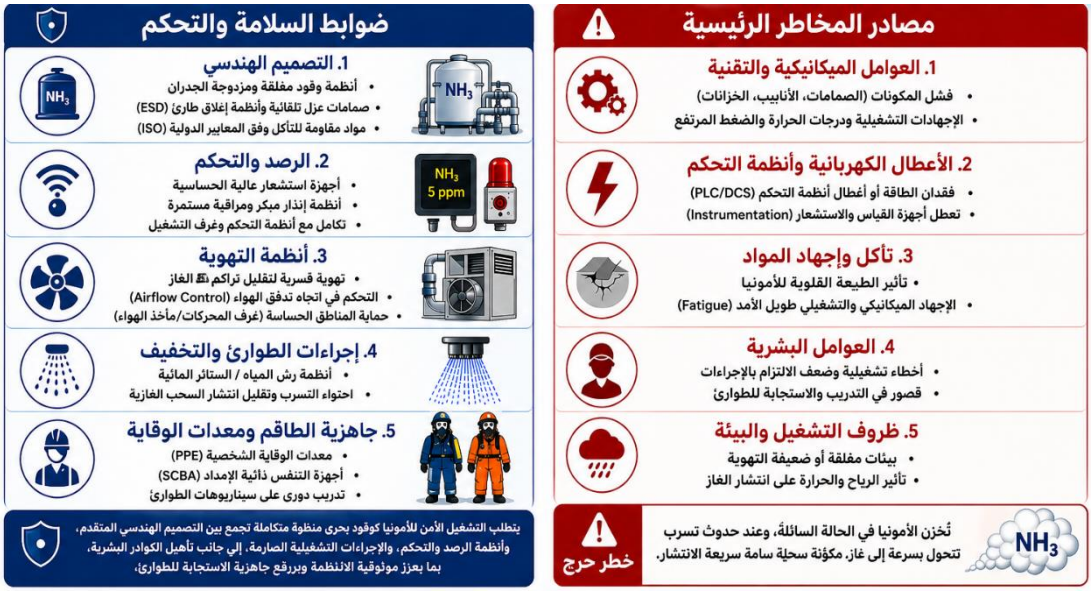
وتُعد أنظمة التهوية من الركائز الأساسية للسلامة التشغيلية، خاصة في المساحات المغلقة مثل غرف المحركات ومناطق التخزين، إذ يتطلب ذلك تصميم أنظمة تهوية قسرية فعالة للحد من تراكم الغاز وتسريع تشتيته، إلى جانب تطبيق استراتيجيات للتحكم في اتجاه تدفق الهواء (Airflow Control) لمنع انتقال الأبخرة إلى المناطق الحساسة. وفي حالات الطوارئ، يمكن استخدام أنظمة الرش المائي أو الستائر المائية للحد من تركيز الأمونيا في الهواء وتقليل انتشار السحب الغازية، مع مراعاة إدارة المياه الناتجة نظراً لطبيعتها القلوية.

كما يتطلب التشغيل الآمن للأمونيا تطوير بروتوكولات تشغيلية صارمة تشمل إجراءات واضحة للتزود بالوقود، والتعامل مع حالات التسرب، وإدارة الحوادث. ويشمل ذلك إعداد خطط

استجابة للطوارئ تغطي سيناريوهات متعددة، مثل التسرب الجزئي أو الكلي، مع تحديد أدوار الطاقم وآليات الإخلاء والعزل. ويُعد التدريب المنتظم للطواقم على هذه الإجراءات عاملاً محورياً في تقليل زمن الاستجابة وتعزيز فعالية إدارة الحوادث.

وفي هذا السياق، يبرز تأهيل الكوادر البشرية كعنصر أساسي، نظراً لاختلاف خصائص الأمونيا عن الوقود التقليدي. ويتطلب ذلك تطوير برامج تدريب متخصصة تغطي الجوانب الفنية والسلامة التشغيلية، بما في ذلك التعرف على خصائص المادة، واستخدام معدات الحماية الشخصية، والتعامل مع حالات التعرض، بما يعزز من كفاءة التشغيل ويحد من المخاطر المحتملة[47]- [48]. يبين الشكل (3-6) تحليل مصادر المخاطر ومتطلبات السلامة التشغيلية لاستخدام الأمونيا كوقود بحري

الشكل (3-6): مصادر المخاطر ومتطلبات السلامة لاستخدام الأمونيا كوقود بحري



المصدر: من إعداد الباحث، استناداً إلى الأدبيات الفنية وأفضل الممارسات الصناعية والمعايير الدولية.

3.3.3. التحديات التنظيمية لاستخدام الأمونيا كوقود بحري

يظل تحقيق الانتشار الواسع للأمونيا كوقود بحري مرهوناً بتطور الأطر التنظيمية الدولية التي تحكم تصميم وتشغيل هذه المنظومات. وتشير التجارب الحالية إلى أن الإطار التنظيمي الدولي لاستخدام الأمونيا لا يزال في مرحلة التطور، ولم يبلغ بعد مستوى النضج الذي

47 EMSA, Safety of Ammonia for use in ships,2024

48 EMSA, Safety of Ammonia for use in ships,2024

يسمح بتطبيقه على نطاق تجاري واسع. وعلى الرغم من التقدم الذي أحرزته المنظمة البحرية الدولية في تطوير إرشادات أولية للسفن التي تستخدم وقوداً منخفض أو عديم الكربون، فإن هذه الإرشادات لم تتحول بعد إلى منظومة تنظيمية متكاملة تغطي الجوانب التقنية والتشغيلية، إلى جانب متطلبات السلامة وإجراءات الطوارئ المرتبطة باستخدام الأمونيا.

وتتمثل إحدى أبرز التحديات في عدم التوافق الكامل بين الأطر التنظيمية القائمة، مثل مدونة الوقود منخفض الوميض (IGF Code) ومدونة نقل الغازات السائلة السائبة (IGC Code)، إذ صُممت الأولى أساساً للتعامل مع الغاز الطبيعي المسال، في حين تنظم الثانية نقل الأمونيا بوصفها حمولة، وليس استخدامها كوقود. وينشأ عن ذلك فجوة تنظيمية تتعلق باستخدام المادة ذاتها في وظيفتين مختلفتين داخل السفينة، هما النقل والاستخدام كوقود.

كما تبرز تحديات تتعلق بعدم اتساق المتطلبات الفنية بين هيئات التصنيف البحري، حيث تختلف الإرشادات الأولية الخاصة بالسفن العاملة بالأمونيا في بعض الجوانب، مثل مستويات كشف الغاز، ومتطلبات التهوية، وترتيبات العزل والحماية. وقد يؤدي ذلك إلى تباين في معايير السلامة، ويحد من توحيد الممارسات التشغيلية على المستوى الدولي.

ومن الجوانب التنظيمية التي لا تزال قيد التطوير أيضاً المعايير الخاصة بعمليات تزويد السفن بالأمونيا في الموانئ (Ammonia Bunkering)، بما يشمل تحديد مناطق الأمان، وآليات التنسيق بين السفن والمنشآت الساحلية، ومتطلبات معدات الوقاية، وإجراءات الاستجابة للطوارئ. ويُضاف إلى ذلك محدودية الخبرة التشغيلية البحرية في استخدام الأمونيا كوقود، إذ تتركز الخبرة الحالية أساساً في نقلها كحمولة على متن ناقلات الغازات المسالة ضمن أطر تنظيمية مستقرة، وليس في تشغيلها المستمر ضمن أنظمة الدفع البحرية، الأمر الذي يبرز فجوة واضحة بين خبرة النقل التجاري وخبرة الاستخدام كوقود.

تبرز أهمية مراعاة الخصائص الفريدة للأمونيا عند تطوير الأطر التنظيمية، إذ تُخزن وتُنقل في التطبيقات البحرية في حالتها السائلة تحت ضغط أو تبريد، بينما تتحول بسرعة إلى الحالة الغازية عند التسرب، مكوّنة سحباً سامة سريعة الانتشار. ويستلزم ذلك تضمين متطلبات دقيقة تتعلق بالتصميم الهندسي، وأنظمة الكشف والتهوية، وإجراءات الطوارئ.

وبناءً على ذلك، يتجه تطوير الإطار التنظيمي نحو نهج تدريجي قائم على الأهداف (Goal-Based Approach)، تمهيداً لتطوير معايير دولية أكثر تفصيلاً مع تراكم الخبرة

التشغيلية. ويُعد هذا التطور التنظيمي شرطاً أساسياً لتمكين الاستخدام الآمن والواسع للأمونيا كوقود بحري، حيث يرتبط نجاحها التجاري بمدى قدرة المجتمع الدولي على بناء إطار تنظيمي متسق يدعم السلامة التشغيلية، ويعزز موثوقية الأنظمة، ويواكب الخصائص التقنية والبيئية لهذا الوقود[49] . يبين **الشكل (3-7)** الفجوات التنظيمية الدولية في استخدام الأمونيا كوقود بحري.

الشكل (3-7): الفجوات التنظيمية الدولية في استخدام الأمونيا كوقود بحري

المصدر: من إعداد الباحث، استناداً إلى تحليل الأطر التنظيمية الدولية ومتطلبات الصناعة

49 EMSA. (2023). Study Investigating the Safety of Ammonia as Fuel on Ships. European Maritime Safety Agency.

IMO. (2022). Interim Guidelines for the Safety of Ships Using Alternative Fuels. International Maritime Organization.

DNV. (2023). Maritime Forecast to 2050: Energy Transition Outlook. DNV Maritime.

4.3.3. تحديات البنية التحتية وسلاسل الإمداد

يتطلب اعتماد الأمونيا كوقود بحري الانتقال من مرحلة الدراسات والتجارب إلى تطوير منظومات لوجستية متكاملة تشمل التخزين، والنقل، وتموين السفن في الموانئ. وعلى الرغم من توافر بنية تحتية عالمية قائمة لتداول الأمونيا في الصناعات الكيميائية، فإن توظيفها كوقود بحري يستلزم تكييف هذه البنية لتلبية متطلبات أكثر صرامة تتعلق بالسلامة والتشغيل، ولا سيما في ضوء سميتها، وكونها تُخزن وتُنقل في الحالة السائلة تحت ضغط أو تبريد، مع قابليتها للتحول السريع إلى الحالة الغازية عند التسرب[50].

وفي هذا السياق، تمثل محدودية البنية التحتية لتموين السفن بالأمونيا Ammonia Bunkering، إلى جانب جاهزية مرافق التخزين والنقل، أحد أبرز التحديات التشغيلية التي تعيق الانتشار التجاري لهذا الوقود. ولا تزال خدمات التزويد تتركز في عدد محدود من الموانئ، مع اعتماد ملحوظ على مشاريع تجريبية قيد التطوير، بما يعكس فجوة بين توسع القدرات الإنتاجية وتوافر البنية التشغيلية اللازمة للاستخدام التجاري.

ومن منظور جغرافي، يتسم توزيع مشروعات الأمونيا منخفضة الانبعاثات بتركز الإنتاج في عدد محدود من الأقاليم ذات المزايا النسبية في تكاليف الطاقة. ويبرز الشرق الأوسط كمركز رئيسي للإنتاج الموجه للتصدير، مدعوماً بمشروعات كبرى مثل مشروع نيوم للأمونيا الخضراء، إلى جانب أستراليا—وخاصة مناطق بيلبرا (بورت هيدلاند) وكارنارفون—التي تستهدف إنتاج الأمونيا منخفضة الانبعاثات للتصدير، فضلاً عن تشيلي، حيث يمثل مشروع Magallanes مثالاً على التوسع في الإنتاج الموجه للأسواق الخارجية. كما تتميز الولايات المتحدة بوجود مراكز متفرقة للإنتاج والتموين على سواحلها، ولا سيما في ساحل الخليج وكاليفورنيا.

