

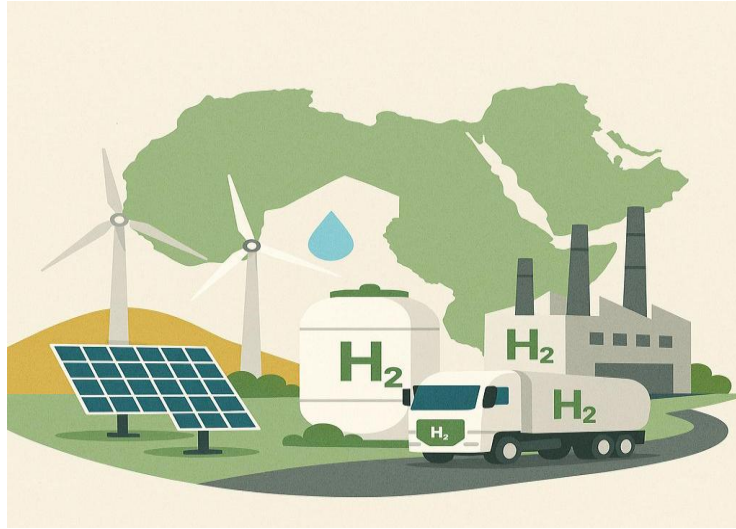


إعداد

الأكاديمية العربية للعلوم والتكنولوجيا والنقل البحري بالتعاون مع
إدارة النقل والسياحة بالأمانة العامة لجامعة الدول العربية

مقدم الي\ الإجتماع المشترك (24) للجان الفنية لنقل البري
والبحري ومتعدد الوسائط.

سلسلة الإمداد للهيدروجين الأخضر في الوطن
العربي: الواقع الحالي وسبل التكامل



سبتمبر 2025

الفهرس

4	الملخص التنفيذي
5	١. مقدمه
5	٢. تكنولوجيايات إنتاج الهيدروجين الأخضر
6	٢.١. الأثر المجتمعي والبيئي
8	٣. وصف سلاسل إمداد الهيدروجين الأخضر
9	٣.١. المخلات الأولية
10	٣.٢. الإنتاج
10	٣.٣. النقل
10	٣.٤. التخزين
10	٣.٥. التوزيع
11	٤. تقييم موارد المياه وإمكانات الطاقة المتجددة في المنطقة العربية
13	٤.١. تقنية التحلية بالتناضح العكسي واستخدامها في المنطقة العربية
13	٤.١.١. تحلية مياه البحر باستخدام التناضح العكسي ذو مبادل ضغط (Reverse Osmosis with Pressure exchanger)
13	٤.١.٢. أبرز مشاريع التحلية في المنطقة العربية
14	٤.١.٣. تكلفة مياه التحلية بالتناضح العكسي في الدول العربية
15	٤.٢. معالجة المياه وإعادة استخدامها
15	٤.٣. التقنيات وإمكانات الطاقة المتجددة
18	٤.٣.١. المشاريع الخاصة بالطاقة المتجددة في بعض الدول العربية
18	٤.٤. إمكانات سلسلة إمداد الهيدروجين الأخضر في المنطقة العربية مع تكامل التحلية والطاقة المتجددة
20	ه. تكنولوجيايات إنتاج الهيدروجين
20	٥.١. التحليل الكهربائي للماء
20	٥.١.١. المحلات الكهربائية القلوية (ALK)
21	٥.١.٢. المحلات الكهربائية بغشاء البوليمر الإلكتروليتي (PEM)
21	٥.١.٣. خلايا التحليل الكهربائي للأكسيد الصلب (SOECs)
21	٥.٢. الجدوى الاقتصادية
24	٦. نظم تخزين الهيدروجين
25	٦.١. أنظمة تخزين الهيدروجين المضغوط
25	٦.٢. النقل والتخزين تحت الأرض
28	٦.٢.١. أنظمة تخزين الهيدروجين المسال
28	٦.٢.٢. أنظمة تخزين الهيدروجين في الحالة الصلبة
29	٧. نظم نقل الهيدروجين
29	٧.١. خطوط أنابيب الهيدروجين
29	٧.٢. مشروع SouthH2 Corridor لتعزيز أهداف الطاقة في الاتحاد الأوروبي
31	٧.٣. نقل الهيدروجين المسال
31	٧.٤. التكلفة الاقتصادية لنقل الهيدروجين
32	٧.٤.١. خيارات نقل الهيدروجين البري
32	٧.٤.٢. خيارات نقل الهيدروجين البحري
35	٨. صناعة الأمونيا الخضراء
41	١٠.١.١. تحليل السوق وتوقعات الطلب
41	١٠.١.٢. تقدير الإيرادات بناءً على الحصة السوقية
41	١٠.٢. استراتيجيات التسعير

41	١٠.٣. مصادر التمويل للمشاريع.....
42	١١. التحليل التنافسي.....
43	١١.١ استراتيجيات اختراق السوق.....
43	١١.١.١ تطوير البنية التحتية، عقد شراكات وتحالفات دولية.....
44	١١.١.٢ استراتيجيات التسعير المبدئية.....
44	١١.١.٣ تحليل تكاليف الإنتاج.....
44	١١.١.٤ تكلفه النقل والتخزين.....
44	١١.١.٥ استراتيجيات التسعير المعتمدة على السوق.....
45	١٢. تقدير الإيرادات بناءً على الحصة السوقية.....
45	١٢.١ تقدير الإيرادات.....
45	١٣. الإطار المالي لمشروعات الهيدروجين الأخضر.....
45	١٣.١ التكاليف والتدفقات النقدية الخارجة.....
45	١٣.١.١ منشآت الإنتاج، التحليل الكهربائي، الطاقة المتجددة، إمداد وتنقية المياه.....
46	١٣.١.٢ منشآت التخزين، تقنيات التخزين، وتوزيع البنية التحتية والتصدير.....
46	١٣.٢ التمويل.....
46	١٣.٢.١ المنح والإعانات الحكومية.....
47	١٣.٢.٢ رأس المال المؤسسي ورأس مال الشركات.....
47	١٣.٢.٣ الدعم الدولي: البنوك متعددة الأطراف وصناديق المناخ العالمية.....
47	١٤. التوصيات الاستراتيجية المصنفة حول الهيدروجين الأخضر في المنطقة العربية.....
47	١٤.١ التعاون الإقليمي والاستراتيجي.....
48	١٤.٢ السياسات والتنظيم والتمويل.....
48	١٤.٣ التكنولوجيا والابتكار.....
48	١٤.٤ البنية التحتية.....
49	١٤.٥ الاستدامة والبيئة.....
49	١٤.٦ تطوير السوق والاندماج الصناعي.....
49	١٤.٧ بناء القدرات ورأس المال البشري.....
50	١٤.٨ مسارات الربط الإقليمي والدولي.....
50	١٤.٩ بناء القدرات والتسويق.....
50	١٥. المراجع.....

الجدول

6	جدول 1 الخصائص الفيزيائية للهيدروجين.....
11	جدول 2: أطوال السواحل البحرية لكل دولة عربية.....
13	جدول 3 : أبرز مشاريع التحلية في المنطقة العربية.....
14	جدول 4: اسعر المياه المحلاة بتقنية (RO) في عدد من الدول العربية.....
16	جدول 5: متوسط الاشعاع الشمسي وسرعات الرياح للدول العربية.....
18	جدول 6: المشاريع الخاصة بالطاقة المتجددة في بعض الدول العربية.....
19	جدول 7 : أهم المواقع المقترحة لإنتاج الهيدروجين الأخضر في المنطقة العربية.....

الإشكال

- شكل 1: المركبة للمحلل الكهربائي حسب التكنولوجيا والمنطقة، 2020-2024، والقدرة حسب المنطقة وحجم المصنع والحالة بناءً على المشاريع المعلنة، 2030.. 7
- شكل 2: سعة التحليل الكهربائي التي وصلت إلى قرار الاستثمار النهائي حسب المنطق والقطاع بين سبتمبر (2023) وأغسطس (2024) حسب (FID) () 8
- شكل 3: لتوضيح سلاسل إمداد الهيدروجين الأخضر..... 9
- شكل 4: نموذج وحدة تحليلية بمبادل ضغط بمعدل إنتاج 3.2 م³/س..... 13
- شكل 5: أطلال الطاقة الشمسية..... 17
- شكل 6: أطلال سرعات الرياح..... 17
- شكل 7: محلل كهربائي قلوي..... 21
- شكل 8: يوضح انخفاض التكلفة المتكافئة للكهرباء (LCOE) لمصادر الطاقة المتجددة خلال (2010-2024)..... 23
- شكل 9: موضح سعر إنتاج الهيدروجين بناءً على الطاقة الشمسية..... 23
- شكل 10: متوسط سعر إنتاج الهيدروجين بناءً على طاقة الرياح OFF SHORE..... 24
- شكل 11: نقل وتخزين الهيدروجين..... 24
- شكل 12: كثافة الطاقة مقابل محتوى الهيدروجين الحجمي..... 25
- شكل 13: خزان الهيدروجين: (أ) خزان كروي، (ب) خزانات رأسية وأفقية، (ج) أسطوانات معدنية (د) أسطوانات مصنوعة من مواد مركبة..... 27
- شكل 14: نظم تخزين الهيدروجين لتكلفه LVHC..... 27
- شكل 15: نظم تخزين الهيدروجين لتكلفه LVHC..... 28
- شكل 16: مسار نقل الهيدروجين..... 30
- شكل 17: مقارنة خطوط أنابيب نقل جديدة وإعادة استخدام خطوط سابقة..... 31
- شكل 18: خيارات النقل البحري للهيدروجين..... 32
- شكل 19: ناقلات الهيدروجين..... 33
- شكل 20: يوضح متوسط تكاليف الاستثمار المقدر لخطوط أنابيب الهيدروجين (يورو/ميغا واط | كم HVDC)..... 34
- شكل 21: مقارنة لتكاليف نقل الهيدروجين..... 35
- شكل 22: مخطط لمصنع إنتاج أمونيا خضراء بسعة 2000 طن/سنة أو 20000 طن/سنة..... 36
- شكل 23: توقعات الطلب المستقبلي على الهيدروجين ومشتقاته..... 38
- شكل 24: تقسيم سوق الهيدروجين الأخضر وتحليله على المستوى الإقليمي..... 40

الملخص التنفيذي

في ضوء التكاليف الصادرة عن مجلس وزراء النقل العرب بشأن إعداد دراسة متكاملة حول تأسيس سلسلة إمداد للهيدروجين الأخضر، وبالتنسيق مع الأكاديمية العربية للعلوم والتكنولوجيا والنقل البحري، والأمانة العامة لجامعة الدول العربية، وبدعم من وزارة النقل بجمهورية مصر العربية والدول العربية الراغبة، يهدف المشروع إلى وضع تصور استراتيجي شامل لتعزيز مكانة المنطقة العربية كلاعب رئيسي في الاقتصاد العالمي للهيدروجين الأخضر، وذلك استنادًا إلى توصيات الدورة العادية (٣٧) لمجلس وزراء النقل العرب المنعقدة في الإسكندرية بتاريخ ١٣ نوفمبر ٢٠٢٤.

يأتي هذا المشروع في إطار رؤية عربية مشتركة تسعى إلى الاستفادة من المزايا التنافسية للدول العربية، بما في ذلك الموارد الطبيعية الهائلة (الطاقة الشمسية، طاقة الرياح، والمياه المحلاة) والبنية التحتية اللوجستية (الموانئ، خطوط الأنابيب، ومراكز الطاقة)، إضافة إلى الموقع الجغرافي الاستراتيجي الذي يربط القارات الثلاث: آسيا، إفريقيا، وأوروبا.

الأهداف الاستراتيجية للمشروع:

- صياغة رؤية عربية موحدة لتأسيس سلسلة إمداد متكاملة للهيدروجين الأخضر.
- تقييم البنية التحتية الحالية في الدول العربية وإمكانيات تطويرها لإنتاج وتخزين ونقل الهيدروجين.
- دراسة إمكانية الاستفادة من خطوط الغاز الطبيعي القائمة لنقل الهيدروجين أو إعادة تأهيلها لخفض التكاليف.
- تحليل مسارات الربط الإقليمي بين الدول العربية ومسارات التصدير الدولية نحو الأسواق الأوروبية والآسيوية والأمريكية.
- وضع خريطة طريق لتأسيس ممرات خضراء عربية-دولية عبر الموانئ الرئيسية.
- بناء أطر تنظيمية وتشريعية موحدة تشمل معايير السلامة والجودة وشهادات المنشأ.
- تحفيز الاستثمار من خلال شراكات عربية-أوروبية-آسيوية وتفعيل آليات التمويل المدمج.
- إدماج البعد البيئي والاستدامة عبر الاعتماد على التحلية بالطاقة المتجددة وتطبيق الاقتصاد الدائري.
- تطوير برامج لبناء القدرات البشرية وإنشاء مراكز تدريب وبحث إقليمية متخصصة في تكنولوجيا الهيدروجين.

المخرجات المتوقعة:

- خارطة طريق استراتيجية تحدد أولويات التنفيذ (قصير، متوسط، طويل الأمد).
- نماذج اقتصادية ولوجستية توضح الجدوى المالية وخيارات البنية التحتية.
- توصيات عملية حول مسارات الإمداد الإقليمية والدولية.
- إنشاء آلية دائمة للتنسيق العربي في مجال الهيدروجين الأخضر، بما في ذلك مجلس اقتصادي عربي للهيدروجين.
- تعزيز مكانة الدول العربية كمصدر رئيسي للهيدروجين الأخضر للأسواق العالمية، بما يسهم في تحقيق أهداف التنمية المستدامة وأمن الطاقة العالمي.

يمثل هذا المشروع خطوة استراتيجية نحو بناء سلسلة إمداد عربية متكاملة للهيدروجين الأخضر، تعكس تكامل الموارد والإمكانات المشتركة للدول العربية، وتفتح آفاقًا جديدة للتعاون الدولي، بما يعزز من الدور الريادي للمنطقة في التحول الطاقوي العالمي

١. مقدمة

تم إعداد هذه الدراسة استجابةً لقرار مجلس وزراء النقل العرب في دورته العادية (37) بتاريخ 13 نوفمبر 2024، والذي كلف الأكاديمية العربية للعلوم والتكنولوجيا والنقل البحري، بالتعاون مع الاتحاد الأوروبي والأمانة العامة لجامعة الدول العربية ووزارة النقل بجمهورية مصر العربية، بإعداد دراسة متكاملة حول مشروع تأسيس سلسلة إمداد للهيدروجين الأخضر.

يهدف هذا المشروع إلى تأسيس سلسلة إمداد متكاملة للهيدروجين الأخضر في المنطقة العربية، باعتباره أحد الحلول الواعدة لتحقيق التحول نحو الطاقة النظيفة وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري. كما يركز على استعراض أحدث تكنولوجيات إنتاج الهيدروجين الأخضر، مع إبراز الأثر المجتمعي والبيئي المصاحب لتبني هذه التقنيات، بما يعزز التنمية المستدامة في الدول العربية.

كما يهدف التقرير أيضاً إلى تقديم تحليل شامل لمختلف جوانب سلسلة الإمداد، وتقييم الإمكانيات المتاحة في المنطقة العربية، وتحديد التحديات والفرص، ووضع إطار استراتيجي لتصبح المنطقة لاعباً محورياً في سوق الهيدروجين الأخضر العالمي.

ويتناول التقرير عدة محاور رئيسية تشمل:

- وصف سلاسل إمداد الهيدروجين الأخضر بمختلف مكوناتها.
 - تقييم موارد المياه وإمكانات الطاقة المتجددة المتاحة في المنطقة العربية.
 - تكنولوجيا إنتاج الهيدروجين وأساليب تطويرها لتحقيق الكفاءة والجدوى الاقتصادية.
 - نظم تخزين ونقل الهيدروجين بما يضمن الأمان والفعالية التشغيلية.
 - صناعة الأمونيا الخضراء باعتبارها أحد الاستخدامات الاستراتيجية للهيدروجين.
 - الفرص والتحديات التي تواجه المنطقة العربية في مسارها نحو بناء اقتصاد الهيدروجين الأخضر.
- وبذلك، يسعى المشروع إلى وضع رؤية متكاملة تساهم في تعزيز موقع المنطقة العربية كلاعب رئيسي في سوق الطاقة العالمي، من خلال الاستثمار في البنية التحتية المستدامة للهيدروجين الأخضر.

٢. تكنولوجيات إنتاج الهيدروجين الأخضر

يشهد العالم تحولاً جذرياً في أنظمة الطاقة، مدفوعاً بضغوط بيئية واقتصادية تهدف إلى تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري. في هذا السياق، يبرز الهيدروجين الأخضر كأحد أبرز الحلول الواعدة لتحقيق اقتصاد منخفض الكربون وأكثر استدامة.

يتميز الهيدروجين بخصائص فريدة تجعله مصدراً متعدد الاستخدامات للطاقة؛ فهو يحتوي على أعلى محتوى طاقة لكل وحدة كتلة مقارنة بالغاز الطبيعي أو البنزين، مما يجعله خياراً مثالياً لقطاعات النقل والصناعة وتوليد الكهرباء. ومع ذلك، يقابل هذه الميزة تحدٍ رئيسي يتمثل في انخفاض كثافة الطاقة لكل وحدة حجم، الأمر الذي يتطلب تطوير حلول مبتكرة للتخزين والنقل.

يتم إنتاج الهيدروجين الأخضر عبر التحليل الكهربائي للماء باستخدام كهرباء مولدة من مصادر متجددة، مما يجعله وقوداً شبه خالٍ من الانبعاثات الكربونية، على عكس الهيدروجين الرمادي أو الأزرق المشتقين من الوقود الأحفوري. وبذلك، لا يمثل الهيدروجين الأخضر مجرد بديل للطاقة، بل أداة استراتيجية لتحقيق أهداف المناخ العالمية ودعم التحول نحو اقتصاد مستدام.

تمتلك المنطقة العربية، بفضل مواردها الهائلة من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، موقعاً استراتيجياً يؤهلها لتصبح مركزاً عالمياً لإنتاج وتصدير هذا الوقود النظيف.

٢.١. الأثر المجتمعي والبيئي

أصبح الهيدروجين الأخضر اليوم محور اهتمام عالمي باعتباره وقود المستقبل، لما يتميز به من قدرة على تقليل الانبعاثات الكربونية ودعم التحول نحو اقتصاد منخفض الكربون. فهو يمثل ركيزة أساسية لتحقيق أهداف الاستدامة وتوفير مصدر طاقة نظيف يمكن أن يسهم في خفض الاعتماد على الوقود الأحفوري، وبالتالي تعزيز مرونة سلاسل الإمداد العالمية في قطاع الطاقة.

يحتوي الهيدروجين على طاقة أكبر لكل وحدة كتلة مقارنةً بالغاز الطبيعي أو البنزين، مما يجعله وقوداً مناسباً للنقل كما هو موضح في الجدول (1). ومع ذلك، يُعد الهيدروجين أخف العناصر، وبالتالي يتميز بكثافة طاقة منخفضة لكل وحدة حجم. يمكن ضغط الهيدروجين أو تسيله أو تحويله إلى وقود قائم على الهيدروجين ذو كثافة طاقة أعلى ولكن ذلك يحتاج أيضاً إلى طاقة.