وفي المقابل، تتركز مناطق الطلب في الاقتصادات الصناعية في أوروبا وآسيا، حيث تمثل موانئ شمال غرب أوروبا مراكز رئيسية لاستيراد الأمونيا وإعادة توزيعها. كما تبرز اليابان كسوق محورية مدفوعة بالطلب الصناعي وقطاع الأسمدة، مدعومة بمشروعات مشتركة تتجاوز طاقتها 1.27 مليون طن من اليوريا. إلى جانب ذلك، تتطور سنغافورة كمركز متقدم لتموين السفن بالأمونيا، بطاقة تتجاوز 0.5 مليون طن سنوياً، بما يعكس دورها كمحور إقليمي للتجارة البحرية.

50 (IEA, 2024; DNV, 2023)

ويترتب على هذا التباين الجغرافي نشوء تدفقات تجارية بحرية تربط بين مناطق الإنتاج منخفضة التكلفة ومراكز الطلب مرتفعة الكثافة الصناعية، حيث تتجه الشحنات من الشرق الأوسط وأستراليا نحو آسيا، ومن الأمريكيتين والشرق الأوسط نحو أوروبا، عبر مسارات نقل بحرية طويلة تعكس الطبيعة العالمية لسوق الأمونيا بوصفها ناقلاً للطاقة.

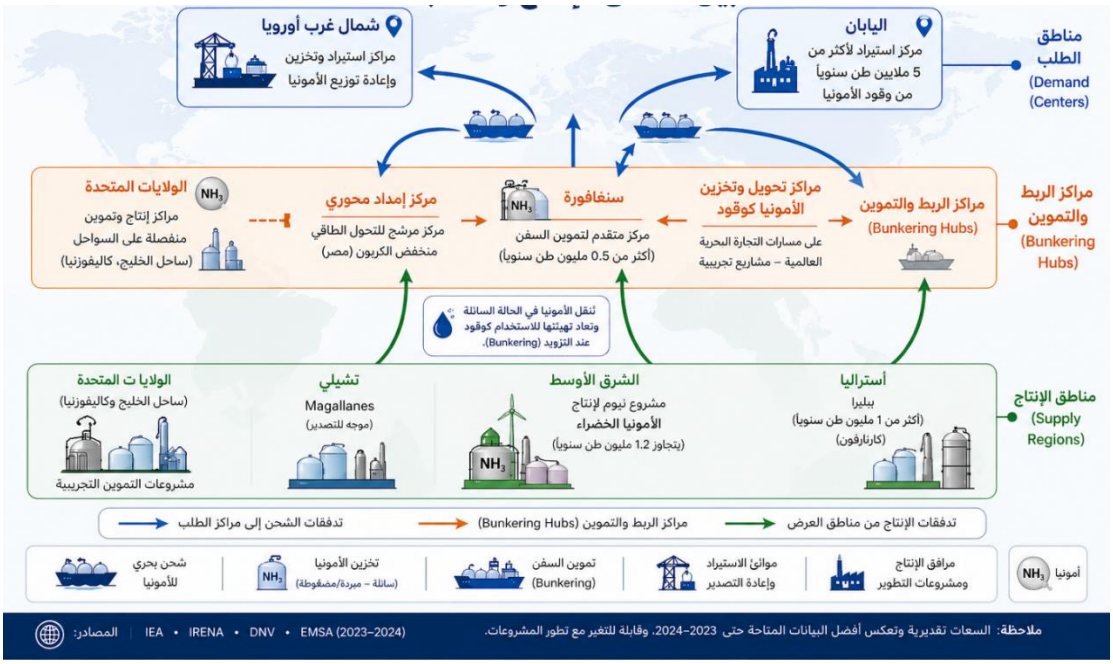
تبرز أهمية مراكز التموين الوسيطة Bunkering Hubs بوصفها نقاط ربط داخل سلاسل الإمداد، إذ تسهم في إعادة توزيع الوقود وتزويد السفن على طول مسارات الملاحة الدولية، خاصة في مواقع استراتيجية مثل سنغافورة وشمال غرب أوروبا. كما تظهر بعض المواقع—مثل مصر—كمراكز مرشحة للعب دور مستقبلي في تجارة الطاقة منخفضة الكربون، في ضوء موقعها الجغرافي على طرق الملاحة العالمية.

ويشير هذا النمط إلى أن تطوير البنية التحتية لا يقتصر على إنشاء مرافق الإنتاج، بل يتطلب بناء منظومة إمداد متكاملة متعددة العقد تشمل الإنتاج، والنقل، والتخزين، وإعادة التوزيع، وتموين السفن، بما يضمن استمرارية الإمداد وكفاءة تدفق الوقود عبر الموانئ الدولية.

وعلى الرغم من هذا التوجه، لا تزال البنية التحتية العالمية للأمونيا كوقود بحري في مراحلها المبكرة، حيث تتفاوت مستويات نضج المشروعات بين مناطق الإنتاج ومراكز الطلب، وتعتمد بدرجة كبيرة على مبادرات تجريبية، وهو ما يعكس فجوة هيكلية بين تطور القدرات الإنتاجية وتوافر منظومات التوزيع والتموين على نطاق واسع. ويتطلب التوسع في هذه المنظومة استثمارات كبيرة وطويلة الأجل، إلى جانب تنسيق دولي لضمان توحيد المعايير التشغيلية ومعايير السلامة.

وبناءً على ذلك، يمثل تطوير البنية التحتية وسلاسل الإمداد عاملاً حاسماً في تحديد وتيرة انتشار الأمونيا كوقود بحري، إذ يرتبط نجاحها بقدرة القطاع على إنشاء منظومة إمداد موثوقة وآمنة وقابلة للتوسع، تدعم الاستخدام التجاري على نطاق واسع، وتتكامل مع التحولات الجارية في أسواق الطاقة العالمية . يبين الشكل (3-8) التوزيع الجغرافي لمشروعات الأمونيا وسلاسل الإمداد بين مناطق الإنتاج والطلب.

الشكل (3-8): التوزيع الجغرافي لمشروعات الأمونيا وسلاسل الإمداد بين مناطق الإنتاج والطلب



5.3.3. التحديات الاقتصادية وتنافسية الأمونيا منخفضة الانبعاثات

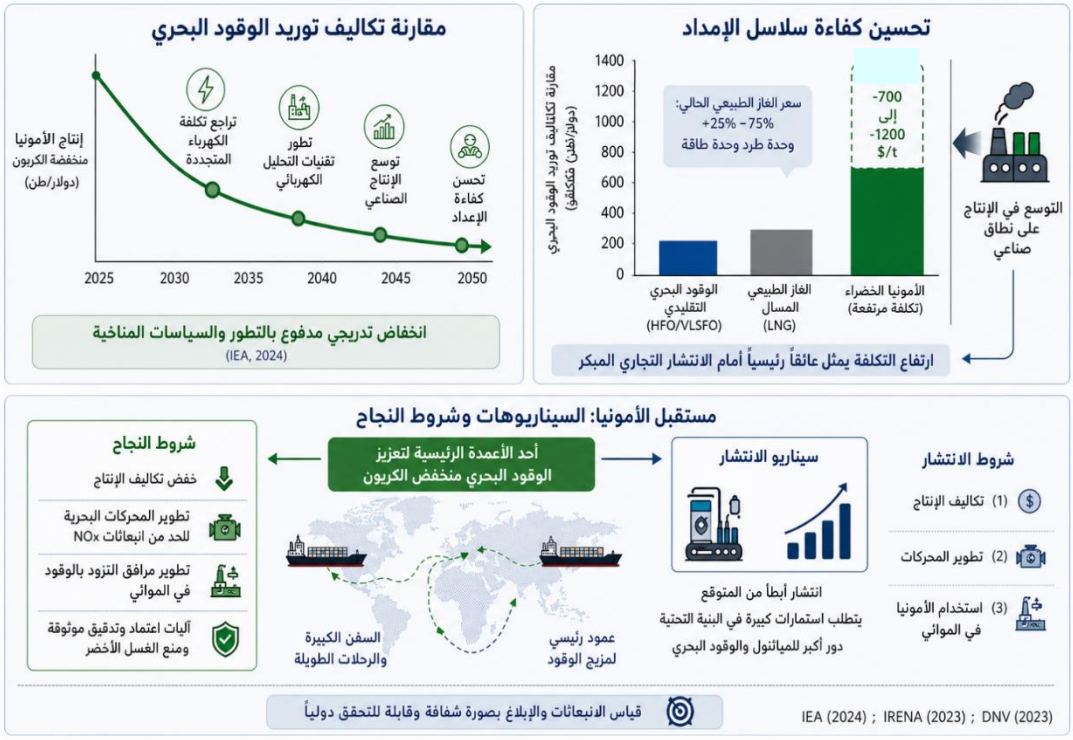
تُعد التكاليف المرتفعة لإنتاج الأمونيا منخفضة الانبعاثات من أبرز العوائق أمام انتشارها كوقود بحري على نطاق واسع، ولا سيما في ظل الفجوة القائمة مقارنة بالوقود التقليدي. وفي هذا السياق، تمثل هذه الفجوة عاملاً حاسماً في قرارات التحول داخل قطاع الشحن، الذي يتسم بحساسية عالية تجاه التكاليف التشغيلية.

ولا يقتصر تقييم الجدوى الاقتصادية على تكلفة الإنتاج وحدها، بل يرتبط بتطور منظومة متكاملة تشمل كفاءة سلاسل القيمة، وتوافر البنية التحتية لتموين السفن، ومستوى النضج التنظيمي، إلى جانب كفاءة تقنيات الاستخدام النهائي، بما في ذلك أداء المحركات وأنظمة الدفع، والحد من انبعاثات أكاسيد النيتروجين وانبعاث الأمونيا غير المحترقة.

كما يمثل تطوير أدوات التمويل وآليات الاعتماد والتصديق عنصراً محورياً في دعم بناء سوق موثوقة للأمونيا منخفضة الانبعاثات، من خلال تمكين قياس الانبعاثات والإفصاح عنها بصورة شفافة وقابلة للتحقق، بما يقلل من مخاطر المبالغة في الادعاءات البيئية ويحد من ظاهرة "الغسل الأخضر."

وبناءً على ذلك، فإن تنافسية الأمونيا كوقود بحري لا تُقاس بتكلفتها الحالية فحسب، بل بمدى تطور منظومة متكاملة من العوامل التقنية والتنظيمية والتمويلية، والتي ستحدد قدرتها على الانتشار والمنافسة ضمن سوق الوقود البحري خلال العقود المقبلة[51]. يبين الشكل (3-9) أبرز التحديات والفرص المرتبطة باستخدام الأمونيا كوقود بحري، في ضوء التفاعل بين العوامل التقنية والتنظيمية والاقتصادية".

الشكل (3-9): أبرز التحديات والفرص المرتبطة باستخدام الأمونيا كوقود بحري



على الرغم من التقدم الملحوظ في تطوير استخدام الأمونيا كوقود بحري، فإن تقييم دورها في هذا القطاع لا يقتصر على الاستخدام المباشر كوقود، بل يمتد ليشمل دورها ضمن منظومة أوسع لنقل الطاقة على المستوى العالمي. إذ تتيح خصائصها الكيميائية واللوجستية، إلى جانب إمكانية إنتاجها باستخدام الهيدروجين منخفض الكربون، توظيفها كوسيط فعال في سلاسل إمداد الطاقة.

وفي هذا السياق، يبرز استخدام الأمونيا كحامل للهيدروجين بوصفه أحد المسارات الاستراتيجية الواعدة، التي يمكن أن تسهم في إعادة تشكيل أنماط التجارة الدولية للطاقة، والتأثير

51 International Energy Agency. International Energy Agency (IEA). (2024). Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector – 2024 Update. Paris: IEA.