جدول 1 الخصائص الفيزيائية

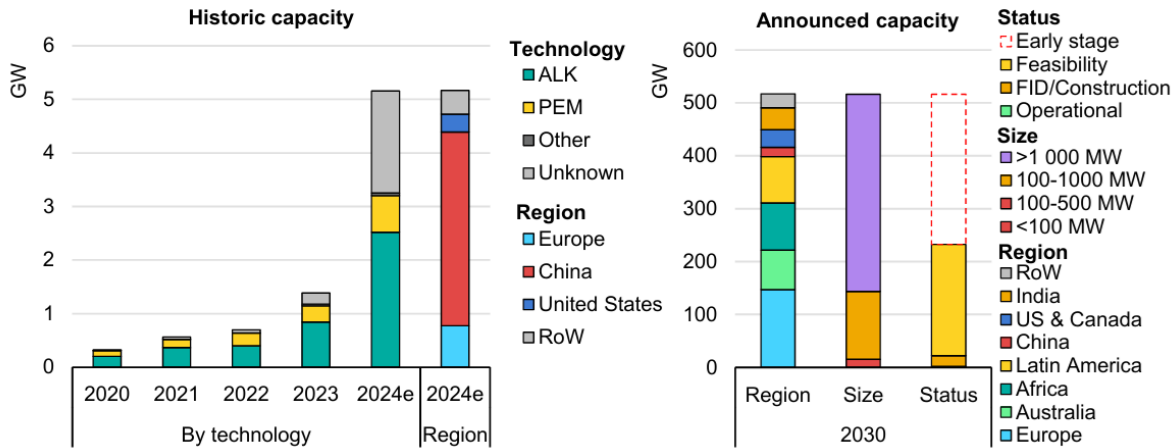
Property	Hydrogen	Comparison
Density (gaseous)	0.089 kg/m ³ (0°C, 1 bar)	1/10 of natural gas
Density (liquid)	70.79 kg/m ³ (-253°C, 1 bar)	1/6 of natural gas
Boiling point	-252.76°C (1 bar)	90°C below LNG
Energy per unit of mass (LHV)	120.1 MJ/kg	3x that of gasoline
Energy density (ambient cond., LHV)	0.01 MJ/L	1/3 of natural gas
Specific energy (liquefied, LHV)	8.5 MJ/L	1/3 of LNG
Flame velocity	346 cm/s	8x methane
Ignition range	4-77% in air by volume	6x wider than methane
Autoignition temperature	585°C	220°C for gasoline
Ignition energy	0.02 MJ	1/10 of methane

يُنتج الهيدروجين الأخضر من خلال التحليل الكهربائي للماء باستخدام مصادر الطاقة المتجددة، مما يجعله ذو بصمة كربونية شبه منعدمة، على عكس الهيدروجين التقليدي المشتق من الوقود الأحفوري مثل إصلاح الميثان بالبخار، والذي يظل مساهماً في الانبعاثات البيئية حتى مع تطبيق تقنيات احتجاز الكربون وتخزينه.

تتعاضد الفرص البيئية والاقتصادية لإنتاج الهيدروجين الأخضر بالدول العربية بفضل توافر موارد الطاقات المتجددة وخصوصاً الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، ما يجعل المنطقة في موقع استراتيجي مؤهل لتصبح مركزاً عالمياً لإنتاج وتصدير هذا الوقود النظيف. غير أن العملية تظل كثيفة الاستهلاك للمياه، وهو ما يمثل تحدياً في ظل ندرة الموارد المائية العذبة لكن تميز الدول العربية بمطلات على بحار ومحيطات وامتلاكها للخبرات الفنية في مجالات تحليلية ومعالجة المياه المالحة يوفر خيار مستدام لإنتاج الهيدروجين.

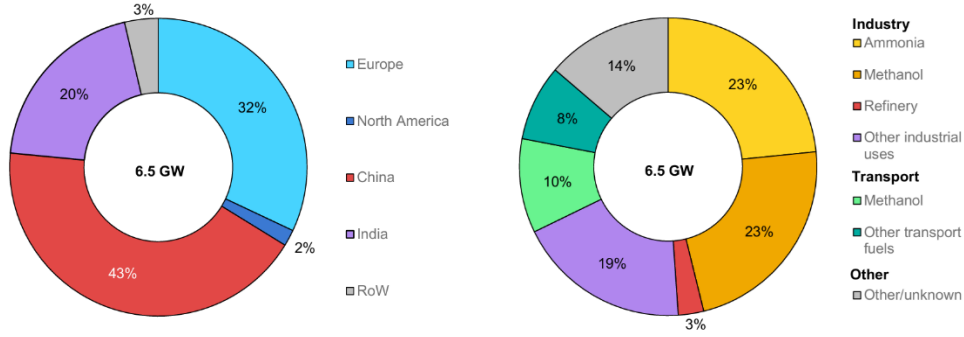
وبناء على الإعلانات الصادرة خلال سنة 2024، يمكن الوصول إلى طاقة تحلل الماء بالكهرباء تبلغ 230 جيجاواط بحلول عام 2030، وما يقارب 520 جيجا واط إذا أخذ في الاعتبار أيضاً المشاريع في مراحلها الأولى من التطوير كما هو موضح بشكل (1). والجدير بالذكر أن المناطق ذات موارد الطاقة المتجددة الوفيرة، ومنها الدول العربية، قد تحظى بنسبة كبيرة من الطاقة المركّبة. وبالنظر في كامل مسار المشاريع يُعطي مؤشراً واضحاً على النمو المُحتمل في مصانع التحليل الكهربائي عالمياً، وبالتالي فإن التركيز على المشاريع المُلتزم بها يُوفر نظرة أوضح على مسار تقدم المشاريع، وفي أي القطاعات، وبأي وتيرة. ففي خلال الفترة من سبتمبر 2023 إلى أغسطس 2025، وصلت حوالي 6.5 جيجاوات من مشاريع التحليل الكهربائي إلى مرحلة الاستثمار النهائي (FID - Final Investment Decision). وتُخصص غالبية الطاقة الإنتاجية المُعلنة التي خضعت لعملية الاستثمار النهائي لاستخدام الهيدروجين في التطبيقات الصناعية ووقود النقل، كما هو موضح في شكل (2). ويستهدف نصف هذه الطاقة الإنتاجية، 3.2 جيجاواط، القطاعات التي تستخدم الهيدروجين بالفعل اليوم، وهي إنتاج الأمونيا، وإنتاج الميثانول، وقطاع التكرير.

شكل 1: المركبة للمحلل الكهربائي حسب التكنولوجيا والمنطقة، 2024-2020، والقدرة حسب المنطقة وحجم المصنع والحالة بناءً على المشاريع المُعلنة، 2030



(Source: IEA Report, 2024)

شكل 2: سعة التحليل الكهربائي التي وصلت إلى قرار الاستثمار النهائي حسب المنطق والقطاع بين سبتمبر (2023) وأغسطس (2024) (حسب FID)



(Source: IEA Report, 2019)

كما أن تبني تقنيات متقدمة مثل المحلات الكهربائية عالية الكفاءة وأنظمة استعادة الحرارة المهدرة من شأنه أن يحد من الأثر البيئي لعمليات الإنتاج. وفي المقابل، لكن ينبغي إدارة التوسع في البنية التحتية للطاقة المتجددة بحذر لتفادي آثار جانبية محتملة مثل تدهور المواطن الطبيعية أو تضارب استخدامات الأراضي. إضافة إلى ذلك، فإن إنتاج ونقل وتخزين الهيدروجين يطرحان تحديات بيئية مهمة، أبرزها

- احتمالية التسريب من خطوط الأنابيب أو أثناء النقل البحري، مما يستلزم أطراً تنظيمية صارمة وتقنيات مراقبة متطورة.
- هشاشة المواد (Hydrogen Embrittlement) نتيجة تفاعل الهيدروجين مع المعادن في الأنابيب والخزانات.
- فقدان الكفاءة بسبب متطلبات الضغط والتبريد عند النقل أو التخزين.
- انخفاض كثافة الطاقة الحجمية، مما يتطلب خزانات ضخمة أو ضغط عالي.
- مخاطر السلامة بسبب سرعة اشتعال الهيدروجين حتى عند تركيزات منخفضة.
- عدم جاهزية البنية التحتية الحالية لشبكات الغاز لنقل الهيدروجين.
- تكاليف رأسمال المال والتشغيل العالية في أنظمة الضغط والتبريد والمراقبة.
- احتمالية التسرب أو فقدان الغاز (Boil-off) أثناء التخزين والنقل.
- التأثيرات البيئية غير المباشرة الناتجة عن تصنيع مواد العزل أو إنتاج الهيدروجين من مصادر غير متجددة.

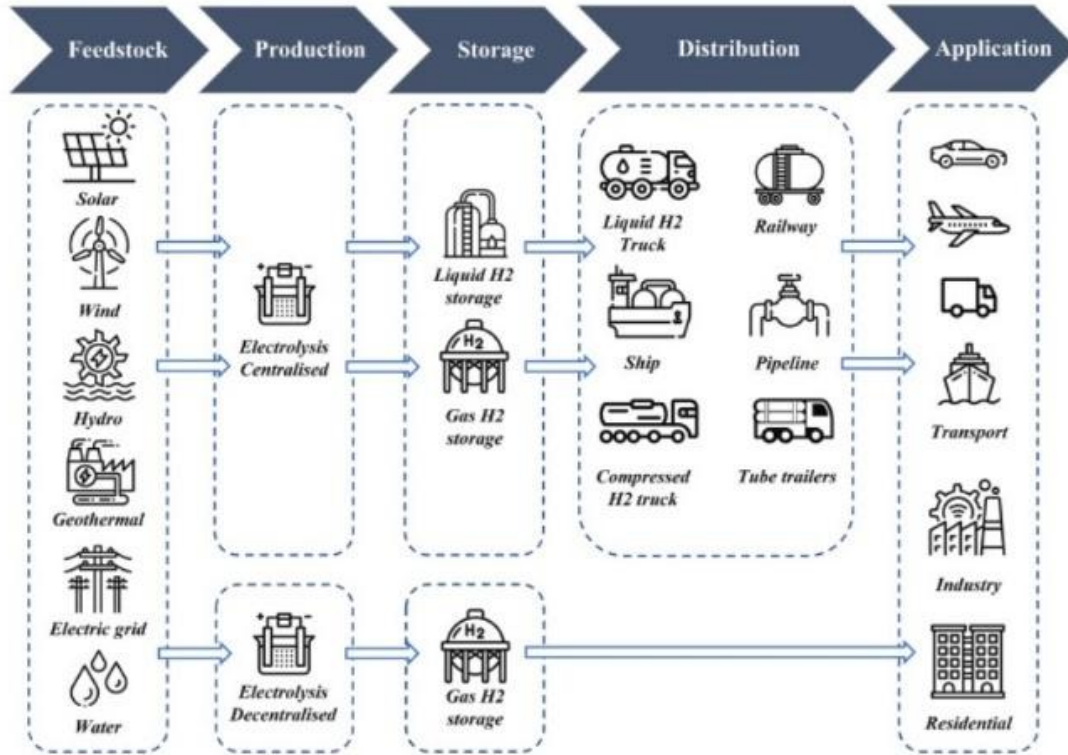
ومن هنا يتضح أن الدول العربية أمام فرصة ذهبية لتبني الهيدروجين الأخضر ضمن سلاسل الإمداد المستدامة، شريطة الموازنة بين الاستفادة من الفرص والتغلب على هذه التحديات.

٣. وصف سلاسل إمداد الهيدروجين الأخضر

تعرف سلسلة الإمداد للهيدروجين الأخضر بأنها الشبكة المترابطة من العمليات والبنى التحتية التي تتيح إنتاج الهيدروجين ونقله وتخزينه وتوزيعه وصولاً إلى المستهلك النهائي. هذه السلسلة ليست مجرد خطوات منفصلة، بل هي منظومة متكاملة يتوقف نجاحها على الترابط والانسجام بين مختلف حلقاتها.

وبما أن الهيدروجين يعد وقودًا ذو خصائص مميزة، فإن تصميم سلسلة إمداده يتطلب حلولًا مبتكرة تتجاوز الأساليب التقليدية المعتمدة في نقل وتوزيع الوقود الأحفوري. وتشمل السلسلة خمس حلقات رئيسية: (المدخلات الأولية، الإنتاج، النقل، التخزين، والتوزيع) كما موضح بشكل (3).

شكل 3: لتوضيح سلاسل إمداد الهيدروجين الأخضر



(Source: Sgarbossa, Arena, Tang, & Peron, 2023)

٣.١. المدخلات الأولية

• المياه

إنتاج 1 كيلوجرام من الهيدروجين يتطلب ما يقارب 9 لترات من المياه النقية، بالإضافة إلى (15-16) لترًا من المياه لأغراض التبريد. وبذلك فإن إنتاج طن واحد من الهيدروجين يستهلك ما يقارب 9,000 لتر، وهو ما يعادل الاستهلاك اليومي لنحو 50 شخصًا.

نظرًا لشح المياه العذبة في المنطقة العربية، تُعتمد تقنيات تحلية مياه البحر (خاصة التناضح العكسي) كمصدر رئيسي، مع مراعاة معالجة تحديات تصريف المحلول الملحي الناتج.

• الطاقة المتجددة

يعد توفر طاقة كهربائية متجددة ومنخفضة التكلفة شرطًا أساسيًا، كما تتميز المنطقة العربية بموارد هائلة من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، بالإضافة إلى إمكانات الطاقة الكهرومائية والحرارية الجوفية.

٣.٢. الإنتاج

الهيدروجين لا يوجد بكثرة كغاز حر على الأرض، بل يجب إنتاجه. حيث توجد طرق مختلفة للإنتاج أكثرها شيوعاً هما:

- **تحويل الميثان بالبخار (Steam-Methane Reforming):** باستخدام الغاز الطبيعي.
- **التحليل الكهربائي:** الذي يستخدم الكهرباء لتحليل الماء واستخراج عنصر غاز الهيدروجين.

وتؤثر طريقة الإنتاج مباشرة على قيمة البصمة الكربونية للهيدروجين المنتج حيث يعتبر الهيدروجين الأخضر المنتج عبر التحليل الكهربائي المدعوم بالطاقة المتجددة، المسار الأكثر استدامة، ويتماشى مع أهداف خفض الكربون العالمية. إلا أن الطرق الأخرى، والتي غالباً ما يطلق على المنتج منها اسم الهيدروجين الرمادي أو الأزرق، تحمل آثاراً بيئية مختلفة. لذا، فإن استدامة الهيدروجين تعتمد بشكل كبير على مسار إنتاجه.

٣.٣. النقل

يمثل نقل الهيدروجين تحدياً رئيسياً بسبب خصائصه الفيزيائية (**انخفاض الكثافة، سهولة التسرب**). وتوجد عدة خيارات:

- **الأنابيب:** الأكثر كفاءة لنقل كميات كبيرة لمسافات متوسطة.
- **الشاحنات والصهاريج:** مناسبة لمسافات قصيرة أو كميات محدودة.
- **النقل البحري:** يستخدم للهيدروجين المسال أو الأمونيا أو الناقلات العضوية (LOHCs)، وهو الخيار الأكثر جدوى للتصدير لمسافات طويلة.

٣.٤. التخزين

التخزين هو حلقة حيوية أخرى في سلسلة الإمداد. تتطلب الكثافة المنخفضة للهيدروجين إما ضغطه أو تسويله لتخزينه بكفاءة. ويصنف الهيدروجين كعنصر يمكن تخزينه لفترات طويلة الأمد. ويعتبر التخزين تحت الأرض في الكهوف الملحية أو حقول الغاز المستنفدة خياراً واعداً للتخزين على نطاق واسع وفترات طويلة.

تشمل حلول التخزين على نطاق أصغر أسطوانات الغاز المضغوط وخزانات الهيدروجين السائل. وتختلف متطلبات التخزين بشكل كبير حسب التطبيق، بدءاً من تخزين الطاقة على مستوى الشبكة إلى التخزين في المركبات.

٣.٥. التوزيع

يركز التوزيع على إيصال الهيدروجين إلى نقطة الاستخدام النهائية. يمكن أن يشمل ذلك خطوط أنابيب للمجمعات الصناعية أو محطات تعبئة الهيدروجين لمركبات خلايا الوقود، أو إنتاج الطاقة الكهربائية من خلايا الوقود، أو شبكات التوزيع للتدفئة السكنية أو التجارية. إن توضيح شبكات التوزيع الفعالة أمر بالغ الأهمية لتبني الهيدروجين على نطاق واسع، ويتطلب تخطيطاً دقيقاً ونشراً للبنية التحتية. سيشكل تخصيص مسارات الهيدروجين للقطاعات المختلفة (الطاقة، النقل، الصناعة، القطاع السكني) بنية شبكة التوزيع.

٤. تقييم موارد المياه وإمكانات الطاقة المتجددة في المنطقة العربية

تتمتع المنطقة العربية بسواحل واسعة وإطلالات على عدة بحار ومحيطات كبرى، مما يوفر إمداداً ضخماً ومستداماً من مياه البحر الصالحة للتحلية. يبين جدول (2) أطوال السواحل البحرية لكل دولة عربية وتمتلك الدول العربية مجتمعة أكثر من 23,000 كيلومتر من السواحل موزعة على أربع نطاقات بحرية رئيسية:

- **الخليج العربي:** يبلغ طول الساحل العربي المطل على الخليج العربي نحو 3.5 ألف كم، ويطل عليه من السعودية، الإمارات، قطر، البحرين، الكويت، العراق، وسلطنة عُمان. ويُعد أكثر المسطحات المائية في العالم اعتماداً على التحلية، إذ يضم عشرات محطات التحلية العملاقة باستخدام تقنيات الأغشية والتقنيات الحرارية.
- **البحر الأحمر:** يمتد الساحل لمسافة تقارب 2,250 كم، ويطل عليه كل من مصر، السودان، جيبوتي، السعودية، والأردن واليمن. وتوجد على سواحل العديد من محطات تحلية ذات ساعات متوسطة وكبيرة لأغراض الشرب والصناعة والزراعة بمختلف البلدان مما يعكس أهميته الاستراتيجية.
- **البحر الأبيض المتوسط:** يبلغ طول الساحل العربي نحو 46 ألف كم، وتشمل السواحل العربية المطلة عليه كلاً من المغرب، الجزائر، تونس، ليبيا، مصر، وفلسطين، ولبنان، وسوريا. تنتشر على سواحل العديد من محطات التحلية متوسطة وكبيرة الحجم التي تزود مراكز حضرية كالإسكندرية وطرابلس والجزائر العاصمة وتونس.
- **بحر العرب والمحيط الهندي:** يبلغ طول الساحل العربي نحو 23 ألف كم، وتشمل السواحل العربية المطلة عليه كلاً من عُمان واليمن والصومال وجزر القمر وموريتانيا. وقد استثمرت عُمان بشكل خاص هذا الامتداد الساحلي لإقامة مشروعات تحلية كبرى.

جدول 2: أطوال السواحل البحرية لكل دولة عربية

الدولة	المسطح المائي	طول الساحل (كم)
الجزائر	البحر الأبيض المتوسط	~998
البحرين	الخليج العربي	~161
جزر القمر	المحيط الهندي	~340
جيبوتي	خليج عدن، البحر الأحمر	~314
مصر	البحر الأحمر، البحر المتوسط	البحر الأحمر: ~1,941 البحر الأبيض: ~995
العراق	الخليج العربي	~58
الأردن	البحر الأحمر	~24
الكويت	الخليج العربي	~400-415
لبنان	البحر المتوسط	~225
ليبيا	البحر المتوسط	~1,770

754~	المحيط الأطلسي	موريتانيا
- الأطلسي: 3,000 - المتوسط: ~500	المحيط الأطلسي، البحر المتوسط	المغرب
3,165~	بحر العرب، خليج عُمان، الخليج العربي	عُمان
42~	البحر المتوسط	فلسطين
563~	الخليج العربي	قطر
- البحر الأحمر: ~1,760 - الخليج العربي: ~560	البحر الأحمر، الخليج العربي	السعودية
3,333~	- بحر العرب، المحيط الهندي، خليج عدن	الصومال
853~	البحر الأحمر	السودان
193~	البحر المتوسط	سوريا
1,148~	البحر المتوسط	تونس
1,318~	الخليج العربي، خليج عُمان	الإمارات
1,906~	بحر العرب، خليج عدن، البحر الأحمر	اليمن

إن تطوير سلسلة إمداد تنافسية للهيدروجين الأخضر في المنطقة العربية يعتمد على عاملين رئيسيين: تقنيات موارد المياه وأنظمة الطاقة المتجددة. عملية التحليل الكهربائي تتطلب إمداداً موثقاً من المياه عالية النقاء إضافة إلى كهرباء منخفضة التكلفة ومنخفضة الانبعاثات الكربونية. ورغم ندرة المياه العذبة في المنطقة، إلا أن العالم العربي يتصدر العالم في قدرات تحلية مياه البحر، مع استثمارات متزايدة في معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها لتأمين مصادر مياه غير تقليدية.

تشمل تقنيات التحلية في المنطقة التقطير الومضي متعدد المراحل (MSF)، والتقطير متعدد التأثير (MED)، والتحلية بالأغشية باستخدام التناضح العكسي (RO). ورغم أن MSF وMED هيمنت تاريخياً في الخليج، إلا أن تقنية RO برزت كالأكثر كفاءة في استهلاك الطاقة والأوسع انتشاراً، إذ تستهلك حوالي (2.5 , 4.0) كيلوواط ساعة لكل متر مكعب مقارنةً بأكثر من 10 كيلوواط ساعة/م³ في MSF. ولذلك، فإن معظم المحطات الجديدة واسعة النطاق في المنطقة العربية تُصمَّم اليوم باستخدام تقنية RO أو الهجينة.

ولأغراض إنتاج الهيدروجين، تُخضع مياه RO لمزيد من المعالجة باستخدام التبادل الأيوني أو نزع الأيونات بالتيار الكهربائي (EDI) للوصول إلى مقاومة لا تقل عن 1 ميجا أوم-سم، وملوحة لا تزيد عن 2 جزء في المليون ومستويات منخفضة جداً من الكربون العضوي الكلي (TOC)، وهو ما يضمن التشغيل الآمن للمحطات الكهربائية.

٤.١. تقنية التحلية بالتناضح العكسي واستخدامها في المنطقة العربية

تقوم تقنية التحلية بالتناضح العكسي (RO) على دفع مياه البحر عبر أغشية شبه منفذة تحت ضغط عالٍ، حيث يتم حجز الأملاح والشوائب وإنتاج مياه عذبة صالحة للشرب أو للاستخدام الصناعي، بالإضافة إلى محلول ملحي مركز كناتج ثانوي. وتتطلب هذه التقنية معالجة أولية للمياه المغذية، ومضخات عالية الضغط، وتوفر طاقة كهربائية كافية، فضلاً عن صيانة الأغشية بشكل دوري.

تُظهر محطات التناضح العكسي في الخليج العربي استهلاكاً للطاقة الكهربائية يتراوح بين (2.9, 3.6) كيلوواط/س/متر مكعب، وهو أقل بكثير من محطات التحلية التقليدية المعتمدة على MSF أو MED، مما يدعم التحول المتسارع نحو اعتماد RO كتقنية أساسية في المشاريع الجديدة. وتتمتع الدول العربية بميزة استراتيجية نتيجة امتداد سواحلها التي توفر مصدراً غزيراً للمياه المالحة القابلة للتحلية.

٤.١.١. تحلية مياه البحر باستخدام التناضح العكسي ذو مبادل ضغط (Reverse Osmosis with Pressure exchanger)

وتتميز وحدات التناضح العكسي التي تستخدم مبادل ضغط (Pressure exchanger) لاسترداد الطاقة واستخدامها في رفع ضغط مياه البحر بمعدلات استهلاك للطاقة منخفضة نسبياً كما يوضح الشكل (4) أن الاستهلاك يبلغ (2.34 kWh/m³) وتستطيع تحلية مياه بحر بملوحة (35,000 mg/l) ويمكن أن تصمم للتشغيل المباشر باستخدام الطاقة المتجددة دون الحاجة إلى نظام تخزين الطاقة، وذلك من خلال نظم تحكم متطورة تسهم في تحسين كفاءة استهلاك الطاقة المتجددة.

شكل 4: نموذج وحدة تحلية بمبادل ضغط بمعدل إنتاج 3.2 م³/س



(Source: Department of Mechanics, University of Strathclyde)

٤.١.٢. أبرز مشاريع التحلية في المنطقة العربية

الجدول (3) يوضح أبرز المشاريع التي تقوم بتحلية المياه في المنطقة العربية

جدول 3: أبرز مشاريع التحلية في المنطقة العربية

الإمارات	
	● محطة حصيان SWRO في دبي بطاقة 180 مليون جالون يومياً (~818,000 م³/يوم) ضمن نموذج IWP، حيث تشير تقارير "فيوليا" إلى استهلاك (~2.9 ك.و.س/م³) كما أنشئت محطة الطويلة RO في أبو ظبي بطاقة 200 مليون جالون يومياً (~909,200 م³/يوم).

السعودية	مشروع رابغ-3 RO بطاقة (600,000 م³/يوم) مشروع الجبيل-3 بطاقة (600,000 م³/يوم دُشّن) عام 2024 وتحويل محطة الشعيبة 3 إلى RO بقدرة (600,000 م³/يوم) التي بدأت الإنتاج في فبراير 2025.
عمان	مشروع الغبرة بطاقة (300,000 م³/يوم) أغلق تمويلياً في يناير 2025؛ ومشروع بركاء بطاقة (100,000 م³/يوم) افتتح عام 2024 مع وحدة طاقة شمسية بقدرة (6.5 ميغاواط) لتغطية نحو 11% من الاستهلاك.
المغرب	مشروع أكادير/شتوكة SWRO بقدرة (275,000 – 400,000 م³/يوم) لتزويد مياه الشرب والري، مرتبط بالطاقة المتجددة.
مصر	البرنامج الوطني للتحلية يستهدف (3.35 مليون م³/يوم) بحلول 2025 ونحو (8.8 مليون م³/يوم) بحلول 2050، بالاعتماد الكامل على الطاقة المتجددة.
قطر	توسعة محطة أم الحول (SWRO) بإضافة (~280,000 م³/يوم).
البحرين	محطة الدور II SWRO بطاقة ~227,000 م³/يوم.
جيبوتي	مشروع دوراليه SWRO بطاقة 22,500 م³/يوم (المرحلة الأولى) تصل إلى 45,000 م³/يوم
فلسطين (غزه)	توسعة محطة التحلية الجنوبية في 2023 لخدمة أكثر من 175,000 شخص.
العراق	مشروع البصرة العملاق SWRO بطاقة ~1,000,000 م³/يوم.
الجزائر	برنامج لإنشاء 11 محطة SWRO بحلول 2030 بطاقة إجمالية ~5.8 مليون م³/يوم.

١.٣. ٤. تكلفة مياه التحلية بالتناضح العكسي في الدول العربية

تعتمد الجدوى الاقتصادية لإنتاج الهيدروجين الأخضر في المنطقة العربية ليس فقط على أسعار الطاقة المتجددة، بل أيضاً على تكلفة إنتاج المياه المحلاة، حيث يتطلب التحليل الكهربائي مياه عالية النقاء. تختلف تعرفه تحلية المياه بين الدول العربية وفقاً لعوامل عدة تشمل: سعة المحطة، آليات التمويل، تكلفة الطاقة، وترتيبات البيع والشراء.

تتوفر البيانات المعلنة لتعرفة المياه عند بوابة المحطة (LWT) بشكل أساسي في مشروعات التحلية المستقلة (IWPP/IWP) في دول الخليج، بينما تقتصر البيانات في دول أخرى على تقديرات دراسات الجدوى أو البرامج الوطنية. وتبقى تقنية التناضح العكسي (RO) الأكثر كفاءة والأقل تكلفة، حيث وصلت تعرفه المياه في بعض المشروعات الكبرى في الخليج إلى نحو 0.36 – 0.41 دولار أمريكي للمتر المكعب، وهي من بين الأدنى عالمياً.

وتتفاوت التكاليف بين الدول والمشروعات تبعاً لاختلاف جودة مياه البحر، وأنظمة السحب والتصريف، أسعار الطاقة، شروط التمويل، وحجم المشروع. يوضح الجدول (4) أسعار المياه المحلاة بتقنية RO في عدد من الدول العربية.

جدول 4: أسعار المياه المحلاة بتقنية (RO) في عدد من الدول العربية

الدولة	السعر (دولار أمريكي/م ³)	رقم المرجع
الإمارات	\$ 0.38923	(37,38)
السعودية	(\$ 1.54861) (0.413 ريال)	(39,45,46)

البحرين	(0.26352\$)	(40,47)
	(≈ 0.70 دينار بحريني)	
عُمان	(0.08 , 0.099\$)	(41,48)
	(≈ 0.21, 0.26 ريال عماني)	
تونس	(0.413\$)	(42,49)
	(≈ 0.13 دينار تونسي)	
مصر	(≈ 0.22 \$)	(43,50)

٤.٢. معالجة المياه وإعادة استخدامها

تزداد أهمية معالجة مياه الصرف الصحي البلدية (الأولية، الثانوية، والثالثية) في دول المنطقة العربية كجزء أساسي من استراتيجيات إدارة الموارد المائية. إذ يمكن للمعالجة الثلاثية المتقدمة، باستخدام تقنيات الترشيح الدقيق (UF) أو التناضح العكسي (RO) متبوعاً بمرحلة نزع الأيونات بالتيار الكهربائي (EDI)، أن توفر مياه ذات نقاء عالٍ تصل إلى مقاومة كهربائية أكبر من 1 ميغا أوم-سم، وهو ما يلبي متطلبات المياه اللازمة لتشغيل وحدات التحليل الكهربائي لإنتاج الهيدروجين الأخضر بشكل آمن وفعال.

٤.٣. التقنيات وإمكانات الطاقة المتجددة

أما على صعيد الطاقة، فإن المنطقة تتميز بإشعاع شمسي مميز، سرعات رياح متوسطة ومرتفعة، إضافة إلى قابلية إنشاء محطات كهرومائية وكتلة حيوية، مع اهتمام متزايد أيضاً بالطاقة الحرارية الجوفية. تشكل هذه الموارد مجتمعة الأساس التقني لإنتاج الهيدروجين على نطاق واسع والتصدير. وتشمل تقنيات الطاقة المتجددة الرئيسية في المنطقة ما يلي:

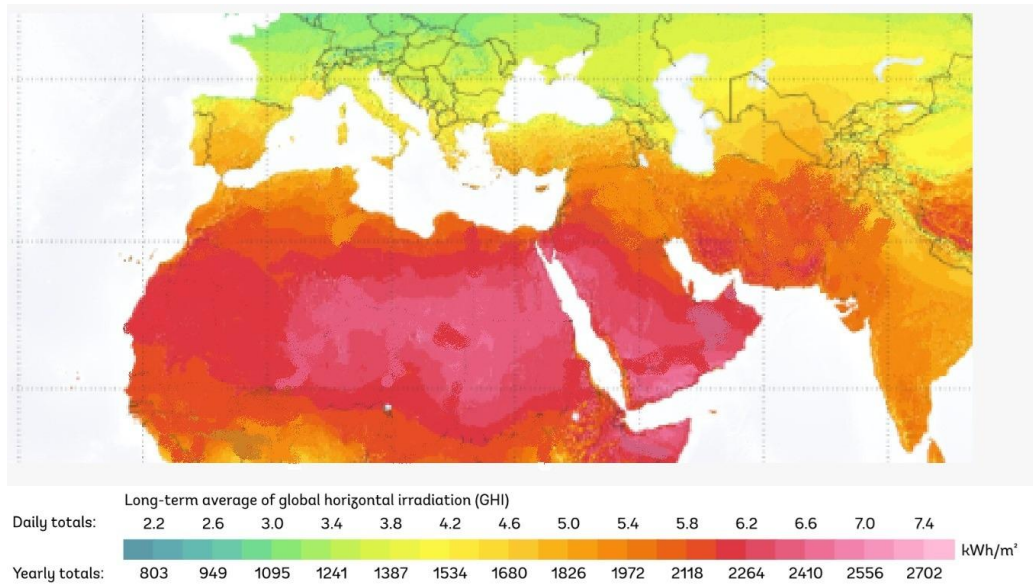
- الطاقة الشمسية الكهروضوئية: (PV) إنتاج الكهرباء مباشرة من أشعة الشمس.
- الطاقة الشمسية المركزة (CSP): إنتاج الكهرباء الحرارية باستخدام الإشعاع الشمسي المباشر (DNI) مع أنظمة تخزين حراري.
- طاقة الرياح البرية: (Onshore) في الممرات والمناطق الساحلية ذات الإمكانيات العالية.
- طاقة الرياح البحرية (Offshore): في مرحلة مبكرة من التطوير.
- الطاقة الكهرومائية: توليد الطاقة الكهربائية من السدود على الأنهار المتاحة ببعض الدول العربية.
- الكتلة الحيوية: يتم تحويل النفايات إلى طاقة (WtE)
- الطاقة الحرارية الجوفية (Geothermal): في مواقع محددة ذات إمكانيات متخصصة.

تستند الخطوط الأساسية للموارد الإقليمية إلى أطلس عالمية متاحة مثل: الأطلس العالمي للطاقة الشمسية (Global Solar Atlas) الذي يوفر بيانات حول الإشعاع الشمسي العالمي (GHI) والإشعاع الشمسي المباشر (DNI)، والأطلس العالمي لطاقة الرياح (Global Wind Atlas) الذي يقدم بيانات لسرعات الرياح على ارتفاع 100 متر. يوضح شكل (5) أطلس الإشعاع الشمسي في المنطقة العربية، بينما يوضح الشكل (6) أطلس سرعات الرياح. ويبين الجدول (5) متوسط الإشعاع الشمسي وسرعات الرياح للدول العربية

جدول 5: متوسط الإشعاع الشمسي وسرعات الرياح للدول العربية

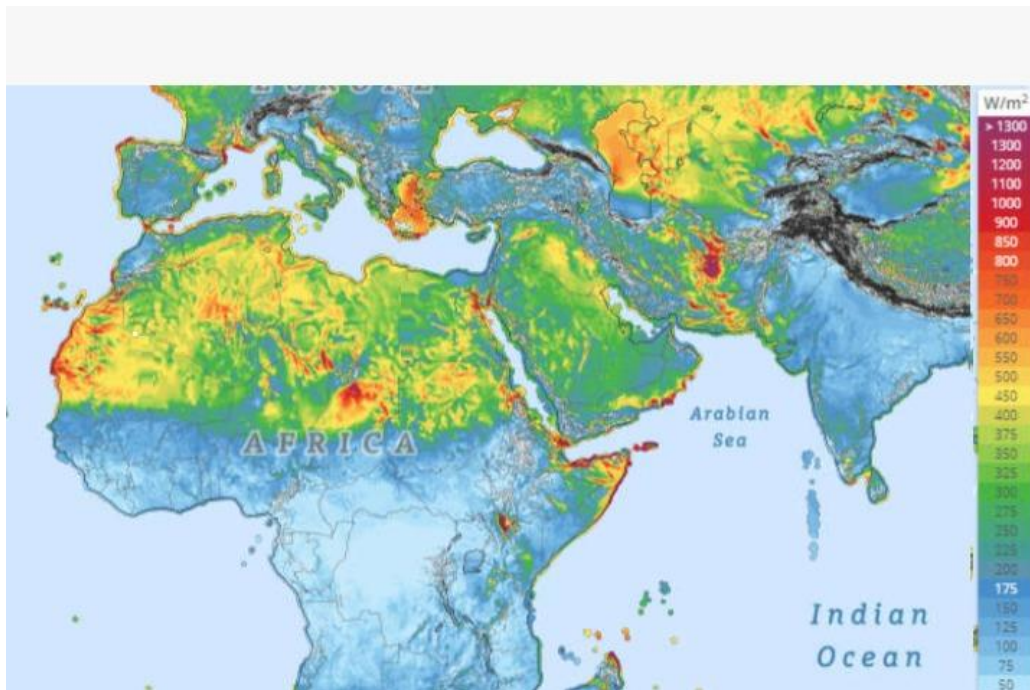
الدولة	الإشعاع الشمسي (ك.و.س/م ² /سنة) GHI	سرعة الرياح عند 100 م (م/ث)
الجزائر	(2400, 2000≈)	(8 , 6≈)
البحرين	(2200 , 2000≈)	(6,7≈)
جزر القمر	(2000, 1800≈)	(6,7≈)
جيبوتي	(2200 , 2000≈)	(8, 6≈) ممر تجوره
مصر	(2300 , 2000≈)	(8 , 10.5) خليج (≈السويس)
العراق	(2200 , 1900≈)	(7.5 , 6≈)
الأردن	(2200 , 2000≈)	(7.5 , 6≈)
الكويت	(2200 , 2000≈)	(7 , 6≈)
لبنان	(2100 , 1900≈)	(7.5 , 6≈) مرتفعات جبليه
ليبيا	(2400 , 2100≈)	(8 , 6≈) السواحل
موريتانيا	(2400 , 2100≈)	(9 , 7≈) الاطلسي
المغرب	(2300 , 2000≈)	(9 , 7≈) الاطلسي
عُمان	(2300 , 2000≈)	(8 , 7≈) ظفار
فلسطين	(2100 , 1900≈)	(7 , 6≈)
قطر	(2200 , 2000≈)	(6,7≈)
السعودية	(2300 , 2000≈)	(8 , 6.5≈)
الصومال	(2200 , 2000≈)	(8 , 7≈) السواحل
السودان	(2300 , 2000≈)	(7.5 , 6≈)
سوريا	(2100 , 1900≈)	(7 , 6≈)
تونس	(2200 , 2000≈)	(8 , 6.5≈) ساحلي \ داخلي
الإمارات	(2300 , 2000≈)	(7 , 6≈) مواقع مختاره
اليمن	(2200 , 2000≈)	(7.5 , 6.5≈) السواحل