في ديناميكيات الطلب على النقل البحري. ومن ثم، فإن استشراف مستقبل دور الأمونيا في هذا القطاع يرتبط ارتباطاً وثيقاً بوظيفتها المتنامية في سلاسل إمداد الهيدروجين منخفض الكربون، وهو ما يستدعي تناول هذا الدور ضمن سياق أشمل لمنظومة الطاقة العالمية.

4.3. دور الأمونيا كحامل للهيدروجين في منظومة الطاقة العالمية

في سياق التحول العالمي نحو اقتصاد منخفض الكربون، تبرز الأمونيا بوصفها أحد أهم الحوامل الكيميائية للهيدروجين، إلى جانب دورها المتنامي كوقود محتمل في قطاع النقل البحري. وتكتسب هذه المكانة أهمية خاصة في ظل التحديات التقنية والاقتصادية المرتبطة بنقل وتخزين الهيدروجين، حيث توفر الأمونيا مساراً عملياً لنقل الطاقة عبر مسافات طويلة بكفاءة أعلى وتكلفة أقل مقارنة بالهيدروجين في حالتيه الغازية أو السائلة. وفي هذا الإطار، يتقاطع استخدامها كوقود بحري مع دورها كوسيط لنقل الهيدروجين، بما يعزز تكامل سلاسل الإمداد بين مناطق الإنتاج والاستهلاك، ويدعم تطوير منظومة طاقة منخفضة الكربون على المستوى العالمي.

وعلى الرغم من الأهمية المتزايدة للهيدروجين كركيزة أساسية في مسارات إزالة الكربون، فإن نقله وتخزينه على نطاق واسع يواجهان قيوداً جوهرية تحد من انتشاره التجاري عبر المسافات الطويلة. ويعزى ذلك أساساً إلى انخفاض كثافته الطاقية الحجمية في الحالة الغازية، التي لا تتجاوز نحو 3–5 ميجا جول/لتر، ما يستلزم ضغطه عند مستويات مرتفعة تتراوح بين 350 و700 بار، أو تسييله عند درجات حرارة شديدة الانخفاض تبلغ نحو-253° م. وتؤدي هذه المتطلبات إلى زيادة كبيرة في استهلاك الطاقة، إذ قد تصل الطاقة اللازمة لعملية التسييل إلى نحو 25–30% من المحتوى الطاقي للهيدروجين، فضلاً عن ارتفاع تكاليف البنية التحتية المرتبطة بالنقل والتخزين. كما يواجه الهيدروجين تحديات إضافية تتعلق بخصائصه الفيزيائية، من أبرزها ظاهرة التقصف الهيدروجيني Hydrogen Embrittlement ، التي تؤثر في متانة المواد المعدنية—لا سيما الفولاذ—وتزيد من مخاطر التشقق تحت الإجهاد، مما يستدعي حلولاً هندسية مكلفة. وإلى جانب ذلك، لا تزال شبكات نقل الهيدروجين محدودة ومتركزة جغرافياً، وهو ما يعزز الحاجة إلى بدائل أكثر مرونة لنقل الطاقة عبر الحدود[52]، والتي تؤدي إلى إضعاف

[52] تُعد ظاهرة **التقصف الهيدروجيني (Hydrogen Embrittlement)** من أبرز التحديات التقنية المرتبطة بنقل وتخزين الهيدروجين، حيث يؤدي تسرب ذرات الهيدروجين إلى داخل البنية البلورية للمعادن – خاصة الفولاذ – إلى إضعاف الروابط بين الذرات وتقليل ليونة المادة. ونتيجة لذلك،

البنية البلورية للمعادن (خاصة الفولاذ) وجعلها عرضة للتشقق والكسر تحت الإجهاد الميكانيكي، مما يهدد سلامة خطوط الأنابيب ويستلزم تقنيات معالجة باهظة الثمن. وإلى جانب ذلك، لا تزال شبكات النقل المخصصة للهيدروجين محدودة ومتركزة جغرافياً وفق تقديرات الوكالة الدولية للطاقة ، مما يعزز الحاجة إلى حلول بديلة أكثر مرونة لنقل الطاقة عبر الحدود.

في ضوء هذه التحديات، تبرز الأمونيا كأحد أكثر حوامل الهيدروجين قابلية للتطبيق على نطاق واسع. فبينما يتمتع الهيدروجين بكثافة طاقية مرتفعة من حيث الوزن، فإن كفاءته في النقل تتأثر بانخفاض كثافته الحجمية. وعلى النقيض من ذلك، توفر الأمونيا حلاً أكثر كفاءة من حيث الحجم، إذ تحتوي على نحو 17.6% من الهيدروجين وزناً، وتمكن من نقل ما يتراوح بين 106 و127 كجم من الهيدروجين لكل متر مكعب، مقارنة بنحو 70 كجم/م^3 للهيدروجين السائل. كما تتميز بكثافة طاقية حجمية تتراوح بين 11 و14 ميجا جول/لتر، متفوقة على الهيدروجين السائل (8–10 ميجا جول/لتر) والمضغوط (3–5 ميجا جول/لتر)، وهو عامل حاسم في تطبيقات النقل البحري حيث يمثل الحجم عنصراً اقتصادياً محورياً.

وتتعزز جدوى الأمونيا كذلك بفضل سهولة تسييلها وتداولها، إذ يمكن تخزينها عند درجة حرارة تبلغ نحو-33° م أو عند ضغط يقارب 10 بار في درجة حرارة الغرفة، وهي ظروف تشغيلية أقل تعقيداً واستهلاكاً للطاقة مقارنة بالهيدروجين. إضافة إلى ذلك، تستند الأمونيا إلى تقنية "هابر–بوش" الناضجة صناعياً، وتستفيد من بنية تحتية عالمية قائمة—طُورت أساساً لصناعة الأسمدة—تشمل مرافق إنتاج وتخزين وشبكات نقل بحرية متقدمة. ويحد ذلك من الحاجة إلى استثمارات رأسمالية ضخمة، ويعزز من دور الأمونيا بوصفها جسراً عملياً لنقل الهيدروجين منخفض الكربون إلى مراكز الطلب العالمية بصورة آمنة وقابلة للتوسع. يبين **الجدول (3-2)** مقارنة خصائص الهيدروجين والأمونيا كحامل للهيدروجين[53].

تصبح المواد أكثر عرضة للتشقق أو الكسر المفاجئ تحت تأثير الإجهادات الميكانيكية، حتى عند مستويات تحميل أقل من حدود التصميم. وتكتسب هذه الظاهرة أهمية خاصة في خطوط الأنابيب وخزانات التخزين، حيث يمكن أن تؤثر على سلامة البنية التحتية وتزيد من تكاليف التشغيل والصيانة. ولهذا السبب، يتطلب نقل الهيدروجين استخدام مواد خاصة أو تقنيات معالجة متقدمة للحد من هذه الظاهرة، وهو ما يمثل أحد العوامل التي تعزز من جاذبية استخدام حوامل كيميائية مثل الأمونيا لنقل الهيدروجين بصورة أكثر أمانًا وكفاءة.

[53] IRENA, 2022; Hydrogen Council, 2023

جدول (3-2): مقارنة خصائص الهيدروجين والأمونيا كحامل للهيدروجين

المؤشر	الأمونيا (سائلة) (NH_3)	الهيدروجين السائل (LH_2)	الهيدروجين المضغوط (GH_2)
الكثافة الطاقية الوزنية (ميجا جول/كجم)	18.6	120	120
الكثافة الطاقية الحجمية (ميجا جول/لتر)	11 – 14	8 – 10	3 – 5
درجة التسييل	-33 م°	-253 م°	—
الضغط المطلوب للتخزين	≈ 10 بار	منخفض (عند التسييل)	350 – 700 بار
كثافة الهيدروجين (كجم/م³)	106 – 127	≈ 70	منخفضة جداً
نسبة الهيدروجين بالوزن	%17.6	%100	%100
كفاءة إعادة التحويل (Cracking)	%65 – %75	—	—
مستوى البنية التحتية	متوفر عالمياً	محدود	محدود

المصدر: إعداد الباحث بالاعتماد على: (IEA, 2023; IRENA, 2022; Hydrogen Council, 2023; U.S. DOE, 2022)

يتضح من بيانات **الجدول (3-2)** أن اختلاف خصائص تخزين الهيدروجين يؤثر مباشرة في جدوى نقله عبر المسافات الطويلة. فعلى الرغم من ارتفاع الكثافة الطاقية الوزنية للهيدروجين، فإن انخفاض كثافته الحجمية، خاصة في الحالة المضغوطة، يحد من كفاءته اللوجستية. وفي المقابل، توفر الأمونيا، في حالتها السائلة، توازناً أفضل بين الكثافة الحجمية وسهولة التخزين وتوافر البنية التحتية، مما يعزز ملاءمتها كحامل عملي للهيدروجين في سلاسل الإمداد العالمية والنقل البحري طويل المسافة

1.4.3. سلاسل إمداد الأمونيا كحامل للهيدروجين: الفرص والتحديات في التجارة الدولية

في ظل التباين الجغرافي بين مناطق إنتاج الطاقة المتجددة منخفضة التكلفة ومراكز الطلب الصناعي، يُتوقع أن تلعب التجارة الدولية للهيدروجين دوراً متزايد الأهمية خلال العقود القادمة، حيث تشير التقديرات إلى أن نحو 20-25% من الطلب العالمي على الهيدروجين قد يُلبى عبر التجارة الدولية بحلول عام 2050. وفي هذا السياق، تبرز الأمونيا منخفضة الانبعاثات بوصفها أحد أبرز الحلول العملية لنقل الهيدروجين عبر مسافات طويلة، نظراً لسهولة تسييلها وارتفاع كثافتها الحجمية مقارنة بالهيدروجين.

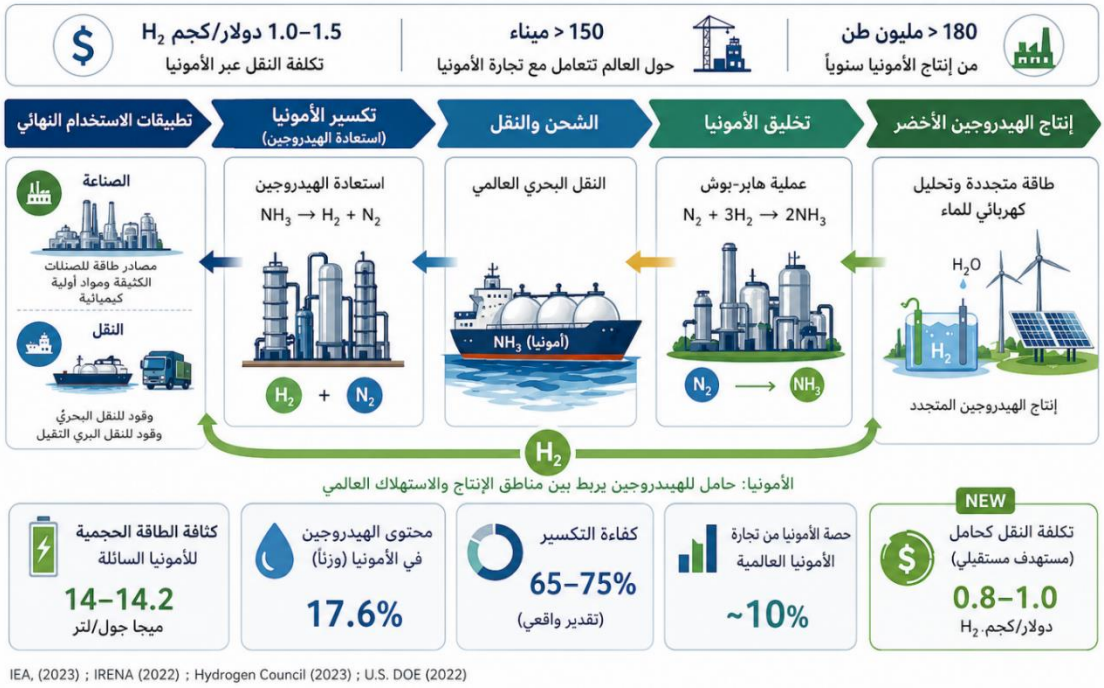
تعكس سلاسل إمداد الأمونيا كحامل للهيدروجين نمطاً مكانياً واضحاً يقوم على تركز الإنتاج في مناطق غنية بالموارد، مقابل انتشار مراكز الطلب في الاقتصادات الصناعية، مع تدفقات بحرية