شكل 5: أطلس الطاقة الشمسية



(Source: Global horizontal irradiation)

شكل 6: أطلس سرعات الرياح



(Source: Global Wind Atlas)

٤.٣.١. المشاريع الخاصة بالطاقة المتجددة في بعض الدول العربية

جدول رقم (6) يوضح مشاريع الدول العربية التي تركز على الطاقة المتجددة

جدول 6: المشاريع الخاصة بالطاقة المتجددة في بعض الدول العربية

الدولة	المشروع
مصر	تمتاز مصر بإشعاع شمسي عالمي (GHI) يتراوح بين (2000, 2300 ك.و.س/م²/سنة)، وسرعات رياح عالية في خليج السويس بين (8, 10.5 م/ث). ومن أبرز المشاريع: مجمع بنبان للطاقة الشمسية الكهروضوئية بقدرة (1.8 غيغاواط)، ومزرعة جبل الزيت للرياح بقدرة (580 ميغاواط).
المغرب	يتراوح الإشعاع الشمسي بين (2000, 2300 ك.و.س/م²/سنة)، وسرعات الرياح الأطلسية بين (7, 9 م/ث). ومن أبرز المشاريع: مجمع نور ورزازات للطاقة الشمسية المركزة (CSP) بقدرة (510 ميغاواط)، ومزرعة طرفاية للرياح بقدرة 301 ميغاواط.
عمان	يبلغ الإشعاع الشمسي (2000, 2300 ك.و.س/م²/سنة)، وسرعات الرياح في ظفار بين (7, 8 م/ث). ومن أبرز المشاريع: مشروع ظفار لطاقة الرياح بقدرة 50 ميغاواط.
الإمارات	يبلغ الإشعاع الشمسي (2000, 2300 ك.و.س/م²/سنة)، وسرعات الرياح المختارة (6, 7 م/ث). ومن أبرز المشاريع: مشروع الظفرة للطاقة الشمسية الكهروضوئية بقدرة 2 غيغاواط.
قطر	يتراوح الإشعاع الشمسي بين (2000, 2200 ك.و.س/م²/سنة)، وسرعات الرياح (6, 7 م/ث). ومن أبرز المشاريع: محطة الخرسة للطاقة الشمسية الكهروضوئية بقدرة 800 ميغاواط
السعودية	يتميز الإشعاع الشمسي بـ (2000, 2300 ك.و.س/م²/سنة)، وسرعات الرياح في شمال غرب البحر الأحمر (6.5, 8 م/ث). وتطلق المملكة عدة مناقصات لمشاريع شمسية ورياح بقدرة جيجاواط بهدف دعم محطات التحلية وإنتاج الهيدروجين.
جيبوتي	يتراوح الإشعاع الشمسي بين (2000, 2200 ك.و.س/م²/سنة)، وسرعات الرياح في ممر تجوره (6-8 م/ث). ومن أبرز المشاريع: مشروع الطاقة الحرارية الجوفية في بحيرة عسل.

٤.٤. إمكانات سلسلة إمداد الهيدروجين الأخضر في المنطقة العربية مع تكامل التحلية والطاقة المتجددة

تُعد المنطقة العربية رائدة عالمياً في تطوير الهيدروجين الأخضر، حيث تستفيد من وفرة مواردها الشمسية والرياح منخفضة التكلفة، إلى جانب اعتمادها على تقنيات التحلية المتقدمة. وقد حُددت عدة مواقع في المنطقة العربية باعتبارها ذات إمكانات عالية لإنتاج الهيدروجين الأخضر مستقبلاً، نظراً لتكامل مصادر الطاقة المتجددة مع قربها من مصادر المياه المالحة للتحلية. يبين الجدول (7) أهم المواقع المقترحة لإنتاج الهيدروجين الأخضر في المنطقة العربية، استناداً إلى توافر البنية التحتية للطاقة المتجددة والتحلية.

جدول 7: أهم المواقع المقترحة لإنتاج الهيدروجين الأخضر في المنطقة العربية

الدولة	المواقع المقترحة	المبررات الرئيسية والإمكانات	إمكانات الطاقة المتجددة والتحلية	رقم المرجع
المغرب	الأقاليم الجنوبية والمناطق الساحلية	موقع استراتيجي قريب من السوق الأوروبية وخطوط أنابيب الغاز التي يمكن إعادة استخدامها لنقل الهيدروجين	موارد شمسية ورياح عالية جداً، مع استراتيجية وطنية لبناء محطات تحلية على الساحل الأطلسي	(42,49,52)
مصر	المنطقة الاقتصادية لقناة السويس (SCZONE) والمناطق الساحلية على البحر الأحمر	محور ملاحى عالمي، يتم تطويره كمرر أخضر لتصدير الهيدروجين	موارد شمسية ورياح ممتازة، مع مشاريع تحلية قائمة ومخطط لها لتلبية الطلب الصناعي والطاقي	(43,50,51,53)
عمان	الدقم، صلالة، وصحار	موانئ استراتيجية للتصدير، وحددت ضمن الاستراتيجية الوطنية لتكون لاعباً رئيسياً عالمياً في الهيدروجين	موارد شمسية ورياح عالية، خاصة في الوسط والجنوب (الوسطى وظفار)، مع محطات تحلية قائمة ومخطط لها	(41,48,54)
السعودية	الساحل على البحر الأحمر (نيوم، ينبع) والمناطق الشمالية	مشروع نيوم يمثل نموذجاً لإنتاج واسع النطاق، مع توافر موارد شمسية منخفضة التكلفة على مستوى عالمي	موارد شمسية ورياح ضخمة، والتزام وطني بإنشاء محطات تحلية جديدة تعمل بالطاقة المتجددة	(46,45,39)
تونس	المناطق الساحلية، خصوصاً الجنوبية	قرب تونس من مشروع خط أنابيب الهيدروجين الجنوبي الرابط بين شمال إفريقيا وأوروبا، ما يجعلها بوابة متميزة للتصدير.	موارد شمسية ورياح قوية، مع دراسات لدمج التحلية بالطاقة المتجددة	(42,52)
موريتانيا	منطقة داخلت نواذيبو والسواحل المجاورة	موقع استراتيجي قريب من أوروبا، واستراتيجية وطنية لجعل البلاد مركزاً للهيدروجين الأخضر (مشروع AMAN بطاقة 30 جيجا واط ومشروع Nour بطاقة 10 جيجا واط)	موارد شمسية ورياح عالمية المستوى، مع قانون جديد يتيح للمطورين إنشاء وتشغيل محطات التحلية الخاصة بمشاريعهم، مثل مشروع الأمونيا	(55)

	الخضراء بقيمة 1.5 مليار دولار			
--	----------------------------------	--	--	--

ه. تكنولوجيا إنتاج الهيدروجين

يُعتبر إنتاج الهيدروجين الأخضر عبر التحليل الكهربائي للماء باستخدام الكهرباء المتولدة من مصادر الطاقة المتجددة (الطاقة الشمسية، الرياح، الكتلة الحيوية، الكهرومائية) المسار الأكثر استدامة ومواءمةً مع أهداف خفض الكربون. ورغم أن الهيدروجين يمكن إنتاجه من مسارات أخرى مثل إعادة تشكيل الميثان بالبخر (SMR) أو التغويز، إلا أن هذه الطرق تظل مرتبطة بانبعاثات كربونية مرتفعة حتى مع تقنيات احتجاز الكربون.

تقوم عملية الإنتاج على المحللات الكهربائية (Electrolyzers) التي تحول الكهرباء والمياه النقية إلى هيدروجين وأكسجين. وتختلف كفاءة وتكلفة هذه المحللات باختلاف التكنولوجيا المستخدمة.

٥.١. التحليل الكهربائي للماء

يعد التحليل الكهربائي للماء عملية كيميائية كهربائية تُستخدم فيها الكهرباء لتكسير جزيئات الماء إلى هيدروجين وأكسجين. يتكون المحلل الكهربائي من قطبين مغمورين في محلول إلكتروليتي، ويفصل بينهما حاجز مسامي أو غشاء تبادل بروتوني. يسمح هذا الغشاء بمرور أيونات الهيدروجين موجبة الشحنة (البروتونات) فقط. عند تطبيق جهد خلية كافٍ بين القطبين، يتحلل الماء إلى بروتونات وإلكترونات الهيدروجين وغاز الأكسجين. تنتقل الإلكترونات إلى القطب الموجب (الأنود) عبر دائرة الطاقة الخارجية، بينما تهجر بروتونات الهيدروجين عبر الغشاء إلى القطب السالب (الكاثود)، حيث تتفاعل مع إلكترونات الهيدروجين لإنتاج غاز الهيدروجين. ويوجد ثلاثة أنواع رئيسية من تقنيات التحليل الكهربائي للماء:

- المحللات الكهربائية القلوية (ALK)
- المحللات الكهربائية بغشاء البوليمر الإلكتروني (PEM)
- خلايا التحليل الكهربائي للأكسيد الصلب (SOECs)

٥.١.١. المحللات الكهربائية القلوية (ALK)

المحللات القلوية (Alkaline Electrolysis) (شكل رقم 7) هي التقنية الأكثر انتشاراً عالمياً لإنتاج الهيدروجين الأخضر، إذ تمثل ما يزيد عن 60-70% من السعة المركبة عالمياً. وتتميز بالآتي:

- الحصة السوقية: تمثل 60-70% من السعة المركبة عالمياً.
- العمر التشغيلي: يتجاوز 200,000 ساعة (~20 سنة تشغيل مستمر)
- الكفاءة الكهربائية: بين 62-70%.
- استهلاك المياه 9~ لترات منزوعة الأملاح + 15 لتر مياه تبريد لكل 1 كجم هيدروجين.
- استهلاك الطاقة 4.4-4.6 ك.و.س/م³ هيدروجين (Nm³)
- التكلفة: 300-600 دولار/ك. والأرخص مقارنةً بـ (PEM)
- المزايا: انخفاض CAPEX، عمر افتراضي طويل.
- العيوب: بطء الاستجابة للتغيرات في الحمل الكهربائي، ما يجعله أقل مرونة عند دمج مع الطاقة المتجددة المتقطعة.

شكل 7: محلل كهربائي قلوي



(Source: KAPSOM Green Ammonia)

٥.١.٢. المحللات الكهربائية بغشاء البوليمر الإلكتروليتي (PEM)

- آلية التشغيل: تعتمد على غشاء بوليمري كإلكتروليت يسمح بمرور البروتونات فقط.
- نقاوة المياه: تتطلب مياه نقية تماماً 0~(ppm).
- المرونة التشغيلية: يمكنها العمل بأحمال بين (0,160%) من قدرتها الاسمية → قابلية التشغيل مع مصادر طاقة متجددة ذات طبيعة متقطعة (الطاقة الشمسية/الرياح)
- الكفاءة: (65%, 70%)
- التكلفة: (\$500,1200). لكل كيلوواط من السعة (USD/kW) وأعلى من (ALK)
- السعة المتاحة: عادةً صغيرة-متوسطة، لكنها في توسع سريع عالمياً.
- المزايا: مرونة، استجابة سريعة، نقاوة هيدروجين عالية جداً (99.999%)
- العيوب: تكلفة مرتفعة، ندرة بعض المواد (البلاتين والإيريديوم)

٥.١.٣. خلايا التحليل الكهربائي للأكسيد الصلب (SOECs)

- آلية التشغيل: تعمل في درجات حرارة مرتفعة جداً 700–1000°C ، وتستخدم إلكتروليت خزفي.
- الكفاءة: يمكن أن تتجاوز 80% بفضل الاستفادة من الحرارة المهدرة.
- الوضع الحالي: ما تزال في مرحلة البحث والتطوير، قليلة التطبيق التجاري.
- المزايا: كفاءة نظرية عالية جداً، إمكانية التكامل مع الصناعات الحرارية (الحديد/الإسمنت)
- العيوب: تكلفة مرتفعة، عمر تشغيلي محدود بسبب الظروف الحرارية القاسية.

٥.٢. الجدوى الاقتصادية

تتأثر الجدوى الاقتصادية بتقنيات إنتاج الهيدروجين بمجموعة من العوامل الأساسية نلخص كالتالي:

- النفقات الرأسمالية المرتبطة بإنشاء البنية التحتية

- النفقات التشغيلية المستمرة
- تكاليف الطاقة الكهربائية وهي تُعد العامل الأكثر تأثيراً في تحديد تكلفة الإنتاج النهائية.
- سياسات الدعم الحكومي والحوافز المالية والاستثمارات في البنية التحتية.
- توفير تسهيلات ضريبية أو برامج دعم للطاقة المتجددة
- التقدم التكنولوجي في مجال المحطات الكهربائية وتحسين كفاءتها يزيد من القدرة الإنتاجية ويقلل من استهلاك الطاقة

تُحدد الجدوى الاقتصادية عبر ثلاثة عناصر رئيسية

1. التكاليف الرأسمالية: (CAPEX)

- المحطات الكهربائية: تتراوح بين (300-600 دولار/كيلوواط لتقنية ALK) و(500-1200 دولار/كيلوواط لتقنية PEM).
- الطاقة المتجددة: (700-1000 دولار/كيلوواط) لمحطات الطاقة الشمسية، و(1200-1500 دولار/كيلوواط) لمزارع الرياح.
- محطات التحلية: حوالي (0.5-1 مليار دولار) لمشروع واسع النطاق.

2. التكاليف التشغيلية: (OPEX)

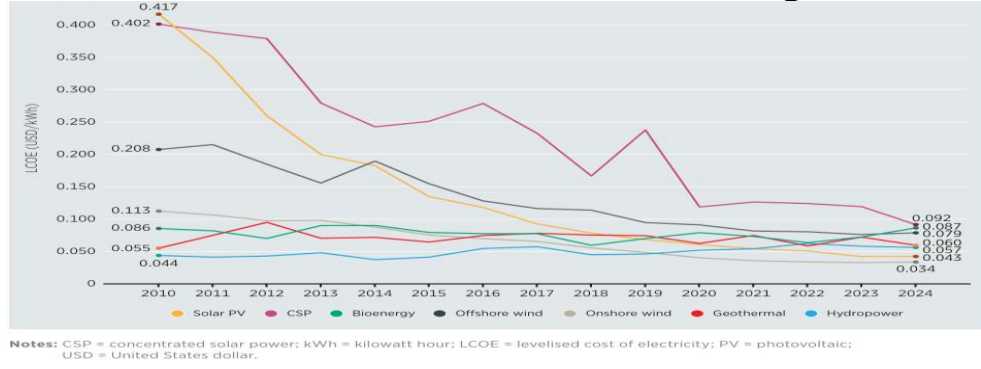
- الكهرباء: تشكل العامل الأكبر، حيث تمثل (50-70 %) من التكلفة النهائية للإنتاج. الانخفاض المستمر في تكلفة الكهرباء المتجددة (LCOE) يعزز الجدوى الاقتصادية للهيدروجين الأخضر.
- المياه: تكلفة محدودة تتراوح بين (0.2-0.5 دولار/م³).
- الصيانة: تمثل (2-4%) من التكاليف الرأسمالية سنوياً.

3. تكلفة الإنتاج النهائية

- تتراوح حالياً في الدول العربية بين (2-3 دولارات/كجم.) (بدون تكلفه النقل)
- من المتوقع انخفاضها إلى (1.2-1.5 دولار/كجم) بحلول عام 2035 مع تطور التكنولوجيا وانخفاض تكاليف الطاقة المتجددة.

ويبرز في هذا السياق اتجاه عالمي مهم يتمثل في الانخفاض التدريجي والمستمر في تكاليف مصادر الطاقة المتجددة كما هو موضح بالشكل رقم (8). هذا الانخفاض يلعب دوراً محورياً في جعل إنتاج الهيدروجين الأخضر أكثر تنافسية مقارنة بالهيدروجين التقليدي، ويعزز من جاذبيته الاقتصادية في أسواق الطاقة المحلية والدولية وتحسين مؤشرات الجدوى الاقتصادية على المدى الطويل. كما يوضح الشكلان (9،10) سعر إنتاج الهيدروجين اعتماداً على الطاقة الشمسية، بالإضافة إلى متوسط سعر إنتاجه استناداً إلى طاقة الرياح البحرية (Offshore).

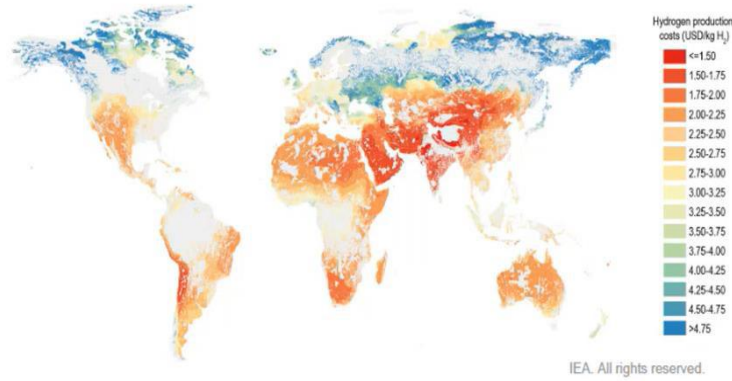
شكل 8: يوضح انخفاض التكلفة المتكافئة للكهرباء (LCOE) لمصادر الطاقة المتجددة



(Source: International Renewable Energy Agency, 2025)

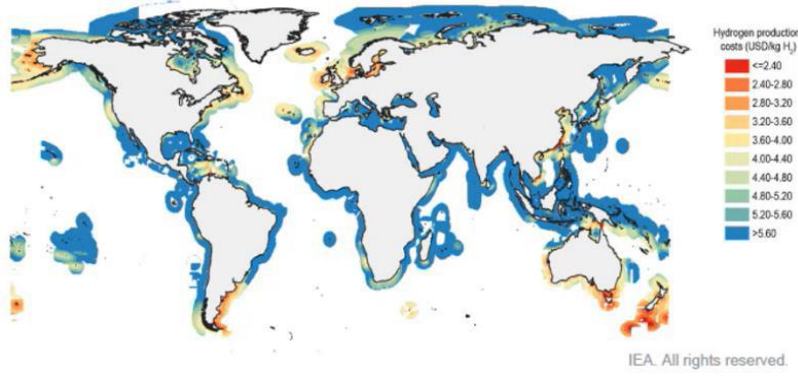
وتتضح الأهمية الاستراتيجية لهذه التطورات في الدول العربية على وجه الخصوص، نظرًا لوفرة مصادر الطاقة المتجددة وانخفاض تكاليف استغلالها نسبيًا. وبالتالي، فإن الاستثمار في الهيدروجين الأخضر لا يقتصر على كونه خيارًا بيئيًا مستدامًا، بل يمثل أيضًا فرصة اقتصادية واعدة تُمكن من تنويع مزيج الطاقة وتعزيز القدرة التنافسية للدول العربية في سوق الطاقة العالمية.