تربط بينهما عبر ممرات التجارة العالمية. وتتكون هذه السلسلة من مراحل رئيسة تشمل إنتاج الهيدروجين—غالباً عبر التحليل الكهربائي باستخدام مصادر متجددة—ثم تحويله إلى أمونيا لتسهيل النقل، يلي ذلك الشحن البحري لمسافات طويلة، وأخيراً استخدام الأمونيا مباشرة كوقود (خصوصاً في النقل البحري) أو إعادة تكسيرها إلى هيدروجين في مواقع الاستهلاك بحسب متطلبات الاستخدام النهائي

ورغم هذه المزايا اللوجستية، فإن هذا المسار يواجه تحديات تقنية واقتصادية مؤثرة. إذ تتطلب عملية تكسير الأمونيا لإنتاج الهيدروجين في موقع الاستهلاك طاقة إضافية، حيث تتراوح كفاءتها بين 65-75%، بما يعني فقدان نحو 25-35% من الطاقة الكلية عبر سلسلة القيمة. كما أن هذه التقنية لا تزال في طور التطوير التجاري، ما يستدعي مزيداً من الابتكار لتحسين الكفاءة وخفض التكاليف. وعلى المستوى الاقتصادي، تتراوح تكلفة نقل الهيدروجين على شكل أمونيا بين 1.5–1.0دولار/كجم هيدروجين لمسافات طويلة، مقارنة بنحو 2.0–1.5دولار/كجم للهيدروجين السائل، مما يعزز من تنافسية الأمونيا رغم تكاليف إعادة التحويل.

وتبرز كذلك تحديات بيئية وتشغيلية، من أبرزها انبعاثات أكاسيد النيتروجين عند استخدام الأمونيا كوقود، ومتطلبات السلامة المرتبطة بسميتها، الأمر الذي يفرض ضرورة تطوير أطر تنظيمية وتقنية متكاملة لضمان الاستخدام الآمن والفعال. وفي المقابل، تشير البيانات إلى أن الإنتاج العالمي للأمونيا يقترب من 190 مليون طن سنوياً، يتم تداول نحو 10% منها دولياً، مع وجود أكثر من 150 ميناءً قادراً على التعامل معها، ما يعكس مستوى أولياً من الجاهزية للبنية التحتية العالمية. غير أن توظيف هذه البنية كناقل للطاقة يتطلب تكييفها وتوسعتها لتلبية متطلبات التحول نحو اقتصاد الهيدروجين، مع تنامي دور الموانئ كمراكز طاقة متعددة الوظائف تجمع بين خدمات التزويد بالوقود البحري وتوزيع حوامل الهيدروجين. يبين الشكل(3-10) سلسلة القيمة للأمونيا كحامل للهيدروجين وتطبيقاتها النهائية.

الشكل (3-10) : سلسلة القيمة للأمونيا كحامل للهيدروجين وتطبيقاتها النهائية



IEA, (2023) ; IRENA (2022) ; Hydrogen Council (2023) ; U.S. DOE (2022)

2.4.3.الترابط مع الشحن البحري

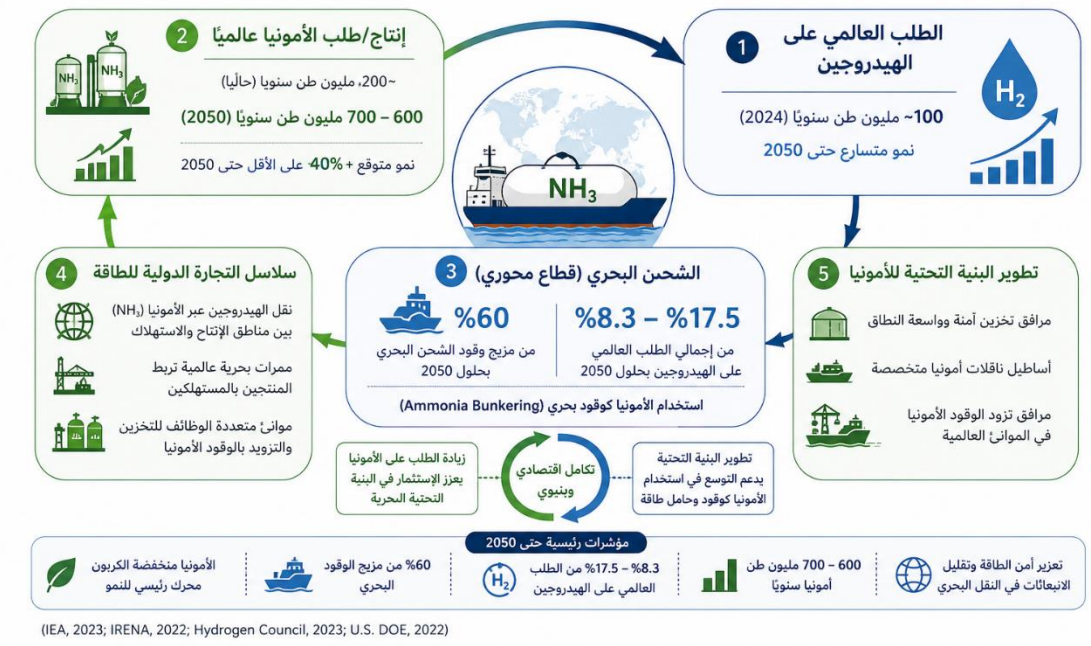
يمثل قطاع الشحن البحري أحد أهم مجالات التطبيق المستقبلية للأمونيا، حيث يتقاطع دورها كوقود منخفض الكربون مع وظيفتها كحامل للهيدروجين ضمن سلاسل التجارة الدولية للطاقة. وفي هذا الإطار، لا يقتصر دور الأمونيا على كونها وقوداً بديلاً للسفن، بل يمتد ليشمل نقل الطاقة بين مناطق الإنتاج والاستهلاك، بما يعزز من تكامل سلاسل الإمداد العالمية للهيدروجين.

وتشير تقديرات مؤسسات التصنيف الدولية، مثل DNV، إلى أن الأمونيا والهيدروجين قد يشكلان ما يصل إلى نحو 60%من مزيج وقود الشحن البحري بحلول عام 2050، مقارنة بمستويات هامشية في الوقت الحالي. كما يُتوقع أن يمثل الطلب على الهيدروجين المستخدم لإنتاج الأمونيا لقطاع الشحن ما بين 8.3% و17.5% من إجمالي الطلب العالمي على الهيدروجين بحلول الفترة ذاتها، وهو ما يعكس الوزن المتزايد لهذا القطاع في تحفيز نمو الطلب على الأمونيا منخفضة الكربون[54].

54 IEA, Ammonia technology road map,2025.

ع توسع استخداماتها خارج قطاع الأسمدة لتشمل الطاقة والنقل . كما تشير تقديرات أخرى إلى أن السوق العالمي للأمونيا قد ينمو ليصل إلى نحو 600-700 مليون طن سنويًا بحلول 2050،[55] مقارنة بنحو 200 مليون طن حالياً، مع كون الجزء الأكبر من هذا النمو مدفوعًا بالأمونيا منخفضة الكربون . ومن المتوقع أن يسهم هذا التوسع في تسريع تطوير البنية التحتية المرتبطة بالأمونيا، بما في ذلك مرافق التخزين والنقل والتزويد بالوقود البحري، حيث يعزز انتشار استخدامها كوقود الجدوى الاقتصادية للاستثمار في هذه البنية، والعكس صحيح. ويعكس ذلك وجود علاقة تكاملية بين دور الأمونيا كوقود بحري وكونها ناقلاً للطاقة، مما يدعم انتشارها ضمن منظومة الطاقة منخفضة الكربون[56]. يبين الشكل (3-11) نمو الطلب ا على الامونيا كحامل للهيدروجين، والشحن البحري حتى عام 2050.

الشكل (3-11) : نمو الطلب على الأمونيا كحامل للهيدروجين والشحن البحري حتى 2050



المصدر: (IEA, 2023; IRENA, 2022; Hydrogen Council, 2023; U.S. DOE, 2022)

55 The Oregon group. Is ammonia the answer to hydrogen energy's problems?

56 (IEA, 2023; Hydrogen Council, 2023).

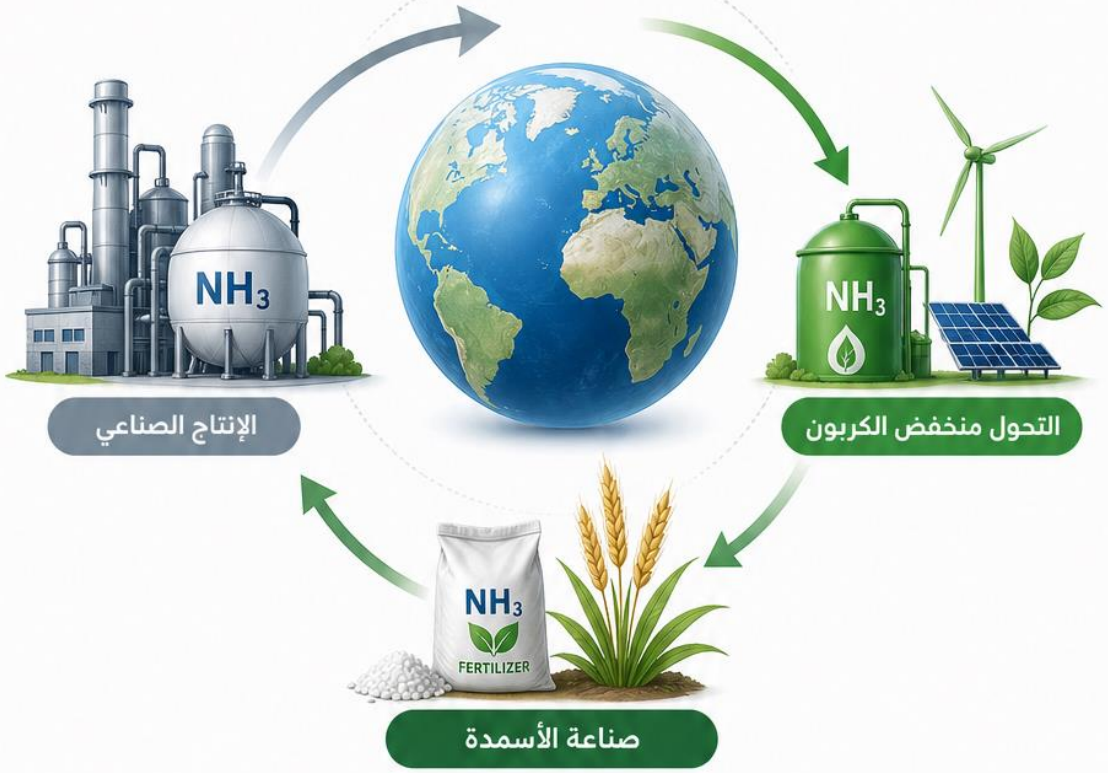
قائمة مراجع الفصل الثالث

1. International Maritime Organization (IMO). (2023). Revised Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships.
2. Maritime and Port Authority of Singapore (MPA). (2024). *World's first use of ammonia as a marine fuel in a dual-fuel ammonia-powered vessel*.
3. International Energy Agency (IEA). (2023). *Ammonia Technology Roadmap: Towards More Sustainable Nitrogen Fertiliser Production*. Paris: IEA.
4. International Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). *Global Hydrogen Trade Outlook*. Abu Dhabi: IRENA.
5. Hydrogen Council. (2023). *Global Hydrogen Flows*. Brussels: Hydrogen Council.
6. U.S. Department of Energy (U.S. DOE). (2022). *Hydrogen Program Plan*. Washington, DC: U.S. DOE.
7. DNV. (2023). *Energy Transition Outlook: Maritime Forecast to 2050*. Oslo: DNV.

OAPEC
Organization of
Arab Petroleum
Exporting Countries

الباب الرابع

الأمونيا وصناعة الأسمدة:
التحديات والفرص
في ظل التحول منخفض الكربون



حلقة الربط بين الطاقة والزراعة من أجل مستقبل مستدام

فرص استثمارية
تحفيز الابتكار والشراكات من أجل المستقبل

كفاءة الموارد
استخدام أمثل للطاقة والموارد الطبيعية

أمن الغذاء
تعزيز الإنتاج الزراعي بحلول فعالة

خفض الانبعاثات
تقنية نظيفة وممارسات مستدامة

أمونيا مستدامة | أسمدة غذاء | مستقبل أخضر

الفصل الرابع: الأمونيا وصناعة الأسمدة: التحديات والفرص في ظل التحول منخفض الكربون

مقدمة

في ظل الدور المحوري للأمونيا في إنتاج الأسمدة النيتروجينية، يواجه هذا القطاع تحولات متسارعة ترتبط بتزايد الطلب العالمي على الغذاء من جهة، وتصاعد الضغوط لخفض الانبعاثات وتحسين كفاءة استخدام الموارد من جهة أخرى. ومع النمو السكاني والتوسع الحضري، تتزايد الحاجة إلى تعزيز الإنتاج الزراعي، وهو ما يضع قطاع الأسمدة أمام تحدي يتمثل في تحقيق التوازن بين تلبية احتياجات الأمن الغذائي والحد من الفاقد والانبعاثات المرتبطة بالاستخدام المكثف للأسمدة. في هذا السياق، لم يعد التركيز مقتصراً على زيادة كميات الأسمدة المنتجة، بل امتد ليشمل تحسين كفاءة استخدام النيتروجين وتقليل الخسائر عبر مختلف مراحل السلسلة الزراعية. ويعكس ذلك تحولاً تدريجياً من نموذج يعتمد على تعظيم الإنتاج الكمي، إلى نموذج يركز على كفاءة استخدام الموارد ضمن قيود متزايدة على مستوى الانبعاثات.

يتقاطع هذا التحول بشكل وثيق مع التغيرات في قطاع الطاقة، نظراً لاعتماد إنتاج الأمونيا التقليدي على الوقود الأحفوري، وهو ما يجعل كثافة الانبعاثات في قطاع الأسمدة مرتبطة بمسارات إنتاج الأمونيا ومزيج الطاقة المستخدم. ومن ثم، يبرز التوسع في إنتاج الأمونيا منخفضة الانبعاثات—سواء عبر تقنيات احتجاز الكربون أو من خلال الاعتماد على الهيدروجين المنتج من مصادر متجددة—كأحد المسارات الرئيسية لخفض كثافة الانبعاثات وتعزيز كفاءة استخدام الموارد. في هذا الإطار، تمثل الأمونيا منخفضة الانبعاثات ركيزة أساسية في إعادة تشكيل صناعة الأسمدة، ليس فقط من خلال دورها في خفض الانبعاثات، بل أيضاً عبر دعم تحسين كفاءة استخدام النيتروجين، بما يسهم في تحقيق التوازن بين متطلبات الأمن الغذائي واعتبارات خفض الانبعاثات ضمن منظومة إنتاج زراعي أكثر كفاءة واستدامة.

1.4. أهمية الأمونيا في منظومة الإنتاج الغذائي

تمثل الأمونيا حجر الزاوية في النظام الغذائي العالمي، حيث يُوجَّه نحو 80% من الإنتاج العالمي إلى قطاع الأسمدة، بما يعادل نحو 155مليون طن سنوياً من إجمالي إنتاج يتجاوز 190 مليون طن. وتستخدم هذه الكميات في إنتاج الأسمدة النيتروجينية التي تُعد العامل الأكثر تأثيراً في رفع إنتاجية المحاصيل الزراعية. وتشير التقديرات إلى أن نحو 45-50% من الإنتاج الغذائي العالمي

يعتمد بصورة مباشرة أو غير مباشرة على استخدام الأسمدة النيتروجينية، وهو ما يعكس الدور الحاسم للأمونيا في دعم الأمن الغذائي، خاصة في ظل محدودية التوسع الأفقي في الأراضي الزراعية على المستوى العالمي.

1.1.4. أنواع الأسمدة المعتمدة على الأمونيا

يتحدد أداء الأسمدة النيتروجينية بدرجة كبيرة وفق الصورة الكيميائية التي يتخذها النيتروجين في التربة، حيث يظهر بشكل رئيسي في ثلاث صور :النترات(NO_3^-) ، والأمونيوم (NH_4^+)، واليوريا ($CO(NH_2)_2$) . وتنعكس هذه الصور على سلوك النيتروجين داخل التربة من حيث حركته، وتحولاته، ومدى جاهزيته للامتصاص النباتي، وكذلك مسارات الفقد المرتبطة به، وهو ما يؤثر بصورة مباشرة على كفاءة استخدامه.

في هذا الإطار، يمكن تصنيف الأسمدة المعتمدة على الأمونيا إلى ثلاثة أنماط رئيسية وفقاً لطبيعة تحرر النيتروجين. فأسمدة النترات تمتاز بسرعة ذوبانها في التربة وارتفاع جاهزية النيتروجين للامتصاص المباشر من قبل النبات، إلا أنها تكون أكثر عرضة للفقد، سواء عبر انتقالها مع مياه التربة إلى خارج منطقة الجذور (الغسل)، أو تحولها إلى غازات نيتروجينية في الظروف اللاهوائية (نزع النترجة)، نتيجة سهولة حركتها وضعف ارتباطها بجزيئات التربة. أما أسمدة الأمونيوم فتتسم بدرجة أعلى من الاستقرار النسبي بسبب ارتباط أيونات الأمونيوم بجزيئات التربة، مما يحد من حركتها، إلا أنها قد تتحول لاحقاً إلى نترات عبر عملية النترجة، أو تتعرض للفقد بالتطاير في بعض الظروف. في حين تمثل الأسمدة المختلطة حلاً وسطاً، إذ تجمع بين سرعة إمداد النبات بالنيتروجين وتقليل الفاقد، بما يسهم في تحسين كفاءة استخدام الأسمدة.

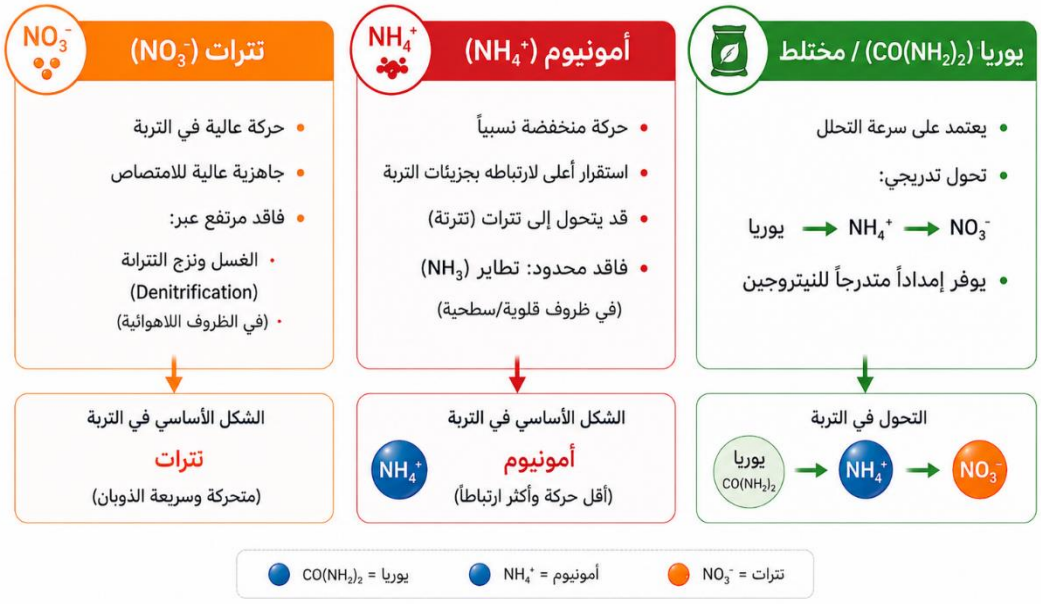
أما على مستوى المنتجات، تُعد اليوريا الأكثر انتشاراً عالمياً بفضل ارتفاع محتواها من النيتروجين وانخفاض تكلفتها، إلا أنها تمر بسلسلة من التحولات داخل التربة (التحلل إلى أمونيوم ثم نترات)، ما يجعلها عرضة للفقد إذا لم تُدار وفق ممارسات زراعية مناسبة. كما تُستخدم الأمونيا اللامائية كمصدر عالي التركيز للنيتروجين، وتحقق كفاءة مرتفعة عند تطبيقها وفق اشتراطات تشغيلية دقيقة.

لا يقتصر تأثير هذه الاختلافات على الخصائص الكيميائية، بل يمتد ليشمل كفاءة الاستخدام في الحقل، حيث تُعد الأسمدة النيتروجينية من أكثر المدخلات عرضة للفقد عبر مسارات متعددة تشمل الغسل، والتطاير، ونزع النترجة. وتشير التقديرات إلى أن كفاءة استخدام

النيتروجين عالمياً لا تتجاوز 40–60%، وهو ما يعكس فجوة كبيرة بين الكميات المضافة والعائد الفعلي للمحاصيل.

وفي هذا السياق، تبرز أهمية تحسين اختيار نوع السماد وتوقيت تطبيقه وطرق استخدامه كأحد المسارات الرئيسية لرفع كفاءة الاستخدام وتقليل الفاقد. كما تتكامل هذه الجهود مع التوجه نحو إنتاج الأمونيا منخفضة الانبعاثات، بما يسهم في خفض البصمة الكربونية لقطاع الأسمدة عبر مرحلتي الإنتاج والاستخدام، ويعزز استدامة منظومة الإنتاج الغذائي. يبين الشكل (4-1) تصنيف الأسمدة النيتروجينية الشائعة وخصائصها، في حين يقدّم جدول (4-1) مقارنةً تفصيلية بين هذه الأنواع من حيث الخصائص والكفاءة ومسارات الفقد. يبين الشكل (4-1) تصنيف الأسمدة النيتروجينية الشائعة وخصائصها. بينما يبين جدول (4-1) مقارنة أنواع الأسمدة النيتروجينية.