شكل 9: موضح سعر إنتاج الهيدروجين بناءً على الطاقة الشمسية



(Source: IEA report, The Future of Hydrogen)

شكل 10: متوسط سعر انتاج الهيدروجين بناء علي طاقة الرياح Off Shore



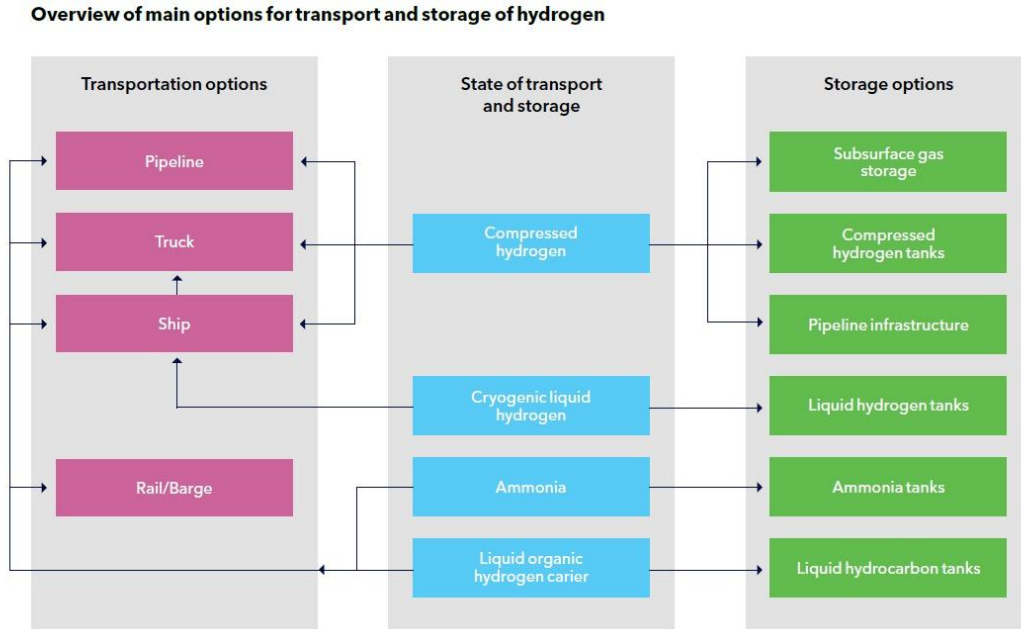
(Source: IKEM, BOWE2H Strategic Roadmap)

٦. نظم تخزين الهيدروجين

يعتبر وسط تخزين الهيدروجين (H_2) مكوناً حاسماً لتوفير طاقة خالية من الكربون لمختلف المستهلكين النهائيين للطاقة مثل المنازل والشركات والصناعات. توجد ثلاثة أنواع رئيسية ; كما موضح بالشكل الادني من أنظمة تخزين الهيدروجين:

- أنظمة تخزين الهيدروجين المضغوط
- أنظمة تخزين الهيدروجين المُسال
- أنظمة تخزين الهيدروجين في الحالة الصلبة

شكل 11: نقل وتخزين الهيدروجين



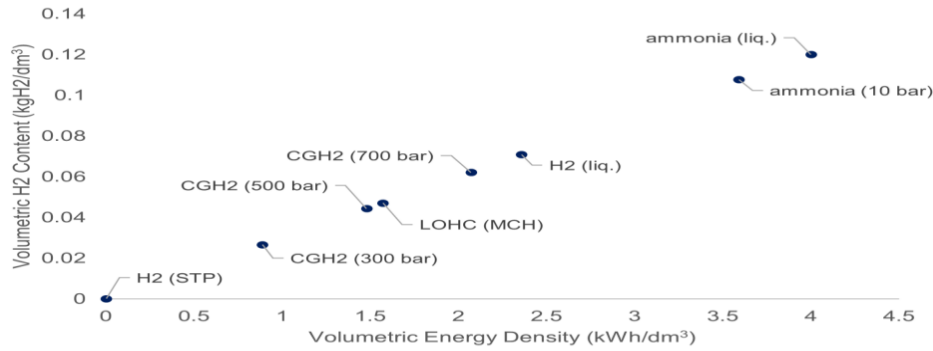
(Source: DNV Report)

٦.١. أنظمة تخزين الهيدروجين المضغوط

تشير أنظمة تخزين الهيدروجين المضغوط إلى تخزين غاز الهيدروجين إما فوق الأرض في خزانات متوسطة أو عالية الضغط، أو تحت الأرض في كهوف ملحبة أو خزانات نفط وغاز مستنفدة.

في أنظمة تخزين الهيدروجين (مثل الخزانات والأوعية)، غالبًا ما يكون الحجم متاح أكثر تقييدًا من الكتلة المتاحة. لذلك، من الأفضل عمليًا مراعاة كثافة طاقة "شكل" الهيدروجين من حيث كثافة طاقته الحجمية. يعرض الشكل (12) كثافة طاقة "أشكال" الهيدروجين المعينة كدالة لمحتوى الهيدروجين الحجمي. يؤدي ضغط الهيدروجين إلى زيادة في كثافة الطاقة الحجمية. من الممكن أيضًا تحويل الهيدروجين إلى أشكال أخرى، مثل LH2 و LOHC والأمونيا. تتمتع الأمونيا السائلة بأعلى طاقة حجمية (4.0 كيلوواط ساعة/دسم³). ومع ذلك، غالبًا ما تكون العمليات المعنية (أي الضغط و/أو التحويل) مقيدة بمتطلبات طاقة عالية الكثافة.

شكل 12: كثافة الطاقة مقابل محتوى الهيدروجين الحجمي



(Source: Department for Energy Security and Net Zero, 2023)

تتميز أنظمة التخزين المضغوطة بالآتي:

- **أوعية التخزين:** تُستخدم أسطوانات الفولاذ والألمونيوم الثقيلة عادةً لحفظ الهيدروجين الغازي، حيث يوفر تصميمها المتين مقاومة للضغوط العالية ويمنع التسرب الذي قد يحدث عن عند التخزين تحت ضغوط عالية نظراً لشدة انخفاض كثافة الهيدروجين.
- **سعة النقل:** يؤثر وزن أسطوانات التخزين بشكل كبير على سعة النقل. الأسطوانات الفولاذية الأثقل تقلل من سعة النقل لكل شاحنة، حيث تصل إلى 420 كجم من الهيدروجين فقط.
- **البדائل الحديثة:** يمكن استخدام أسطوانات البوليمر المقوى بألياف الكربون (CFRP) كحل بديل، حيث تتميز بكونها خفيفة الوزن وعالية القوة، إلا أنها لا تزال تقنية ناشئة وقد تكون تكلفتها باهظة في المستقبل.

٦.٢. النقل والتخزين تحت الأرض

- **نقل الهيدروجين:** يتم نقل الهيدروجين الغازي عبر طريقتين: المقطورات الأنبوبية وخطوط الأنابيب. المقطورات الأنبوبية هي وسيلة نقل بري تُستخدم لنقل أسطوانات الغاز المضغوط، وهي مناسبة للمسافات القصيرة والتطبيقات الصغيرة بسبب محدودية سعتها.

- **التخزين تحت الأرض:** يمكن تخزين كميات أكبر من الهيدروجين تحت الأرض في مواقع ذات مواصفات جيولوجية مناسبة، مثل الكهوف الملحية أو حقول الغاز والنفط المستنفدة. كلما كان عمق منشأة التخزين تحت الأرض أكبر، زادت سعة تخزين الهيدروجين.
 - **الكهوف الملحية مقابل الخزانات المستنفدة:** تُعد الكهوف الملحية أفضل من خزانات النفط والغاز المستنفدة من حيث نقاء الهيدروجين، وانخفاض تكاليف التشغيل، وقلة معدلات التسرب. في المقابل، تُفضل الخزانات المستنفدة بشكل أقل بسبب وجود بقايا الغاز التي تزيد من مخاطر تلوث الهيدروجين.
- ترتبط سعة خزانات تخزين الهيدروجين ارتباطاً وثيقاً بالضغط: فكلما ارتفع الضغط، زادت كمية الهيدروجين المخزنة في وحدة الحجم. ويرتبط ذلك بتقنية تصنيع الخزانات والتي تتضمن عدة مراحل أساسية، مثل حساب تحليل الإجهاد، واختيار المواد، وعمليات اللحام، والتصميم الهيكلي.
- وتتنوع أشكال ومواد تصنيع خزانات الهيدروجين حسب طبيعة، وضغط، وحجم، الهيدروجين المُخزن والتطبيقات التي تُستخدم فيها. الخزانات الكروية الموضحة في شكل (13أ) متوسطة الضغط لتخزين الهيدروجين عادة عند ضغوط تخزين تتراوح من 1.5 إلى 6.4 ميجا باسكال، مع سعة قصوى تبلغ 10000 متر مكعب أو ما يعادل 46 طن هيدروجين عند 60 درجة مئوية. ويعرض شكل (ب) الأسطوانات الرأسية لتوفير مساحة التخزين والاسطوانات الأفقية والتي منها ما يمكن تثبيته على شاحنات النقل، ويعرض شكل (ج) الأسطوانات المعدنية التي يسهل نقلها وتوزيعها، كما يعرض شكل (د) الأسطوانات التي يتم تصنيعها من مواد مركبة (Composite materials).
- يوضح شكل (14) مقارنة التكلفة لتخزين صور مختلفة من الهيدروجين (LVHC) لتخزين 4000 طن لمدة دورة تخزين مدتها 4 أشهر.

شكل 13: خزان الهيدروجين: (أ) خزان كروي، (ب) خزانات رأسية وأفقية، (ج) أسطوانات معدنية (د) أسطوانات مصنوعة من مواد مركبة



(ب)



(أ)



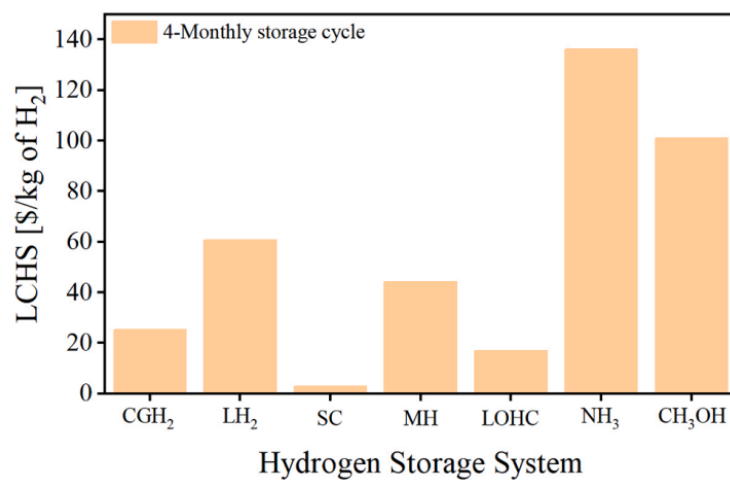
(د)



(ج)

(Source: Abdin, Tang, Liu, & Catchpole, 2022)

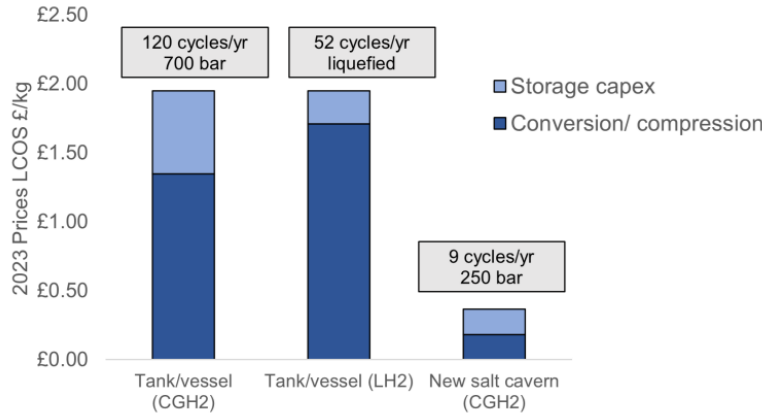
شكل 14: نظم تخزين الهيدروجين لتكلفه LVHC



(Source: Abdin, Tang, Liu, & Catchpole, 2022)

وبتقرير تكلفة يظهر شكل (15) أن تكاليف التسييل بهدف التخزين بخزان أعلى لكل وحدة هيدروجين مقارنةً بضغط الهيدروجين للاستخدام في خزان. أما تكاليف ضغط الغاز للتخزين تحت الأرض (في الكهوف الملحية، وطبقات المياه الجوفية، وحقول الغاز المستنفدة) فهي أقل لكل وحدة هيدروجين، إذ لا يحتاج الهيدروجين إلى ضغط كبير لتخزينه تحت الأرض. أما بالنسبة للتخزين في الخزانات، فتُحسب التكاليف المتساوية (LCHS) على أساس معدل دورة مرة كل ثلاثة أيام (أي 120 يوماً في السنة) للتخزين المضغوط، ومرة كل أسبوع (أي 52 يوماً في السنة) للتخزين السائل. لجعل التخزين مجدي من حيث التكلفة والكفاءة.

شكل 15: نظم تخزين الهيدروجين التكلفة LVHC



(Source: Department for Energy Security and Net Zero, 2023)

٦.٢.١ أنظمة تخزين الهيدروجين المسال

يُعدّ تسييل الهيدروجين خياراً مفضلاً للتطبيقات التي تتطلب كثافة طاقة عالية. يتميز الهيدروجين المسال (LH2) بكثافة حجمية تبلغ حوالي 70 كجم/متر مكعب عند ضغط 1 بار، مما يسمح بتحقيق كثافات تخزين عالية جداً عند الضغط الجوي.

- **درجة الحرارة وظروف التخزين:** درجة غليان الهيدروجين المسال منخفضة للغاية (-253 درجة مئوية)، لذلك تُستخدم أوعية تخزين مزدوجة الجدران مزودة بمواد عزل عالية الجودة للحفاظ على ظروف التبريد وحمايتها من انتقال الحرارة.
- **المزايا:** مقارنةً بأنظمة تخزين الهيدروجين المضغوط، تُعد أنظمة الهيدروجين المسال خفيفة الوزن وتتطلب حجماً أقل من أسطوانات الفولاذ الثقيلة المستخدمة لتخزين الهيدروجين المضغوط، وذلك بفضل كثافات السوائل العالية عند الضغط المنخفضة.

- **التحديات:** ترتبط عملية تسييل الهيدروجين بقضيتين رئيسيتين:
- **الطاقة المستهلكة:** تتطلب العملية كمية كبيرة من الطاقة بسبب درجة الحرارة المنخفضة جداً للهيدروجين المسال، حيث يتم استهلاك حوالي 30% من إجمالي محتوى طاقة الهيدروجين في عملية التسييل.
- **تبخر الهيدروجين:** يمكن أن يحدث "تبخر" للهيدروجين بسبب تراكم الضغط داخل أوعية التخزين، مما يحد من استخدامه في التطبيقات قصيرة المدى.

٦.٢.٢ أنظمة تخزين الهيدروجين في الحالة الصلبة

في أنظمة التخزين في الحالة الصلبة، يتفاعل الهيدروجين كيميائياً مع السبائك المعدنية لتشكيل هيدريدات معدنية (Metal Hydrides). تتميز هذه الأنظمة بعدة مزايا:

- تسمح هيدريدات المعادن بكثافة طاقة أعلى للهيدروجين.
- يمكن عكس عمليتي الهدرجة (hydrogenation) ونزع الهدرجة (dehydrogenation) في الظروف المحيطة، مما يجعل النظام أكثر أماناً من حلول التخزين الأخرى.
- أثناء عملية الهدرجة، يتم امتصاص الهيدروجين في هيدريدات المعادن مع إطلاق حرارة. وعلى العكس من ذلك، خلال عملية نزع الهدرجة، يتم استخدام كمية متساوية من الحرارة لاستخراج الهيدروجين من هيدريدات المعادن. وبالتالي، يمكن استخدام هيدريدات المعادن القابلة للعكس لتخزين الحرارة والهيدروجين بشكل متكرر عند شحن وتفريغ الخزان.
- مقارنةً بخزانات الهيدروجين المضغوط، تُعد خزانات هيدريدات المعادن أثقل بكثير. في التطبيقات الخاصة بالسيارات، يُعد وزن الخزان عاملاً أساسياً يؤثر على أداء النظام، حيث يمكن أن تؤدي خزانات هيدريدات المعادن الأثقل إلى نطاقات قيادة أقل لمركبات خلايا الوقود. ومع ذلك، لا يُعد هذا عائقاً كبيراً في التطبيقات الثابتة حيث لا يشكل وزن الخزان مصدر قلق رئيسي. ومن المثير للاهتمام أن التطورات المستقبلية في مجال هيدريدات المعادن قد تحل هذه المشكلة من خلال اكتشاف مواد جديدة أخف وزناً، مما يجعل هذه التكنولوجيا قابلة للتطبيق في تطبيقات التنقل.

٧. نظم نقل الهيدروجين

٧.١. خطوط أنابيب الهيدروجين

- **فعالية التكلفة:** تُعد خطوط الأنابيب وسيلة فعالة من حيث التكلفة لنقل الهيدروجين المضغوط، سواء تحت الأرض أو فوقها.
- **تحديات إعادة الاستخدام:** هناك جهود كبيرة حالياً لإعادة استخدام البنية التحتية لشبكة الغاز الطبيعي الحالية لنقل الهيدروجين. ومع ذلك، تواجه هذه العملية تحديات كبيرة، أبرزها أن سلوك الهيدروجين يختلف عن سلوك الغاز الطبيعي.
- **المخاطر الفنية:** هناك حاجة لإجراء تقييمات دقيقة للمخاطر لتجنب مشكلات مثل تلف الهيدروجين للهياكل المعدنية (H2 embrittlement)، وتلامس الهيدروجين مع السبائك عالية القوة، وتسرب الهيدروجين من الصمامات أو الوصلات.
- **التحديات الرئيسية:** تشمل التحديات التقنية الرئيسية مخاوف السلامة المتعلقة بنقل الهيدروجين في خطوط أنابيب الغاز الحالية، وخط الهيدروجين مع الغاز الطبيعي، وتطوير أجهزة استشعار الهيدروجين، واستخدام الهيدروجين للتدفئة، وفصل الهيدروجين عن خليطه مع الغاز الطبيعي.

٧.٢. مشروع SouthH2 Corridor لتعزيز أهداف الطاقة في الاتحاد الأوروبي

كخطوة استراتيجية لتعزيز استيراد الهيدروجين، تم التوقيع على مذكرة تفاهم لإنشاء خط أنابيب بطول 3,300 كيلومتر، حسب المسار الموضح بشكل (16)، يهدف إلى نقل الهيدروجين من شمال إفريقيا عبر إيطاليا إلى ألمانيا والنمسا بحلول عام 2030 وقعت الاتفاقية في روما في يناير 2025 بين ممثلين عن إيطاليا، ألمانيا، النمسا، الجزائر وتونس.