الشكل (4-1): تصنيف الأسمدة النيتروجينية الشائعة وخصائصها



المصدر: من إعداد الباحث، استناداً إلى بيانات وتقارير وكالة الطاقة الدولية(IEA) ، ومنظمة الأغذية والزراعة(FAO) ، والجمعية الدولية للأسمدة.(IFA)

جدول (4-1): مقارنة أنواع الأسمدة النيتروجينية

النوع	الصيغة	السلوك في التربة	الميزة الرئيسية	التحديات	ملاحظات تطبيقية
نترات	NO_3^-	عالية الذوبان وسريعة الحركة، لا ترتبط بجزيئات التربة	امتصاص سريع وفوري من النبات	فقد مرتفع بالغسل ونزع النترتة (N_2O)	مناسبة للمراحل السريعة للنمو
أمونيوم	NH_4^+	يرتبط بالغرويات الطينية ويتحول تدريجيًا إلى نترات	استقرار أعلى وتقليل الفقد بالغسل	تطاير في التربة القلوية + تحمُّض التربة ($pH\downarrow$)	مناسب للترب الرملية وإدارة الفاقد
يوريا	$CO(NH_2)_2$	يتحول إلى NH_4^+ ثم NO_3^- داخل التربة	أعلى تركيز نيتروجين (~46%) وتكلفة منخفضة	فقد بالتطاير (NH_3) إذا لم يدمج في التربة	الأكثر استخداماً عالمياً

اختيار السماد يعتمد على نوع التربة والمحصول وظروف المناخ وإدارة الري.

يوريا: تتحول داخل التربة إلى NH_4^+ وNO_3^- وتحتاج لإدارة جيدة لتقليل الفاقد.

أمونيوم: أكثر استقراراً ويرتبط بجزيئات التربة.

نترات: عالية الحركة وقابلة للغسل من التربة.

2.1.4. مسارات فقد النيتروجين في التربة الزراعية

تُعد مسارات فقد النيتروجين أحد العوامل الحاكمة لكفاءة استخدام الأسمدة النيتروجينية، إذ لا يقتصر التحدي على كمية النيتروجين المضافة، بل يمتد إلى قدرة النظام الزراعي على الاحتفاظ به وتقليل خسائره داخل التربة. ويبدأ هذا المسار بإضافة النيتروجين عبر مدخلات متعددة تشمل الأسمدة النيتروجينية—وخاصة اليوريا والأسمدة الأمونيومية—إلى جانب التثبيت الحيوي للنيتروجين الجوي، لتغذية مخزون التربة من النيتروجين.

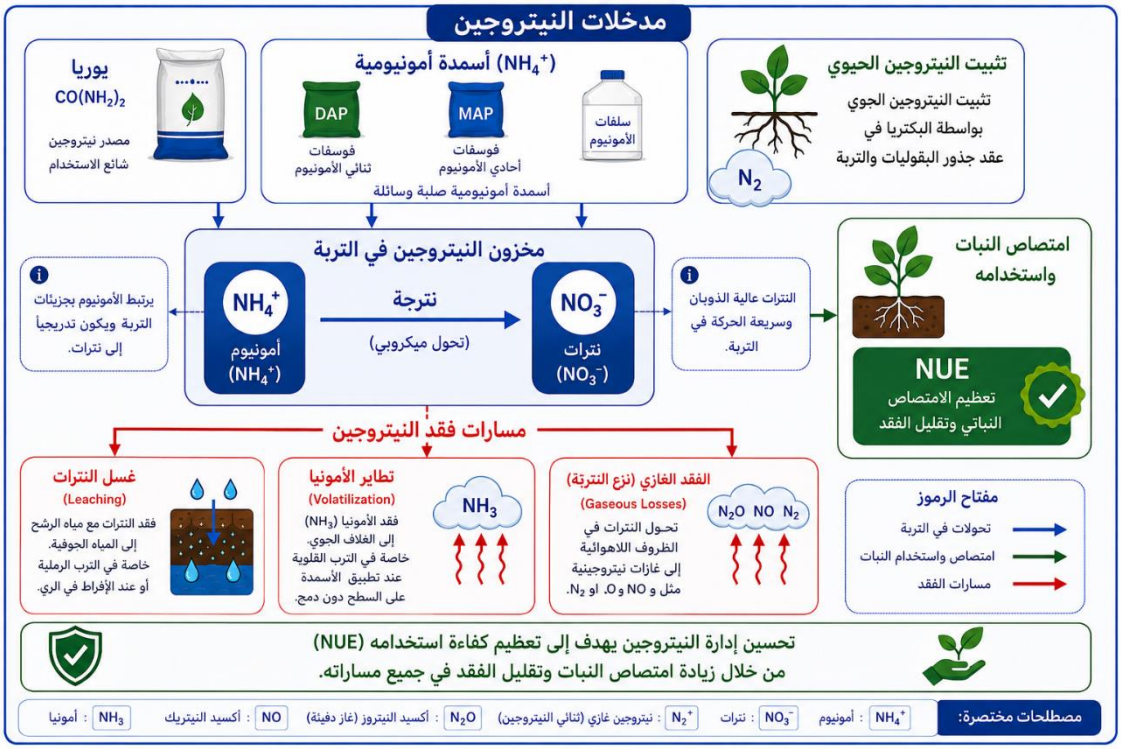
يوجد النيتروجين في التربة أساساً في صورتين رئيسيتين هما الأمونيوم (NH_4^+) والنترات (NO_3^-)، حيث يخضع لسلسلة من التحولات الحيوية والكيميائية، أبرزها تحول الأمونيوم إلى نترات عبر عملية النترجة. ويؤدي هذا التحول دوراً محورياً في تحديد مصير النيتروجين، إذ يتميز الأمونيوم بارتباطه النسبي بجزيئات التربة، في حين تتسم النترات بارتفاع ذوبانها وسرعة حركتها، ما يجعلها أكثر عرضة للفقد.

ويتوزع النيتروجين بعد ذلك بين مسارين رئيسيين: يتمثل المسار الأول في الامتصاص النباتي، وهو المسار المرغوب الذي يعكس الجزء المستخدم فعلياً في نمو المحاصيل، ويُعبَّر عنه بكفاءة استخدام النيتروجين (NUE)، والتي تتراوح عالمياً بين نحو 40–60%. أما المسار الثاني فيتمثل في مسارات الفقد، التي تحد من كفاءة الاستخدام وتؤثر في استدامة النظام الزراعي.

تشمل مسارات فقد النيتروجين ثلاث آليات رئيسية. يتمثل المسار الأول في تطاير الأمونيا (NH_3) إلى الغلاف الجوي، خاصة في الترب القلوية أو عند إضافة الأسمدة على سطح التربة دون دمجها. أما المسار الثاني فيتمثل في غسل النترات(Leaching) ، نتيجة ارتفاع ذوبانها وانتقالها مع مياه الرشح إلى المياه الجوفية، لا سيما في الترب الرملية أو عند الإفراط في الري. ويتمثل المسار الثالث في الفقد الغازي الناتج عن نزع النترجة، حيث تتحول النترات في الظروف اللاهوائية إلى غازات مثل N_2O و N_2. ويجمع هذا المسار بين فقد النيتروجين والتأثيرات البيئية، نظراً إلى أهمية أكسيد النيتروز (N_2O) بوصفه أحد الغازات الدفيئة مرتفعة التأثير المناخي.

ويُظهر هذا التداخل بين الامتصاص والفقد أن كفاءة استخدام النيتروجين لا تتحدد بكمية المدخلات فقط، بل بمدى كفاءة إدارة هذه المسارات داخل التربة. ومن ثم، تبرز أهمية تحسين ممارسات التسميد—من حيث اختيار نوع السماد، وتوقيت الإضافة، وطرق التطبيق—كأدوات رئيسية لزيادة الامتصاص وتقليل الفقد، بما يسهم في رفع كفاءة الاستخدام والحد من الانبعاثات. وفي هذا السياق، وعلى الرغم من أن التحول نحو إنتاج الأمونيا منخفضة الانبعاثات يسهم في خفض كثافة الانبعاثات في مرحلة التصنيع، فإن تحقيق الأثر الكامل يتطلب معالجة مسارات الفقد في مرحلة الاستخدام. ويؤكد ذلك أن تحسين كفاءة استخدام النيتروجين في الحقل يمثل مكملاً أساسياً لجهود خفض الانبعاثات عبر سلسلة القيمة، حيث يجمع النهج المتكامل بين كفاءة الإنتاج وكفاءة الاستخدام لتحقيق استدامة منظومة الأسمدة. يبين الشكل (4-2) مسارات فقد النيتروجين في التربة وآليات انتقاله.

الشكل (4-2): مسارات فقد النيتروجين في التربة وآليات انتقاله



المصدر: Nitrogen loss pathways – how much do we lose and in what form under different situations

2.4. الاستخدام المباشر للأمونيا اللامائية في الزراعة

يمثل الحقن المباشر للأمونيا اللامائية (Anhydrous Ammonia – NH_3) أحد أكثر أساليب التسميد كفاءة من حيث محتوى النيتروجين والتكلفة، إذ تحتوي على نحو 82% نيتروجين وزناً، وهو أعلى تركيز بين الأسمدة التقليدية. عند حقنها في التربة، تتفاعل سريعاً مع الرطوبة لتتحول إلى أيونات الأمونيوم (NH_4^+) التي ترتبط بجزيئات التربة، مما يحد من الفقد بالغسل مقارنة بالأسمدة النتراتية ويرفع كفاءة الاستخدام عند التطبيق السليم.

تعتمد كفاءة هذا الأسلوب بدرجة كبيرة على خصائص التربة وظروف التطبيق. يتطلب نجاح الحقن قدرة التربة على الانغلاق حول نقطة الإضافة لمنع تسرب الغاز. في الترب الجافة جداً أو عالية الرطوبة قد تزداد خسائر التطاير، ما يحد من الكفاءة الفعلية ويعكس حساسية هذا الأسلوب لظروف التشغيل.

من الناحية العملية، يتطلب استخدام الأمونيا اللامائية بنية تحتية متخصصة تشمل خزانات مضغوطة ومعدات حقن ميدانية. يفسر ذلك تركز استخدامها في نظم زراعية واسعة النطاق مثل الولايات المتحدة وكندا، إذ تمثل نحو 20–25% من استهلاك الأسمدة النيتروجينية

في الولايات المتحدة، بينما يظل انتشارها محدوداً في مناطق أخرى نتيجة المتطلبات اللوجستية واعتبارات السلامة.

اقتصادياً، تُعد الأمونيا اللامائية من أقل مصادر النيتروجين تكلفة عند الإنتاج، إلا أن تكاليف النقل والتخزين المتخصصين، إلى جانب متطلبات السلامة، تقلل من ميزتها النسبية في بعض النظم الزراعية، خاصة صغيرة النطاق. يتطلب التعامل معها تطبيق إجراءات تشغيلية صارمة نظراً لطبيعتها التفاعلية، ما يحد من مرونة استخدامها مقارنة بالأسمدة الصلبة أو السائلة الأخرى.

في هذا السياق، يعكس استخدام الأمونيا اللامائية نموذجاً للتكامل بين الكفاءة التقنية والتحديات التشغيلية، إذ يمكن أن تسهم في رفع كفاءة استخدام النيتروجين وتقليل الفقد في مرحلة التطبيق. يرتبط دورها أيضاً بمسارات إنتاج الأمونيا، إذ لا يعتمد خفض الانبعاثات في قطاع الأسمدة على تحسين كفاءة الاستخدام في الحقل فحسب، بل يمتد إلى التحول نحو إنتاج الأمونيا منخفضة الانبعاثات عبر سلسلة القيمة [57].

3.4. دور الأمونيا في الثورة الزراعية الحديثة

أسهمت الأسمدة النيتروجينية المعتمدة على الأمونيا بدور محوري في دعم التحول الهيكلي في القطاع الزراعي منذ منتصف القرن العشرين، إذ ارتفع إنتاج الحبوب العالمي بأكثر من ثلاثة أضعاف منذ الستينيات، بينما ظلت المساحة الزراعية مستقرة نسبياً. يعكس ذلك أن الزيادة في الإنتاج تحققت أساساً من خلال تحسين الإنتاجية، ما يؤكد الدور الحاسم للأمونيا في تعظيم كفاءة استخدام الأراضي.

تدعم البيانات هذا التحول بوضوح، إذ ارتفع متوسط إنتاج القمح عالمياً من نحو 1.1 طن/هكتار إلى أكثر من 3.5 طن/هكتار حالياً، في ظل الاستخدام المكثف للأسمدة النيتروجينية إلى جانب تحسين السلالات الزراعية. تشير التقديرات إلى أنه في غياب هذه الأسمدة، كان سيتعين التوسع في الأراضي الزراعية على نطاق واسع لتلبية الطلب الغذائي، بما كان سيؤدي إلى ضغوط إضافية على الموارد الطبيعية.

57 International Fertilizer Association (IFA, 2024). Short-Term Fertilizer Outlook 2024–2025

لا يقتصر دور الأمونيا على زيادة الإنتاجية الكمية، بل يمتد إلى دعم العمليات الحيوية داخل النبات، إذ يمثل النيتروجين عنصراً أساسياً في تخليق الأحماض الأمينية والبروتينات، إضافة إلى دوره في تكوين الكلوروفيل وتعزيز كفاءة التمثيل الضوئي.

4.4. كفاءة استخدام النيتروجين والتحديات البيئية

يرتبط انخفاض كفاءة استخدام النيتروجين (NUE) بآثار بيئية واقتصادية واسعة، إذ لا يمتص النبات سوى جزء من النيتروجين المضاف، بينما يُفقد الجزء المتبقي عبر مسارات متعددة تشمل التطاير، والغسل، ونزع النترجة، بما يعكس فجوة هيكلية بين مدخلات الأسمدة والعائد الإنتاجي الفعلي.

وتتمثل أبرز هذه الآثار في انبعاثات أكسيد النيتروز(N_2O) ، الذي يُعد من الغازات الدفيئة مرتفعة التأثير المناخي، إذ تعادل قدرته على الاحتباس الحراري نحو 298 ضعف تأثير ثاني أكسيد الكربون، فضلاً عن مساهمته في استنزاف طبقة الأوزون.

5.4.التحول الهيكلي في صناعة الأسمدة: من التوسع الكمي إلى الكفاءة والاستدامة

يشهد قطاع الأسمدة النيتروجينية تحولاً هيكلياً متدرجاً يعكس تغيراً في منطق الإنتاج والاستخدام، إذ لم يعد النمو قائماً على التوسع الكمي في الاستهلاك، بل على إعادة توجيه القطاع نحو نماذج أكثر كفاءة واستدامة. يأتي ذلك في ظل تزايد الضغوط المرتبطة بالانبعاثات، وتقلبات أسواق الطاقة، وتغير أولويات السياسات الزراعية والبيئية عالمياً.

يتجلى هذا **الاتجاه** في عدة أبعاد مترابطة. أولها إعادة تشكيل مسارات الإنتاج عبر التوسع في تطبيق تقنيات احتجاز الكربون وتطوير مشروعات الأمونيا منخفضة الانبعاثات، بما يخفض كثافة الانبعاثات المرتبطة بسلاسل إمداد الأسمدة. وثانيها تغير أنماط الاستخدام الزراعي، مع تزايد الاعتماد على الممارسات الذكية التي تعظم الاستفادة من المدخلات بدلاً من زيادتها.

يمتد هذا **المسار** إلى البعد الاقتصادي، حيث تسهم تقلبات أسعار الغاز الطبيعي وتنامي الأطر التنظيمية الخاصة بخفض الانبعاثات في إعادة تشكيل خريطة الإنتاج والتجارة العالمية، مع تزايد أهمية المنتجات منخفضة الانبعاثات في تحديد القدرة التنافسية. يتواكب ذلك مع تحول في تدفقات الاستثمار نحو التقنيات منخفضة الكربون، ما يعزز تسريع وتيرة التغيير في القطاع.

في هذا الإطار، يعاد تشكيل العلاقة بين الطاقة والزراعة، بحيث لم تعد الأسمدة مجرد مدخل إنتاجي، بل أصبحت جزءاً من منظومة مترابطة تتأثر بأسواق الطاقة والسياسات المناخية وسلاسل القيمة العالمية. تبرز الأمونيا منخفضة الانبعاثات كعنصر محوري في هذا **الاتجاه**، ليس فقط لخفض الانبعاثات، بل أيضاً لإعادة تموضع سلاسل الإمداد وتعزيز مرونة القطاع في مواجهة الصدمات.

وعليه، فإن إعادة تشكيل صناعة الأسمدة لا تمثل استجابة ظرفية، بل تعكس تغيراً أعمق في هيكل القطاع، مدفوعاً بتكامل العوامل التقنية والاقتصادية والتنظيمية، بما يتماشى مع الانتقال نحو نظم إنتاج أكثر كفاءة واستدامة.

6.4. التوزيع الجغرافي لمشروعات الأسمدة منخفضة الانبعاثات ودور الدول الأعضاء في أوابك

يشهد التوزيع الجغرافي لمشروعات الأسمدة منخفضة الانبعاثات تحولاً ملحوظاً يعكس إعادة تموضع مراكز الإنتاج العالمية في ضوء متطلبات خفض الانبعاثات وتغير هيكل تكاليف الطاقة. ولم يعد اختيار مواقع هذه المشروعات قائماً فقط على توافر المواد الخام، بل أصبح يعتمد بشكل متزايد على توفر مصادر الطاقة منخفضة الكربون، والبنية التحتية الصناعية، والأطر التنظيمية الداعمة.

في هذا السياق، تتوزع هذه المشروعات عبر أنماط رئيسية تشمل الدول المعتمدة على الغاز الطبيعي التي تتجه إلى تطوير مشروعات الأمونيا الزرقاء من خلال دمج تقنيات احتجاز الكربون، والدول التي تعتمد على الطاقة المتجددة لتطوير مشروعات الأمونيا الخضراء، إلى جانب نماذج هجينة تجمع بين المسارين. وتعكس هذه الأنماط تحولات في مراكز الإنتاج نحو المناطق التي تمتلك مزايا نسبية في مصادر الطاقة وتكاليفها.

وفي إطار هذه التحولات، تبرز الدول الأعضاء في منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك) بوصفها من الفاعلين الرئيسيين في سوق الأسمدة منخفضة الانبعاثات، مستفيدة من وفرة موارد الغاز الطبيعي وتكاليف إنتاجه التنافسية، إلى جانب الإمكانات المتنامية في الطاقة المتجددة. فعلى سبيل المثال، تعمل المملكة العربية السعودية على تطوير مشروعات متقدمة في مجال الأمونيا الزرقاء والخضراء ضمن توجهها لتنويع مزيج الطاقة وتعزيز موقعها كمورد للطاقة منخفضة الانبعاثات. كما تستفيد دولة قطر من موقعها كأحد أكبر منتجي الغاز الطبيعي

لتطوير مسارات إنتاج تعتمد على احتجاز الكربون، بما يعزز من قدرتها على إنتاج أمونيا منخفضة الانبعاثات بتكاليف تنافسية.

وقد بدأت هذه التوجهات في الترجمة العملية من خلال عدد من المشروعات والمبادرات التي تعكس سعي الدول الأعضاء إلى الانتقال من موقع المنتج التقليدي للأسمدة إلى موقع المنتج القادر على تلبية الطلب المتزايد على المنتجات منخفضة الانبعاثات. ويعزز من ذلك الموقع الجغرافي للدول العربية، الذي يتيح سهولة الوصول إلى الأسواق الأوروبية والآسيوية، في ظل تزايد الطلب على الأسمدة منخفضة الكربون.

كما تتقاطع هذه التطورات مع التحولات في مراكز الطلب، حيث تلعب السياسات المناخية في الأسواق الكبرى—خاصة في أوروبا—دوراً متزايداً في توجيه الاستثمارات نحو المنتجات منخفضة الانبعاثات، وهو ما يفتح آفاقاً جديدة أمام صادرات الدول الأعضاء. وفي هذا الإطار، لم تعد القدرة التنافسية تعتمد فقط على انخفاض التكلفة، بل أصبحت مرتبطة أيضاً بكثافة الانبعاثات المرتبطة بالمنتج النهائي.

وبذلك، فإن التوزيع الجغرافي لمشروعات الأسمدة منخفضة الانبعاثات لا يعكس فقط تحولاً في مواقع الإنتاج، بل يمثل فرصة استراتيجية للدول الأعضاء في أوابك لتعزيز دورها في الأسواق العالمية، من خلال الاستفادة من مزاياها النسبية في الطاقة، وتبني مسارات إنتاج منخفضة الانبعاثات، بما يدعم إعادة تموضعها ضمن سلاسل القيمة العالمية في قطاع الأسمدة. يبين الشكل (4-3) التوزيع الجغرافي لمشروعات الأسمدة النيتروجينية منخفضة الانبعاثات والتحول الإقليمي.

الشكل (4-3): التوزيع الجغرافي لمشروعات الأسمدة النيتروجينية منخفضة الانبعاثات والتحول الإقليمي

المصدر: من إعداد الباحث، (مصادر متعددة)

يعكس التوزيع الجغرافي لمشروعات الأمونيا منخفضة الانبعاثات نمطاً واضحاً من التخصص الإقليمي، حيث تتركز مراكز الإنتاج في الدول ذات المزايا التنافسية في الموارد والطاقة—وفي مقدمتها الدول العربية—في مقابل تمركز الطلب والتنظيم في الأسواق الآسيوية والأوروبية. ويُترجم هذا النمط إلى تدفقات تجارية متزايدة تربط بين مناطق الإنتاج منخفضة التكلفة ومراكز الاستهلاك عالية الطلب.

وفي هذا الإطار، تبرز الدول العربية كأحد المحاور الرئيسية في المرحلة الانتقالية لصناعة الأسمدة النيتروجينية، مستفيدة من تكامل موارد الغاز الطبيعي والطاقة المتجددة، إلى جانب موقعها الجغرافي الذي يتيح سهولة الوصول إلى الأسواق العالمية. ويعزز ذلك قدرتها على المساهمة في تلبية الطلب المتزايد على المنتجات منخفضة الانبعاثات، مع دعم استقرار سلاسل الإمداد العالمية[58].

58 Food and Agriculture Organization (2022–2023). The Future of Food and Agriculture.
International Fertilizer Association (2024). Fertilizer Outlook and Market Trends.
International Energy Agency (2023). Ammonia Technology Roadmap.
International Renewable Energy Agency (2023). Renewable Ammonia Outlook.

قائمة مراجع الفصل الرابع

1. Food and Agriculture Organization (FAO). (2022).
   The Future of Food and Agriculture – Drivers and Triggers for Transformation
2. International Fertilizer Association (IFA). (2023).
   Fertilizer Outlook and Global Nutrient Consumption.
3. Yara International. (2023).
   Low-Carbon Ammonia and Fertilizer Production Initiatives.
4. International Energy Agency (IEA). (2023).
   Ammonia Technology Roadmap: Towards More Sustainable Nitrogen Fertiliser Production. Paris: IEA.
5. World Bank. (2023).
   Commodity Markets Outlook: Fertilizers and Energy Prices.
6. Food and Agriculture Organization (FAO). (2023).
   Fertilizer Market Developments and Food Security Implications.