يستهدف المشروع الجديد الاستفادة من البنية التحتية الحالية لخطوط الغاز، حيث سيتم تعديل 70% منها لنقل الهيدروجين، ما يساهم في تحقيق 40% من أهداف الاتحاد الأوروبي للهيدروجين، مع قدرة نقل سنوية تصل إلى أربعة ملايين طن.

يهدف ممر الهيدروجين "SouthH2" إلى دعم التحول الطاقى من خلال تعزيز التعاون بين أوروبا وإفريقيا. ومن المقرر أن يبدأ تشغيل البنية التحتية في أوائل عام 2030، بعد أن حصل المشروع على تصنيف مشروع ذو اهتمام مشترك (IPCEI) من الاتحاد الأوروبي.

شكل 16: مسار نقل الهيدروجين

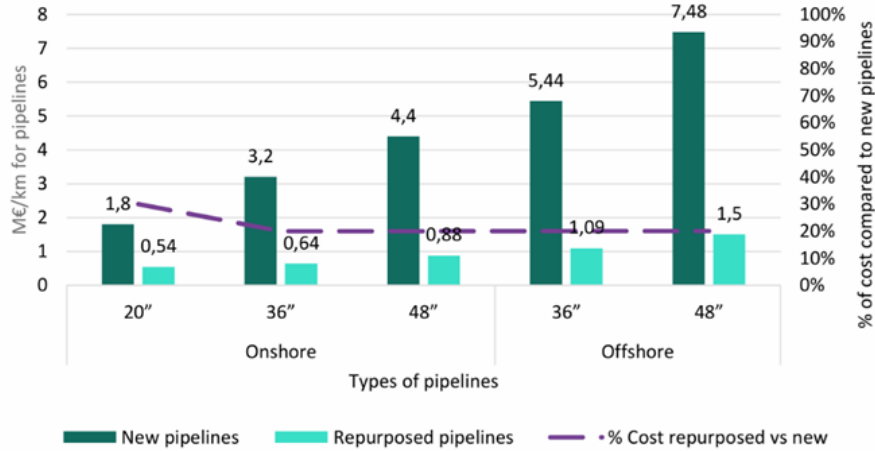


(Source: SouthH2 Corridor)

ويمكن للدول العربية دراسة إنشاء مسارات لنقل الهيدروجين بينها وبين الدول الأوروبية على غرار مسار SouthH2 والموضح بالشكل رقم (16) والمسارات الأخرى بين الدول الأوروبية. ويتم الاستفادة بخطوط نقل الغاز الطبيعي المتاحة عالياً بين الدول العربية. وتسهم الاستفادة من شبكة خطوط الغاز الطبيعي الحالية في تحقيق المميزات الآتية:

- تحسّن توصيل الطاقة
- تخفّض التكاليف
- سرعة التنفيذ
- تجعل التحوّل النظيف في متناول المستهلكين
- تقلّل من الأثر البيئي لبناء خطوط أنابيب جديدة.
- ويجري البحث في الجوانب الفنية وفوائد التحديث في العديد من المشاريع عالمياً الآن، مع إعداد دراسات جدوى عن إعادة استخدام خطوط الأنابيب على المدى الطويل، بالإضافة إلى استكشاف التعديلات اللازمة للتكيف مع الخصائص الفنية المختلفة، وضغوط التشغيل المتأثرة بعد إعادة الاستخدام. وتجدر الإشارة إلى أن النهج الفني للتحديث يختلف من مستوى النقل إلى مستوى التوزيع
- تُصنع خطوط أنابيب النقل، المصممة لنقل الغاز عالي الضغط، من فولاذ مُكَيّف مع خصائص الغاز الطبيعي، وتتطلب معالجة فنية لهشاشة الهيدروجين عند إعادة استخدامها. كما يجري دراسة تركيب خطوط أنابيب الهيدروجين بأقطار أقل داخل أنابيب الغاز الطبيعي لتقليل التكلفة.
- تصنع أنابيب التوزيع عادةً من البولي إيثيلين لأنها ملائمة للضغط المنخفض، وبالتالي أكثر تكيفاً مع نقل الهيدروجين.

شكل 17: مقارنة خطوط أنابيب نقل جديدة وإعادة استخدام خطوط سابقة



(Source: European Heating & Cooling Board [EHB], 2023)

٧.٣. نقل الهيدروجين المسال

توجد وسيلتان رئيسيتان لنقل الهيدروجين المسال: الشاحنات البرية والشحنات البحرية.

- **الشاحنات البرية:** رغم أن تكاليف التشغيل للنقل بالشاحنات أعلى من تكاليف نقل الهيدروجين المضغوط بسبب استهلاك الطاقة في عملية التسييل (حوالي 10 كيلوواط/ساعة لكل كيلوجرام من الهيدروجين المسال)، إلا أن سعة نقل الهيدروجين المسال أكبر بعشر مرات من سعة شاحنة الهيدروجين المضغوط، مما يجعله أكثر ملاءمة للمسافات الطويلة.
- **الشحنات البحرية:** في عمليات النقل الدولية الكبيرة، تُستخدم الشحنات البحرية حيث يعمل الهيدروجين كحامل للطاقة المتجددة. بفضل كثافته العالية، يمكن نقل كميات كبيرة من الطاقة المتجددة من المناطق ذات الإمدادات الوفيرة إلى المناطق ذات الإمدادات الضعيفة، مما يوفر وسيلة نقل فعالة واقتصادية.
- **عوائق النقل البحري:** تواجه الشحنات البحرية للهيدروجين المسال بعض العوائق الرئيسية التي تحول دون تطورها على نطاق واسع، مثل تبخر الهيدروجين، الحاجة إلى أنظمة عزل دقيقة، إجراءات السلامة الصارمة، ومتطلبات تصميم السفن الخاصة.

٧.٤. التكلفة الاقتصادية لنقل الهيدروجين

يمكن نقل الهيدروجين براً بعدة طرق تشمل:

- **خطوط الأنابيب:** حيث يُضغَط الهيدروجين ويتم ضخه مباشرة عبر الشبكات الأرضية.
- **الشاحنات وأسطوانات التخزين:** وهي وسيلة مرنة لنقل كميات محدودة من الهيدروجين إلى مواقع الاستخدام.
- **القطارات:** تُستخدم لنقل كميات أكبر لمسافات طويلة بكفاءة عالية.
- **التحويل إلى كهرباء:** من خلال خلايا الوقود أو توربينات الهيدروجين، ثم نقله عبر خطوط نقل الكهرباء.

ويمكن نقل الهيدروجين داخل الدول العربية أو بين بعضها البعض أو تصديره للدول خارج الوطن العربي إما برياً أو بحرياً.

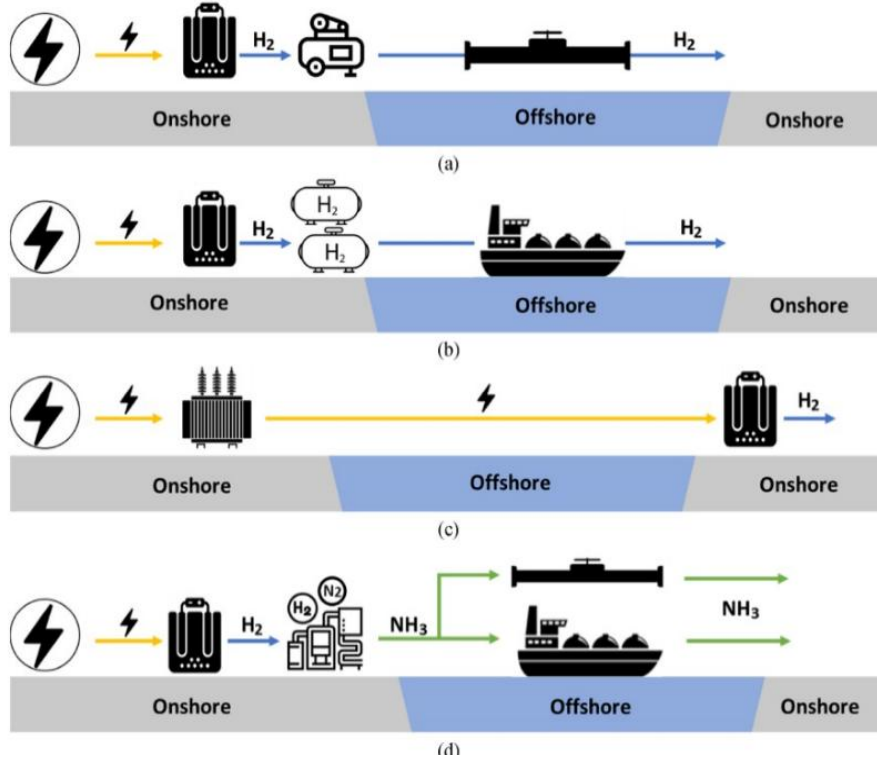
٧.٤.١ خيارات نقل الهيدروجين البري

ينقل الهيدروجين برياً باستخدام خطوط الأنابيب، الشاحنات، أسطوانات التخزين، القطارات، ويمكن نقله باستخدام خطوط نقل الكهرباء عبر تحويله إلى طاقة كهربائية باستخدام توربينات الهيدروجين أو خلايا الحمل (Fuel cells).

٧.٤.٢ خيارات نقل الهيدروجين البحري

يعرض شكل رقم (18) ثلاث خيارات لنقل الهيدروجين البحري وخيارين لنقل الأمونيا. النقل عبر الأنابيب حيث تُشغّل الكهرباء المحلل الكهربائي لإنتاج الهيدروجين، الذي يُضغَط ويُنقل إلى البحر عبر خط أنابيب تحت الماء كما بشكل (20أ). تُشغّل الكهرباء مرة أخرى المحلل الكهربائي لإنتاج الهيدروجين، الذي يُضغَط ويُنقل إلى البحر عبر خط أنابيب تحت الماء. في الشكل (1ب)، تُشغّل الكهرباء جهاز التحليل الكهربائي لإنتاج الهيدروجين، الذي يُسَيَّل أو ينقل مضغوطاً ويُنقل إلى البحر عبر ناقلات الهيدروجين كما بشكل (20ب). في الشكل (20ج)، تُنقل الكهرباء إلى البحر عبر موصل كهربائي بحري عالي الجهد (HVDC)، مع توليد الهيدروجين من خلال التحليل الكهربائي في موقع الاستقبال. في الشكل 4د، يُستخدم كل الهيدروجين المُستخرَج من جهاز التحليل الكهربائي لإنتاج الأمونيا، التي تُسَيَّل وتُنقل إلى البحر عبر خطوط أنابيب الأمونيا أو ناقلاتها.

شكل 18: خيارات النقل البحري للهيدروجين



(Source: Dinh, Pereira, Dinh, Nagle, & Leahy, 2024)

تُعد تكاليف النقل من أهم عناصر سلسلة قيمة الهيدروجين، حيث تختلف بشكل ملحوظ باختلاف وسيط النقل المستخدم. فالهيدروجين المضغوط أو المسال يواجه تحديات مرتبطة بارتفاع التكلفة مع زيادة المسافة، إذ يمكن أن تتجاوز 1.5-2 دولار/كجم هيدروجين عند النقل لمسافات طويلة. بالمقابل، يُظهر الأمونيا تفوقاً اقتصادياً سواء في النقل عبر الأنابيب أو الشحن البحري، حيث تبقى تكلفته أقل من 0.3 دولار/كجم هيدروجين لمسافات بحرية تصل إلى 3000 كم، على الرغم من تكاليف تحويله الأولية في حدود 1 دولار/كجم هيدروجين تقريباً. أما الناقلات العضوية السائلة (LOHCs) فتتميز بانخفاض تكاليف التحويل في حدود 0.3 دولار/كجم هيدروجين تقريباً، لكنها أقل تنافسية في النقل بسبب أعباء إعادة التحويل واستهلاك الطاقة.

يُنقل الهيدروجين السائل ويُخزن حالياً باستخدام خزانات تخزين كروية. ومع ذلك، فهي ليست مثالية للاستخدام على نطاق واسع. يُنقل الهيدروجين السائل (LH2) ويُخزن عند درجة حرارة 253 درجة مئوية تحت الصفر، نظراً لارتفاع كثافته الطاقية. ونظراً لبرودة هذه الدرجة، يُعد العزل الحراري أمراً بالغ الأهمية. حتى الآن، صُممت خزانات تخزين LH2 الكبيرة بطريقة مشابهة للخزانات الصغيرة للغاز الطبيعي المسال: فهي تتميز بشكل كروي لتحمل الضغط بشكل أفضل وتقليل خسائر التخزين. كما أنها مزودة بجدار مزدوج معقد يعمل كعازل حراري كما هو بالشكل (19).

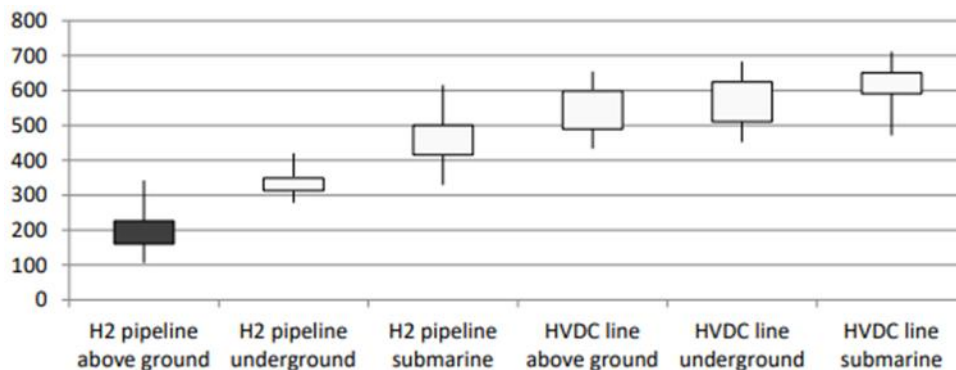
شكل 19: ناقلات الهيدروجين



(Source: Weichenhain, UWE)

الجدير بالذكر أن خطوط أنابيب الهيدروجين تُصنع من مواد أرخص من خطوط الكهرباء، وتعتمد بشكل أقل على المواد الخام الأساسية نظراً لعدم الحاجة إلى إلكترونيات الطاقة والمحولات وقواطع الدوائر. تكلفة خطوط أنابيب الهيدروجين أقل بثلاث مرات من تكلفة خطوط التيار المستمر عالي الجهد (HVDC). ويظهر شكل (22) متوسط تكاليف الاستثمار لخطوط نقل الكهرباء HVDC وخطوط أنابيب الهيدروجين وتظهر أقل تكلفة عند استخدام خطوط أنابيب فوق أرضية.

شكل 20: يوضح متوسط تكاليف الاستثمار المقدرة لخطوط أنابيب الهيدروجين (يورو/ميغا واط / كم HVDC)



(Source: Patonia, Poudineh, Lenivova, & Nolden, 2023)

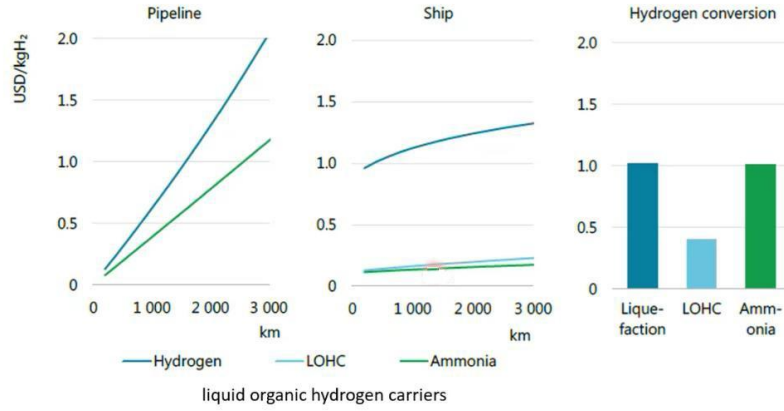
يعرض شكل (20) تحليلًا مقارنًا لتكاليف نقل وتحويل الهيدروجين عبر ثلاث مسارات رئيسية: الهيدروجين المباشر، والناقلات العضوية السائلة للهيدروجين (LOHCs)، والأمونيا (N) وتُعرض النتائج من حيث التكلفة لكل وحدة من الهيدروجين دولار/كجم هيدروجين كدالة للمسافة ووسيلة التحويل. وتُظهر المقارنات أن الأمونيا هي الخيار الأكثر فعالية من حيث التكلفة لنقل وتخزين الهيدروجين على نطاق واسع ولمسافات طويلة، بينما يظل تسهيل الهيدروجين و LOHC أكثر ملائمة لتطبيقات محدودة أو قصيرة المدى.

في حالة النقل عبر الأنابيب، ترتفع تكلفة وحدة الهيدروجين خطيًا مع المسافة لتصل إلى نحو 2.0 دولار/كجم H₂ عند 3000 كم، بينما يظهر نقل الأمونيا زيادة أكثر اعتدالًا، مستقرة عند حوالي 1.2 دولار/كجم H₂. ويشير ذلك إلى أن الأمونيا توفر ميزة من حيث التكلفة لمسافات النقل الطويلة عبر الأنابيب. أما في النقل البحري، فتكون تكلفة شحن الهيدروجين مرتفعة نسبيًا منذ البداية بقيمة 1 دولار/كجم هيدروجين وتزداد لتصل إلى حوالي 1.6 دولار/كجم هيدروجين عند 3000 كم. وعلى النقيض من ذلك، يظل نقل الأمونيا عن طريق السفن منخفض التكلفة، حيث يبدأ قريبًا من 0.1 دولار/كجم هيدروجين ويبقى أقل من 0.3 دولار/كجم هيدروجين حتى عند مسافة 3000 كم. وهذا يبرز التفوق الاقتصادي للأمونيا كناقل للهيدروجين.

أما فيما يتعلق بتكاليف التحويل، فيُظهر التحليل أن تسهيل الهيدروجين وتصنيع الأمونيا يفرضان تكاليف تقارب 1.0 دولار/كجم H₂ لكل منهما، بينما تتطلب تقنيات LOHC تكلفة أقل بكثير، بحدود 0.3 دولار/كجم هيدروجين. وعلى الرغم من هذه الميزة في تكاليف التحويل، فإن مسارات LOHC أقل تنافسية عند الشحن مقارنةً بالأمونيا بسبب ارتفاع تكاليف النقل اللاحقة.

بشكل عام، يوضح الشكل (21) أنه بالرغم من جاذبية أنظمة LOHC من منظور تكاليف التحويل، إلا أن الأمونيا تمثل الخيار الأكثر جدوى اقتصاديًا لنقل الهيدروجين على نطاق واسع ولمسافات طويلة، سواء عبر الأنابيب أو عبر البحر.

شكل 21: مقارنة لتكاليف نقل الهيدروجين



(Source: IEA, 2021)

٨. صناعة الأمونيا الخضراء

يتم تصنيع الأمونيا الخضراء وتستخدم كحامل للهيدروجين بغرض نقله إما عن طريق خطوط نقل أو بخزانات بحراً أو برّاً. وقد يتم استغلال الأمونيا مباشرة في تطبيقات مثل إنتاج الأسمدة الخضراء أو إسترجاع الهيدروجين منها مرة أخرى من خلال عملية (Dehydrogenation) باستخدام منظومة تكسير الأمونيا (Ammonia cracking system) ونظراً للفقد أثناء هذه العملية يفضل استخدام الأمونيا بصورة مباشرة.

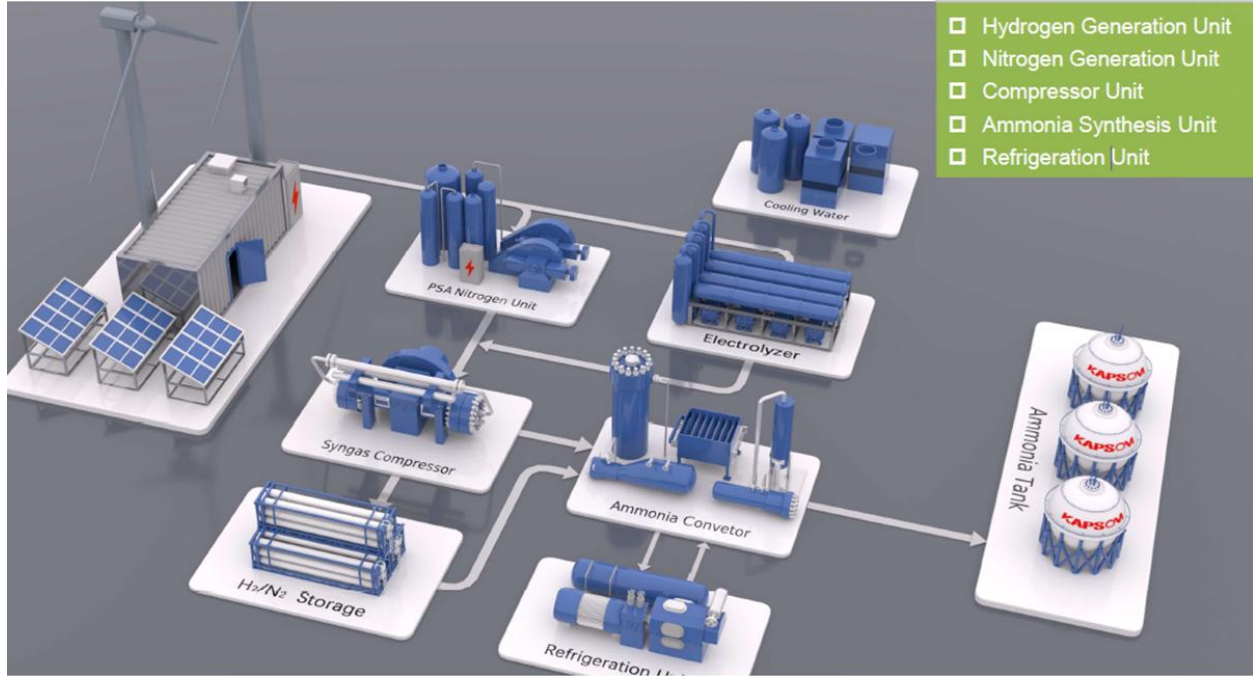
تُستخدم عملية هابر- بوش (Haber-Bosch) التقليدية في المشاريع الضخمة واسعة النطاق، ويُستخدم نظام تخليق الأمونيا (Ammonia Thensis System) في المشاريع الصغيرة والمتوسطة الحجم.

ويُتطلب إنشاء مصنع الأمونيا الخضراء المكونات الرئيسية الآتية:

- خطوط الطاقة والنقل الخضراء ومحولات الطاقة الكهربائية وقضبان التوزيع
- محطة تحلية مياه البحر
- التحليل الكهربائي للمياه
- محطة فصل الهواء
- وحدة تخليق الأمونيا
- منشأة تخزين الأمونيا/الهيدروجين

ويعرض شكل (22) مخطط لمصنع مناظر لإنتاج أمونيا خضراء بسعة 2000 طن/سنة أو 20000 طن/سنة ويعرض متوسط الاستهلاك للطاقة والمياه والمساحة المطلوبة وقيمة كل من CAPEX and OPEX

شكل 22: مخطط لمصنع إنتاج أمونيا خضراء بسعة 2000 طن/سنة أو 20000 طن/سنة



Model	Capacity (TPA)	Electricity (kWh/h)	Demineralized Water (TPH)	Area Required(m ²)	Delivery Time (Month)	CAPEX USD/Ton NH ₃	OPEX USD/Ton NH ₃
GA-2000	2,000	2,500	0.5	78	8	2,000	520
GA-20000	20,000	25,000	5	1680	8	1,150	440

*All data are derived from KAPSOM's theoretical calculations and experience, for reference only.

(Source: KAPSOM Green Ammonia)

ولإنتاج الأمونيا الخضراء من مياه البحر بطاقة انتاجية 2500 طن/يوم يتوقع حجم استثمار متوقع يبلغ 3 مليار دولار (شامل تكلفه محطات الطاقة المتجددة)، ومدة إنشاء تستغرق ثلاث سنوات من بدء التنفيذ ويسهم في توفير 10000 فرصة عمل مباشرة وغير مباشرة في مرحلة الإنشاء و2000 فرصة بعد التشغيل، ويشمل المصنع الوحدات الرئيسية الآتية:

- محطة تحلية مياه بطاقة إنتاجية قدرها 10000 طن/يوم.
- محلل المياه الكهربى (Electrolyze) بقدرة كهربية قدرها 1 جيجا وات وينتج 500 طن هيدروجين/يوم.
- وحدة فصل الهواء لاستخلاص النيتروجين بقدرة 2200 طن/يوم.
- منظومة طاقة شمسية و/أو طاقة رياح (حسب الموقع) بقدرة إجمالية 2 جيجا وات.
- خزان هيدروجين بسعة تخزين 500 طن.
- خزان أمونيا بسعة تخزين 20000 طن.
- المساحة المناسبة قدرها 170 ألف متر مربع

٩. الفرص والتحديات التي تواجه المنطقة العربية

تتمتع الدول العربية بفرص واعدة في مجال الهيدروجين الأخضر بفضل موقعها الجغرافي القريب من أوروبا، ووفرة مواردها من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، ونكلفتها التنافسية للإنتاج. هذه العوامل تجعلها مؤهلة لتكون أحد أبرز الموردين العالميين للهيدروجين، خاصة مع تزايد الطلب الأوروبي على مصادر الطاقة النظيفة. كما أن الخطط الوطنية الطموحة في الإمارات والمغرب وعمان وغيرها تعكس توجهًا جادًا نحو بناء صناعة إقليمية قوية قادرة على تصدير ملايين الأطنان خلال العقود المقبلة.

في المقابل، تواجه المنطقة تحديات رئيسية تتمثل في ارتفاع التكاليف الاستثمارية المطلوبة للتوسع، والحاجة إلى تطوير بنية تحتية متكاملة للتخزين والنقل والتصدير، إضافة إلى ضمان توافر المياه اللازمة، وإبرام اتفاقيات طويلة الأمد مع الشركاء الدوليين. ومن ثم، فإن نجاح الدول العربية في الاستفادة من هذه الفرص يتطلب استراتيجيات واضحة للتعامل مع هذه التحديات وتحويل الإمكانيات النظرية إلى إنجازات عملية.

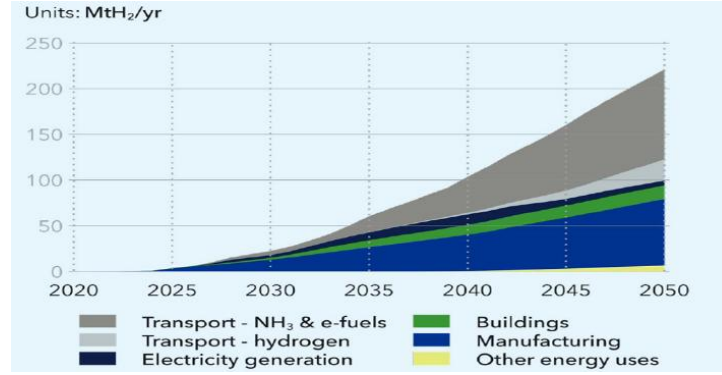
٩.١ تحليل الطلب في السوق: الاتجاهات والفرص في المنطقة العربية

يشهد الطلب العالمي على الهيدروجين الأخضر نموًا متسارعًا، مدفوعًا بالجهود الدولية الرامية إلى إزالة الكربون والتحول نحو مصادر طاقة نظيفة. ويكتسب الهيدروجين الأخضر زخمًا باعتباره حاملًا للطاقة ومتعدد الاستخدامات، مع تطبيقات تمتد إلى قطاعات النقل، والصناعة، وتوليد الكهرباء. ومن هذا المنطلق، يقدم هذا القسم تحليلًا شاملاً للاتجاهات الراهنة والفرص المستقبلية المرتبطة بالهيدروجين الأخضر، مع تسليط الضوء على الدور المحوري الذي يمكن أن تلعبه الدول العربية في هذا المجال.

فبفضل موقعها الجغرافي الاستراتيجي ووفرة مواردها من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، تتمتع الدول العربية بقدرة تنافسية تؤهلها لتصبح من أبرز موردي الهيدروجين الأخضر إلى الأسواق العالمية، ولا سيما السوق الأوروبية. ففي الوقت الذي قد يظل فيه الاستهلاك المحلي محدودًا في البداية، مقتصرًا على تطبيقات صناعية معينة ومشاريع تجريبية، يُتوقع أن يشكل التصدير المحرك الرئيس للطلب، مدعومًا بحاجات أوروبا المتزايدة لاستيراد الهيدروجين الأخضر لتلبية أهدافها المناخية. ويُعزز هذا الدور قرب الدول العربية من أوروبا، وتكلفة إنتاجها التنافسية، إضافة إلى مسارات التجارة الراسخة عبر الموانئ والممرات البحرية الحيوية.

وتشير التقديرات بالشكل (23) إلى أن الدول العربية قادرة على تصدير مئات الآلاف من الأطنان من الهيدروجين الأخضر بحلول عام 2030، مع توقعات بزيادة الكميات إلى عدة ملايين من الأطنان بحلول عام 2050، وذلك بشرط التوسع الناجح في القدرات الإنتاجية، وتطوير بنية تحتية متكاملة للتخزين والتصدير، إلى جانب إبرام اتفاقيات طويلة الأجل مع الشركاء الدوليين. ولا سيما السوق الأوروبية التي ستظل المستورد الأكبر في العقود المقبلة.

شكل 23: توقعات الطلب المستقبلي على الهيدروجين ومشتقاته.



(Source: Forbs)

٩.٢ ديناميكيات السوق العالمية

يشهد سوق الهيدروجين العالمي تطوراً سريعاً، مدفوعاً بشكل أساسي بضرورة إزالة الكربون من أنظمة الطاقة وتحقيق الأهداف المناخية. يعترف بالهيدروجين الأخضر بشكل متزايد كحامل للطاقة ومتعدد الاستخدامات مع تطبيقات متنوعة عبر النقل، والعمليات الصناعية، وتوليد الطاقة. يؤدي هذا التحول الديناميكي إلى تحليل شامل لطلب السوق، وتحديد الاتجاهات الحالية والفرص المستقبلية للهيدروجين الأخضر.

من المتوقع أن يشهد الطلب العالمي على الهيدروجين نمواً كبيراً خلال العقود القادمة، مدفوعاً بمبادرات إزالة الكربون في مختلف القطاعات. وتشير تقديرات وكالة الطاقة الدولية (IEA) إلى إمكانية ارتفاع الطلب بمعدل ستة أضعاف بحلول عام 2050 (الشكل 23)، مع مساهمة الهيدروجين الأخضر بشكل أساسي في هذا التوسع. وعلى المستوى الأوروبي، تضع استراتيجية الاتحاد الأوروبي للهيدروجين هدفاً يتمثل في إنتاج ما يصل إلى 10 ملايين طن من الهيدروجين المتجدد محلياً بحلول عام 2030، إلى جانب الاعتماد على واردات كبيرة لتلبية الطلب. وتتصدر دول مثل ألمانيا وفرنسا وهولندا هذا التوجه من خلال استثمارات واسعة في البنية التحتية والتقنيات المرتبطة بالهيدروجين.

٩.٢.١ العوامل الرئيسية المحركة للسوق

تدفع العديد من المحركات الرئيسية نمو سوق الهيدروجين الأخضر:

- أهداف إزالة الكربون: تنفذ الحكومات في جميع أنحاء العالم لوائح صارمة وتضع أهدافاً طموحة لتقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. ووفق تقرير IEA في سيناريو Net-Zero by 2050، من المتوقع أن يزداد الطلب العالمي على الهيدروجين ستة أضعاف ليصل إلى حوالي 530 مليون طن سنوياً بحلول عام 2050، وهو ما يبرز الدور المحوري للهيدروجين في التحول الطاقوي. وتؤكد مبادرات مثل الصفقة الخضراء للاتحاد الأوروبي واستراتيجيات الهيدروجين في ألمانيا واليابان وكوريا الجنوبية على أهمية هذا التوجه لتحقيق صافي انبعاثات صفرية.

- **أمن الطاقة:** يوفر الهيدروجين الأخضر مساراً لتنويع مصادر الطاقة وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، وبالتالي تعزيز أمن الطاقة. تستكشف البلدان التي لديها موارد طاقة متجددة وفيرة، مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، الهيدروجين الأخضر بنشاط للاستفادة من هذه الموارد بشكل أكثر فعالية.
- **التطبيقات الصناعية:** تتجه الصناعات الثقيلة، بما في ذلك إنتاج الصلب والأسمنت والمواد الكيميائية، بشكل متزايد إلى الهيدروجين كحل لإزالة الكربون. من المتوقع أن يؤدي الضغط التنظيمي والتطورات التكنولوجية إلى نمو استخدام الهيدروجين في هذه القطاعات.
- **النقل:** يبرز قطاع النقل، لا سيما المركبات الثقيلة، والشحن البحري، والطيران، كسوق مهم للهيدروجين الأخضر. توفر خلايا وقود الهيدروجين بديلاً قابلاً للتطبيق عن البطاريات في التطبيقات التي تتطلب مدى طويلاً وإعادة تعبئة سريعة.

٩.٢.٢ تقسيم السوق والتحليل الإقليمي

يتم تقسيم سوق الهيدروجين الأخضر وتحليله إقليمياً (الشكل 24) على النحو التالي:

- **أوروبا:** تتصدر أوروبا تبني الهيدروجين الأخضر، حيث تقود دول مثل ألمانيا وفرنسا وهولندا تطوير السياسات والاستثمار في البنية التحتية. من المتوقع أن يشهد سوق الهيدروجين الأوروبي نمواً كبيراً، مدفوعاً بالحوافز الحكومية، والطلب الصناعي، ودمج الهيدروجين في أنظمة الطاقة الوطنية، ويُتوقع أن يصل إيراد السوق إلى 26.8 مليار دولار أمريكي بحلول عام 2030، مع معدل نمو سنوي مركب قدره 38.8%.
- **آسيا والمحيط الهادئ:** تُعد اليابان وكوريا الجنوبية لاعبين رئيسيين يستثمران بكثافة في تقنيات الهيدروجين والبنية التحتية، بينما تبرز أستراليا كمصدر محتمل للهيدروجين الأخضر مستفيدة من مواردها الوفيرة من الطاقة المتجددة، ومن المتوقع أن يصل إيراد السوق في هذه المنطقة إلى 14.1 مليار دولار أمريكي بحلول عام 2030 بمعدل نمو سنوي مركب قدره 45.4%.
- **أمريكا الشمالية:** في الولايات المتحدة، يكتسب الهيدروجين اهتماماً كجزء من جهود إزالة الكربون الأوسع، لا سيما في كاليفورنيا والولايات الشمالية الشرقية. تهدف مبادرة وزارة الطاقة الأمريكية "Hydrogen Shot" إلى خفض تكلفة الهيدروجين الأخضر إلى دولار واحد لكل كيلوغرام في غضون عقد من الزمان، مما قد يحفز نمواً كبيراً في السوق.

شكل 24: تقسيم سوق الهيدروجين الأخضر وتحليله على المستوى الإقليمي



(Source: BCC Research, 2024)

٩.٢.٣ الفرص الناشئة

المواصفات الرئيسية للبنية التحتية

- مسطح الأرض مستوى وليس به أودية أو مرتفعات ومنخفضات.
- القرب من ساحل البحر بحيث يسهل مد مواسير التغذية والراجع بين المصنع والبحر.
- التغذية بنظام هجين طاقة شمسية وطاقة رياح وتتوفر الطاقة الشمسية بمساحات شاسعة لذا يفضل القرب من منطقة مناسبة لإنشاء محطات طاقة الرياح (وفق خرائط الرياح) وبحيث يسهل مد الكابلات الكهربائية بين مزرعة الرياح والمصنع.
- القرب من ميناء مؤهل لتصدير الهيدروجين أو مشتقاته (مثل الأمونيا).
- القرب من الطرق السريعة لتسهيل لوجستيات نقل المعدات والخدمات.

١٠. توقعات الطلب، استراتيجيات اختراق السوق، وتسعير الهيدروجين الأخضر

يشكل فهم توقعات الطلب على الهيدروجين الأخضر خطوة أساسية لتقدير حجم السوق المستقبلي وتحديد فرص النمو. كما تمثل استراتيجيات اختراق السوق عنصرًا محوريًا لضمان دخول هذه التكنولوجيا إلى الأسواق الإقليمية والعالمية بفاعلية، بينما يُعد تسعير الهيدروجين الأخضر من العوامل الحاسمة لتحقيق الجدوى الاقتصادية وجذب الاستثمارات. ومن خلال هذه المحاور، يمكن رسم رؤية شاملة لدور الهيدروجين الأخضر في مزيج الطاقة المستقبلي وتعزيز قدرته التنافسية.

١٠.١ الاتجاهات الحالية والمستقبلية للطلب على المستوى العالمي والإقليمي

يشهد الطلب على الهيدروجين الأخضر تزايدًا ملحوظًا على الصعيدين العالمي والإقليمي، مدفوعًا بتوجهات التحول نحو الطاقة النظيفة وتقليل الانبعاثات الكربونية. وتُظهر المؤشرات أن هذا الطلب سيستمر في النمو مستقبلاً مع اتساع استخداماته في قطاعات الصناعة والطاقة والنقل، الأمر الذي يعزز مكانة الهيدروجين كعنصر محوري في مزيج الطاقة المستدام.

١٠.١.١. تحليل السوق وتوقعات الطلب

يشهد الطلب العالمي على الهيدروجين نمواً متسارعاً، حيث تشير تقديرات وكالة الطاقة الدولية (IEA) إلى إمكانية ارتفاعه ستة أضعاف بحلول عام 2050. يُعد التصدير المحرك الرئيسي للطلب في المنطقة العربية، خاصة إلى السوق الأوروبية التي تهدف لاستيراد كميات ضخمة لتحقيق أهدافها المناخية.

- أهداف الإنتاج العربية: تخطط دول عربية لإنتاج حوالي 8 ملايين طن سنوياً بحلول 2030.