الاستنتاجات

خلصت الدراسة إلى مجموعة من الاستنتاجات التي تعكس تحولاً هيكلياً متسارعاً في هذه الصناعة على المستوى العالمي، وذلك على النحو التالي:

1. **ترسّخ مسارات الإنتاج منخفضة الكربون:**

لم يعد التحول نحو الأمونيا منخفضة الانبعاثات خياراً نظرياً، بل أصبح مساراً صناعياً واضح المعالم، تقوده حالياً تقنيات الأمونيا الزرقاء كحل انتقالي، في حين تمثل الأمونيا الخضراء المسار الاستراتيجي طويل الأجل، مدفوعة بالتقدم التقني وتراجع تكاليف التحليل الكهربائي.

2. **صعود الأمونيا كركيزة في منظومة الطاقة منخفضة الكربون:**

تجاوزت الأمونيا دورها التقليدي، لتصبح أحد الخيارات الرئيسة لإزالة الكربون من القطاعات صعبة التخفيض، لا سيما النقل البحري، إلى جانب دورها كحامل للهيدروجين ووسيط لتخزين الطاقة.

3. **تعمّق الترابط بين أسواق الطاقة والأمن الغذائي:**

يمثل إنتاج الأمونيا عنصراً حاسماً في استقرار منظومة الغذاء العالمية، نظراً لاعتماد قطاع الأسمدة عليها، بما يجعل استدامة إنتاجها منخفض الكربون ضرورة استراتيجية تتجاوز البعد البيئي لتشمل أمن الإمدادات الغذائية.

4. **استمرار تحديات كفاءة استخدام الموارد الزراعية:**

يُعد انخفاض كفاءة استخدام النيتروجين تحدياً هيكلياً رئيسياً، لما له من آثار بيئية واقتصادية، الأمر الذي يستدعي تطوير ممارسات زراعية أكثر كفاءة بالتوازي مع تحسين نظم الإنتاج الصناعي.

5. **تنامي تأثير العوامل الجيوسياسية على سلاسل الإمداد:**

أصبحت أسواق الأمونيا أكثر عرضة للتقلبات الجيوسياسية، نتيجة ارتباطها بأسواق الغاز الطبيعي وسلاسل التجارة العالمية، مما يعزز أهمية بناء سلاسل إمداد أكثر مرونة وتنوعاً.

6. **تعاظم الدور الاستراتيجي للدول العربية:**

تمتلك الدول العربية، ولا سيما الأعضاء في أوابك، مقومات تنافسية تشمل الموارد الطبيعية والبنية التحتية والموقع الجغرافي، ما يؤهلها للعب دور محوري في اقتصاد الأمونيا منخفضة الكربون.

7. **إعادة تموضع صناعة الأمونيا ضمن الاقتصاد العالمي:**

تشير النتائج إلى أن صناعة الأمونيا تمر بمرحلة تحول نوعي، لتصبح منصة تكامل بين أمن الطاقة والأمن الغذائي والاستدامة البيئية، بما يعزز مكانتها كأحد أعمدة الاقتصاد منخفض الكربون.

التوصيات

1. **تبني مسار انتقالي مرن للإنتاج منخفض الكربون:**

التوسع في الأمونيا الزرقاء على المدى القريب كخيار عملي، بالتوازي مع وضع خارطة طريق واضحة للتحول التدريجي نحو الأمونيا الخضراء.

2. **مواءمة الاستراتيجيات مع المزايا النسبية للدول العربية:**

تعزيز التكامل الإقليمي بين الدول الغنية بالغاز وتلك ذات الإمكانات المتجددة، بما يحقق كفاءة أعلى في توزيع الاستثمارات وسلاسل القيمة.

3. **تسريع تطوير البنية التحتية وسلاسل الإمداد:**

الاستثمار في إنشاء موانئ ومراكز لوجستية متخصصة، وتطوير سلاسل قيمة متكاملة تدعم نقل وتخزين وتداول الأمونيا منخفضة الكربون.

4. **دعم إزالة الكربون من قطاع النقل البحري:**

تعزيز دور الموانئ العربية كمراكز لتموين السفن بالأمونيا، والمشاركة في مبادرات الممرات البحرية منخفضة الانبعاثات، وتشجيع الاستثمار في التقنيات المرتبطة.

5. **تعزيز الشراكات الإقليمية والدولية:**

تطوير مشروعات مشتركة، وتوحيد المعايير المرتبطة بالكربون، وتوسيع التعاون الدولي لضمان النفاذ إلى الأسواق العالمية.

6. **ربط سياسات الطاقة بالأمن الغذائي:**

تحسين كفاءة استخدام الأسمدة، وضمان استقرار الإمدادات، وتبني سياسات متكاملة تراعي الترابط بين أسواق الطاقة والغذاء.

7. **تهيئة بيئة تنظيمية واستثمارية داعمة:**

تطوير حوافز اقتصادية وآليات تسعير الكربون، وتحديث الأطر التنظيمية، وتعزيز دور القطاع الخاص، وتحسين الشفافية وتوافر البيانات.

The Role of Low-Emission Ammonia in Energy Transition and Sustainable Fertilizer Systems

Abstract and Executive Summary

Over the past decade, the global energy system has undergone profound structural transformations driven by climate change concerns, energy security challenges, and the growing need to transition toward more sustainable and lower-emission development pathways. Within this evolving landscape, ammonia has emerged as a strategic commodity linking the energy, industrial, and food sectors, redefining its traditional role beyond fertilizer production to become a key enabler of the low-carbon economy.

Ammonia is increasingly attracting global attention due to its versatility and potential contribution to decarbonization efforts. In addition to its central role in fertilizer production and food security, ammonia is gaining momentum as a promising alternative fuel for hard-to-abate sectors such as maritime transport and energy-intensive industries. It is also recognized as an efficient hydrogen carrier capable of facilitating large-scale storage and long-distance transportation of low-carbon energy across international supply chains.

Despite these opportunities, the future role of ammonia in the global energy transition remains closely linked to the decarbonization of its production pathways. Conventional ammonia production, primarily based on natural gas and coal, remains emissions intensive. As a result, the industry is gradually shifting toward lower-emission alternatives, particularly blue ammonia supported by carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technologies, and green ammonia produced using

renewable electricity and water electrolysis. While blue ammonia is widely viewed as a practical transitional pathway, green ammonia represents a long-term strategic solution aligned with global net-zero ambitions.

In this context, the member states of the Organization of Arab Petroleum Exporting Countries (OAPEC) are well positioned to play a strategic role in the emerging low-emission ammonia economy. Their competitive advantages include abundant natural gas resources, expanding renewable energy potential, established industrial infrastructure, strategic geographic proximity to major international demand centers, and extensive experience in global energy trade. These factors provide significant opportunities for OAPEC member states to strengthen their position across low-emission ammonia value chains, including production, export, bunkering, and downstream industrial applications.

The study finds that the global ammonia market remains strongly linked to fertilizers and food security, with agricultural applications continuing to account for most global demand despite the gradual expansion of emerging energy-related uses. The market is also characterized by substantial differences in production costs, emissions intensity, and regional competitiveness, reinforcing the importance of low-cost and resource-rich producers in shaping future trade dynamics.

The maritime sector represents one of the most promising emerging areas for ammonia utilization. Ammonia's carbon-free combustion profile and relatively established transport and storage infrastructure support its potential use as a marine fuel capable of contributing to the decarbonization of international shipping. However, large-scale deployment remains subject to several technical, economic, safety, and

regulatory challenges, including fuel costs, toxicity concerns, bunkering infrastructure requirements, and evolving international maritime regulations. In this regard, OAPEC member states possess favorable conditions to develop regional ammonia bunkering hubs and support future green shipping corridors.

Beyond its role as a fuel, ammonia is increasingly viewed as a strategic hydrogen carrier capable of connecting renewable energy production regions with major industrial demand centers through international low-carbon energy supply chains. This emerging role highlights the growing importance of integrated infrastructure development, particularly ports and export terminals that may evolve into multi-functional clean energy hubs combining hydrogen carrier handling, bunkering services, and industrial integration.

At the same time, ammonia remains fundamental to global food security through its central role in fertilizer production. Nevertheless, the sector continues to face important sustainability challenges related to nitrogen use efficiency, emissions, and environmental impacts associated with fertilizer consumption. Addressing these challenges will require balancing agricultural productivity objectives with environmental sustainability considerations through technological innovation, efficiency improvements, and more sustainable production and consumption patterns.

The study concludes that ammonia is expected to play an increasingly central role in reshaping global energy and industrial systems over the coming decades, acting as a critical link between energy security, industrial transformation, and food security in a low-carbon future. However, realizing this potential will depend on overcoming several

interconnected challenges, including high production costs, infrastructure investment requirements, technology deployment barriers, and evolving regulatory frameworks. Accelerating the transition toward a sustainable ammonia economy will therefore require stronger international cooperation, supportive policy frameworks, innovation, and long-term investment across the entire value chain.

OAPEC
Organization of Arab Petroleum Exporting Countries

Low-Emission Ammonia:
Enabling Energy Transition and Sustainable Fertilizer Systems

1 Strategic Role Across Sectors

Amid global energy transformations, ammonia is emerging as an integrated strategic element linking the energy, industrial, and agricultural sectors, becoming a cornerstone of the **low-carbon economy**.

2 Transition Toward Low-Carbon Pathways

The ammonia industry is gradually shifting from emissions-intensive production toward **low-carbon pathways**. **Blue ammonia** represents a practical transitional solution, while **green ammonia** is considered the long-term strategic pathway supported by expanding renewable energy potential.

3 Market Dynamics and Food Security

The global ammonia market remains closely linked to **fertilizers and food security**, with most production directed toward agriculture. Cost and emissions disparities reinforce the competitiveness of **low-cost producers**, particularly in OAPEC member states.

4 Maritime Decarbonization Potential

Ammonia is gaining traction as a promising marine fuel due to its **carbon-free combustion** and storage advantages. However, large-scale deployment remains constrained by cost, safety, infrastructure, and regulatory challenges.

5 Strategic Hydrogen Carrier

Ammonia acts as an efficient **hydrogen carrier**, enabling long-distance hydrogen transport across global supply chains. This highlights the need for integrated infrastructure, particularly **ports as future energy hubs**.

6 Fertilizers and Sustainability

While ammonia is essential for **food security**, improving nitrogen use efficiency and reducing environmental impacts require more **sustainable** production and responsible consumption practices.

7 Future Outlook

Ammonia is strongly positioned to become a strategic pillar in reshaping global energy and industrial systems over the coming decades. However, achieving this potential requires addressing critical challenges, including high costs, infrastructure development, and evolving regulatory frameworks, alongside stronger innovation and international cooperation to accelerate the transition toward a **low-carbon economy**.

KEY MESSAGES

Lower Emissions
Supporting cleaner energy systems.

Food Security
Supporting sustainable agriculture and nutrition.

Resource Efficiency
Optimizing the use of energy and natural resources.

Investment Opportunities
Creating new pathways for growth and innovation.

Global Cooperation
International cooperation to accelerate the transition.

INFRASTRUCTURE AND PORTS:
AN INTEGRATED BACKBONE FOR GLOBAL AMMONIA SUPPLY CHAINS

1. Low-Emission Ammonia Production (Blue / Green)

Produced using natural gas with carbon capture (**blue**) or renewable energy (**green**).

2. Storage and Liquefaction

Safe storage and liquefaction to -33°C for efficient transport.

3. Safe Maritime Transport

Specialized carriers ensure safe, efficient, and reliable global delivery.

4. Ports and Integrated Infrastructure

Receiving terminals, storage, bunkering, and integrated safety systems at ports.

5. Distribution and End-Use Applications

Delivered to diverse sectors supporting the low-carbon economy and food security.

Ammonia today for a sustainable tomorrow – Powering the transition, feeding the world.

منظمة الأقطار
العربية المصدرة
للبترول(أوابك)