- الإمارات 1.4: مليون طن سنوياً بحلول 2030.

- عُمان 1: مليون طن سنوياً بحلول 2030.

- المغرب 1.2: مليون طن سنوياً بحلول 2030.

١٠.١.٢. تقدير الإيرادات بناءً على الحصة السوقية

- بحلول عام 2030: بافتراض استحواذ الدول العربية على حصة 5-10% من واردات أوروبا (1-2 مليون طن سنوياً) وبمتوسط سعر 4 دولارات/كجم، يمكن أن تصل الإيرادات السنوية إلى 4-8 مليارات دولار.

- بحلول عام 2050: مع زيادة الحصة السوقية إلى 15-20% (4-6 ملايين طن سنوياً)، يمكن أن تتجاوز الإيرادات السنوية 16-24 مليار دولار.

١٠.٢. استراتيجيات التسعير

يجب أن تتبنى الدول العربية استراتيجية تسعير مرنة ومنافسة.

- السعر المستهدف للتصدير: يتوقع أن يتراوح سعر التصدير إلى أوروبا بين 3.5-5 دولارات/كجم خلال العقد القادم.

- آليات تعزيز التنافسية:

- تقديم أسعار تفضيلية للعقود طويلة الأجل.

- ربط التسعير بأسعار الكربون في الاتحاد الأوروبي. (Carbon-linked Pricing)

- التعاون الإقليمي في مشاريع البنية التحتية لخفض التكاليف.

١٠.٣. مصادر التمويل للمشاريع

- المصادر الحكومية: المنح والإعانات والحوافز الضريبية التي تقدمها الحكومات الوطنية لدعم قطاع الطاقة المتجددة.

- **الاستثمار الخاص:** رأس المال من شركات الطاقة، صناديق الأسهم الخاصة، والمستثمرين المؤسسيين.
- **الدعم الدولي:** القروض الميسرة والمنح من بنوك التنمية متعددة الأطراف (مثل البنك الدولي) وصناديق المناخ العالمية (مثل صندوق المناخ الأخضر).

من المتوقع أن يرتفع الطلب العالمي على الهيدروجين الأخضر بشكل كبير في العقود القادمة، مدفوعاً بجهود إزالة الكربون عبر مختلف الصناعات، بما في ذلك النقل، وتوليد الطاقة، والصناعات الثقيلة. وفقاً لوكالة الطاقة الدولية (IEA)، يمكن أن يزيد الطلب العالمي على الهيدروجين ستة أضعاف بحلول عام 2050، مع استحواذ الهيدروجين الأخضر على جزء كبير من هذا النمو.

في أوروبا، تتصور استراتيجية الاتحاد الأوروبي للهيدروجين زيادة قوية في الطلب، بهدف إنتاج ما يصل إلى 10 ملايين طن من الهيدروجين المتجدد محلياً بحلول عام 2030، إلى جانب واردات كبيرة (European Commission, 2020). تتصدر دول مثل ألمانيا وفرنسا وهولندا طليعة هذا الارتفاع في الطلب، وتستثمر بكثافة في البنية التحتية والتكنولوجيا المتعلقة بالهيدروجين.

وكانت المؤسسة الألمانية "H2 Global"، التي أسستها وزارة الاقتصاد والطاقة، قد أطلقت أول مناقصة دولية لاستيراد منتجات الهيدروجين الأخضر من مصر في يوليو 2024. وفازت شركة Fertiglabe بعقد تسليم ما لا يقل عن 259,000 طن من الأمونيا الصديقة للبيئة، ومن المقرر أن تبدأ الشحنات في 2027 وتستمر حتى 2033.

يضع الموقع الاستراتيجي ووفرة الموارد من الطاقة المتجددة مصر كمورد رئيسي للهيدروجين الأخضر، لا سيما للأسواق الأوروبية. من المتوقع أن يكون الطلب على الهيدروجين الأخضر في مصر مدفوعاً بشكل أساسي بفرص التصدير، مع اقتصار الاستهلاك المحلي في البداية على تطبيقات صناعية محددة ومشاريع تجريبية. نظراً لسعي أوروبا لاستيراد الهيدروجين الأخضر لتلبية أهدافها المناخية، فمن المرجح أن تبرز مصر كمورد مفضل بسبب قربها، وإنتاجها التنافسي من حيث التكلفة، وطرق التجارة الراسخة عبر قناة السويس.

بناءً على التوقعات الحالية، يمكن لمصر أن تصدر ما بين 0.5 و1 مليون طن من الهيدروجين الأخضر إلى أوروبا بحلول عام 2030، مع زيادة إلى 3-4 ملايين طن بحلول عام 2050 (El-Zayat, 2021). تعتمد هذه الأرقام على التوسع الناجح في القدرة الإنتاجية، وتطوير البنية التحتية للتصدير، وإنشاء اتفاقيات توريد طويلة الأجل مع الشركاء الأوروبيين.

١١. التحليل التنافسي

يهدف التحليل التنافسي إلى دراسة موقع الهيدروجين الأخضر مقارنة بمصادر الطاقة الأخرى، وكذلك تقييم قدرات الدول والشركات المنافسة في هذا المجال. ويساعد هذا التحليل في تحديد نقاط القوة والضعف، واستكشاف الفرص المتاحة والتحديات المحتملة، مما يساهم في وضع استراتيجيات فعالة لتعزيز القدرة التنافسية للمنطقة العربية في سوق الطاقة العالمي.

١١.١ استراتيجيات اختراق السوق

تركز استراتيجيات اختراق السوق على كيفية تعزيز انتشار الهيدروجين الأخضر وزيادة حصته في أسواق الطاقة العالمية والإقليمية. وتشمل هذه الاستراتيجيات تطوير البنية التحتية، عقد شراكات وتحالفات دولية، تقديم حوافز استثمارية، وفتح قنوات تصدير جديدة. كما تتضمن أيضًا استراتيجيات التسعير المبدئية إلى جانب تحليل تكاليف الإنتاج وتكاليف النقل والتخزين. وتهدف هذه الجهود إلى تسريع تبني الهيدروجين الأخضر وترسيخ مكانته كمصدر طاقة مستدام ومنافس.

١١.١.١ تطوير البنية التحتية، عقد شراكات وتحالفات دولية

يمثل اختراق سوق الهيدروجين الأخضر وسلاسل الإمداد الخضراء في الدول العربية خطوة محورية لاغتنام الفرص العالمية المتزايدة في مجال الطاقة النظيفة. ويعتمد نجاح هذا الاختراق على بناء شراكات استراتيجية قوية على المستويين المحلي والإقليمي، إلى جانب تطوير شراكات عبر الحدود تعزز التكامل الاقتصادي وتزيد من تنافسية المنطقة.

على الصعيد المحلي، تسهم الشراكات بين الحكومات، القطاع الخاص، والمؤسسات البحثية في دفع عجلة الابتكار، وتطوير التكنولوجيا، وتوفير الخبرات الضرورية للتعامل مع ديناميكيات السوق المعقدة. أما على المستوى الإقليمي، فإن المشاركة في معارض ومنتديات متخصصة، مثل معرض الشرق الأوسط للطاقة في دبي أو القمة العالمية لطاقة المستقبل في أبوظبي، توفر منصات استراتيجية للتواصل، جذب الاستثمارات، وتحديد شركاء محتملين من داخل وخارج المنطقة.

ولتجاوز التحديات وتعظيم الاستفادة من المزايا التنافسية المشتركة، يُوصى بإنشاء مجلس اقتصادي عربي مخصص للهيدروجين والطاقة الخضراء، يعمل كهيئة تنسيقية مركزية لدعم التجارة البينية وتعزيز الاستثمار. وستمثل مهامه في:

- مواءمة السياسات الاقتصادية بين الدول الأعضاء.
- إزالة العوائق الجمركية والإدارية لتسهيل تدفقات التجارة عبر الحدود.
- توحيد معايير الجودة والشهادات للمنتجات الخضراء بما يرفع من موثوقيتها عالميًا.
- تطوير مشاريع بنية تحتية مشتركة مثل ممرات الهيدروجين، محطات التحلية، وشبكات النقل واللوجستيات.
- تحفيز الاستثمار في البحث والتطوير مع التركيز على الكفاءات التقنية المحلية.

وسيلعب المجلس دورًا محوريًا في تحديد مبادئ توجيهية للتسعير العادل للهيدروجين الأخضر والمنتجات المرتبطة به، من خلال تطبيق تعريفات تفضيلية داخلية قائمة على اتفاقيات مثل منطقة التجارة الحرة العربية الكبرى، واستكشاف مواءمة أنظمة الضرائب (مثل ضريبة القيمة المضافة) لتجنب تشوهات الأسعار. كما سيعمل المجلس على تطوير منصات شفافة لتبادل بيانات التسعير، وتحفيز سلاسل التوريد المحلية لتعزيز الاكتفاء الذاتي الإقليمي.

وعلى مستوى الترويج الخارجي، يمكن تبني مبادرات تسويق مشتركة لتقديم المنتجات العربية كعلامة موحدة للأسواق الدولية، مع الاستثمار في المنصات الرقمية للتجارة وتبسيط الإجراءات الجمركية. بالإضافة إلى ذلك، فإن الاستثمار في شبكات النقل الإقليمية وممرات الطاقة، إلى جانب تطوير أطر لحماية الملكية الفكرية، سيعزز من جاذبية المنطقة كمركز عالمي لسلاسل الإمداد الخضراء.

وسُيُنَى هيكل المجلس المقترح على مستويات متعددة: ممثلين وزاريين لصياغة السياسات، لجان فنية لمتابعة التنفيذ، ومجلس استشاري من القطاع الخاص لضمان إشراك جميع الأطراف. وسيدعم ذلك نهج تدريجي مدعوم بآليات واضحة للرصد والتقييم عبر مؤشرات أداء رئيسية تقيس التقدم في مجالات التكامل التجاري، خفض التكاليف، وزيادة حصة المنطقة في السوق العالمية للهيدروجين الأخضر.

١١.١.٢ استراتيجيات التسعير المبدئية

يحدد تسعير الهيدروجين الأخضر من خلال مزيج معقد من العوامل، أبرزها تكاليف الإنتاج (الكهرباء، المياه، تكنولوجيا المحلات الكهربائية)، وتكاليف النقل والتخزين، إضافة إلى ديناميكيات الطلب العالمي والإقليمي. وتُعد مرونة الأسعار عنصرًا حاسمًا في قدرة أي دولة عربية على المنافسة في الأسواق العالمية، ولا سيما السوق الأوروبية التي تُعد الوجهة الرئيسية لصادرات المنطقة من الهيدروجين الأخضر.

١١.١.٣ تحليل تكاليف الإنتاج

تشير التقديرات إلى أن تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر في الدول العربية، ولا سيما في دول تمتلك وفرة من مصادر الطاقة المتجددة مثل مصر، السعودية، المغرب، والإمارات، تتراوح بين 3 – 2 دولارات للكيلوغرام في المرحلة الحالية. يعود ذلك إلى انخفاض تكلفة الكهرباء المتجددة (خاصة الطاقة الشمسية التي تصل في بعض المشروعات إلى أقل من 20 دولارًا / ميغاوات ساعة) مقارنة بمتوسطات عالمية أعلى.

١١.١.٤ تكلفه النقل والتخزين

تمثل تكاليف النقل البحري إلى أوروبا عنصرًا حاسمًا في تحديد السعر النهائي. تشير الدراسات إلى أن تكلفة الشحن البحري للهيدروجين – سواء في صورة سائلة أو على هيئة ناقلات مثل الأمونيا – تتراوح بين 1 – 0.5 دولار/كجم، مع اختلافات مرتبطة بالمسافات ونوع الناقل.

أما التخزين، وخاصة تخزين الهيدروجين السائل عند درجات حرارة منخفضة جدًا (-253 مئوية)، فيضيف تكاليف إضافية تتراوح بين (0.3, 0.5) دولار/كجم. ويمكن أن تنخفض هذه التكاليف تدريجيًا مع تطوير البنية التحتية الإقليمية وإنشاء محطات تصدير متخصصة ومشاركة بين عدة دول عربية.

١١.١.٥ استراتيجية التسعير المعتمدة على السوق

ينبغي أن تتبنى الدول العربية استراتيجية تسعير مرنة ومتدرجة، تراعي فروقات السوق الأوروبية. فالتقديرات الأولية تشير إلى أن أسعار صادرات الهيدروجين الأخضر إلى أوروبا ستتراوح بين 3.5 – 5 دولارات/كجم خلال العقد المقبل.

يمكن تعزيز القدرة التنافسية من خلال:

- تقديم أسعار أقل للعقود طويلة الأجل، ما يمنح المشتريين الأوروبيين استقرارًا في الأسعار ويضمن للمنتجين تدفقًا ماليًا مستدامًا
- اعتماد سياسة تسعير تفاضلية بحسب حجم الشحنات، حيث تُمنح أسعار مخفضة للأحجام الكبيرة
- التعاون مع الشركاء الأوروبيين في مشاريع البنية التحتية (مثل خطوط الأنابيب أو محطات الاستيراد) بما يقلل التكاليف التشغيلية ويزيد مرونة التسعير

حيث تتم مقارنة تكلفة الهيدروجين الأخضر مع (Carbon-linked Pricing) دراسة آليات التسعير المرتبط بالكربون 2024 في CO₂ تكلفة- الهيدروجين الرمادي مضافاً إليها سعر الكربون في الاتحاد الأوروبي (الذي تجاوز 70 يورو/طن).

١٢. تقدير الإيرادات بناءً على الحصة السوقية

يعد تقدير الإيرادات بناءً على الحصة السوقية خطوة أساسية لفهم الجدوى الاقتصادية للهيدروجين الأخضر، حيث يوضح حجم العوائد المحتملة ويعكس فرص النمو المتاحة في الأسواق العالمية.

١٢.١ تقدير الإيرادات

تمثل صادرات الهيدروجين الأخضر فرصة اقتصادية هائلة للدول العربية، بالنظر إلى قربها الجغرافي من أوروبا وامتلاكها موارد متجددة تنافسية.

- بحلول عام 2030: تشير التوقعات إلى إمكانية استحواذ الدول العربية مجتمعة على 5 – 10% من واردات أوروبا من الهيدروجين الأخضر، وهو ما يعادل نحو 1 – 2 مليون طن سنوياً. وبافتراض متوسط سعر يبلغ 4 دولارات/كجم، فإن العوائد المحتملة قد تصل إلى 4 – 8 مليارات دولار سنوياً.
- بحلول عام 2050: مع التوسع المتوقع في القدرة الإنتاجية وتطوير البنية التحتية الإقليمية (موانئ، خطوط أنابيب، محطات تحلية المياه، ومراكز لوجستية)، يمكن أن ترتفع الحصة السوقية العربية إلى 15 – 20% من الطلب الأوروبي، ما يعادل 4 – 6 ملايين طن سنوياً. وبناءً على نفس متوسط السعر (مع إمكانية ارتفاعه مع تضخم أسعار الكربون)، قد تتجاوز الإيرادات السنوية 16 – 24 مليار دولار.

وتعتمد هذه السيناريوهات على:

- حجم الاستثمارات المستدامة في مشاريع التحليل الكهربائي.
- تطوير شبكات نقل وتخزين إقليمية (هيدروجين سائل، أمونيا، أو وقود اصطناعي).
- توقيع عقود توريد طويلة الأجل مع شركات أوروبية كبرى في مجالات الصناعة والطاقة.
- الاستفادة من آليات التمويل الأخضر وصناديق المناخ لدعم تنافسية الصادرات.

١٣. الإطار المالي لمشروعات الهيدروجين الأخضر

يشكل الإطار المالي لمشروعات الهيدروجين الأخضر أساساً لتقييم الجدوى الاقتصادية وضمان استدامة التنفيذ. ويشمل ذلك تحليل التكاليف والتدفقات النقدية (Costs and Cash Outflows)، إلى جانب استراتيجيات التمويل والتمويل الاستثماري (Funding and Financing)، بما يعزز قدرة المشاريع على المنافسة في الأسواق العالمية.

١٣.١ التكاليف والتدفقات النقدية الخارجة

تمثل التكاليف والتدفقات النقدية الخارجة عنصراً أساسياً في تقييم الجدوى المالية لمشروعات الهيدروجين الأخضر، حيث تعكس حجم الالتزامات المطلوبة لضمان استمرارية المشروع وتنفيذه بكفاءة.

١٣.١.١ منشآت الإنتاج، التحليل الكهربائي، الطاقة المتجددة، إمداد وتنقية المياه

- تتضمن التكاليف الرأسمالية: المرتبطة بإنتاج الهيدروجين الأخضر بشكل أساسي الحصول على المحطات الكهربائية وتركيبها، ودمج مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح.

- **المحطات الكهربائية:** تختلف تكلفة المحطات الكهربائية، وهي التكنولوجيا الأساسية في إنتاج الهيدروجين الأخضر، اعتماداً على النوع والحجم. على سبيل المثال، تتراوح تكلفة المحطات الكهربائية ذات غشاء تبادل البروتون (PEM)، المعروفة بكفاءتها ومرونتها، بين 1400 دولار لكل كيلووات (kW) من السعة. لمنشأة كبيرة بسعة 100 ميجاوات (MW)، تتراوح التكلفة الرأسمالية من 50 مليون دولار إلى 120 مليون دولار.
- **البنية التحتية للطاقة المتجددة:** يعد دمج الطاقة الشمسية وطاقة الرياح أمراً بالغ الأهمية لتشغيل المحطات الكهربائية. يتكبد تطوير مزرعة شمسية بقدرة 200 ميجاوات، على سبيل المثال، تكاليف رأسمالية تتراوح بين 140 مليون دولار و200 مليون دولار، بالنظر إلى متوسط التكلفة الحالي البالغ 700 إلى 1000 دولار لكل كيلووات في مصر. بالإضافة إلى ذلك، تتكلف مشاريع طاقة الرياح عادة 1400 دولار لكل كيلووات، مما يزيد من الاستثمارات الرأسمالية الأولية.

١٣.١.٢ منشآت التخزين، تقنيات التخزين، وتوزيع البنية التحتية والتصدير.

تعد البنية التحتية للتخزين والتوزيع أيضاً مكونات مهمة للتكاليف الرأسمالية، لا سيما بالنظر إلى التحديات التقنية المرتبطة بتخزين الهيدروجين.

مرافق التخزين: يمكن تخزين الهيدروجين كغاز مضغوط أو في شكل سائل، ولكل منهما آثار تكلفة مختلفة. تبلغ تكلفة تخزين الغاز المضغوط حوالي 500 إلى 1000 دولار لكل كيلو غرام (كجم) من سعة التخزين، بينما يعتبر تخزين الهيدروجين السائل، الذي يتطلب ظروفاً مبردة، أكثر تكلفة عند 1000 إلى 2000 دولار لكل كيلو غرام.

البنية التحتية للتوزيع: تقدر تكلفة خطوط الأنابيب لتوزيع الهيدروجين بما يتراوح بين 1 إلى 2 مليون دولار لكل كيلومتر، اعتماداً على عوامل مثل التضاريس وسعة خط الأنابيب. يضيف إنشاء مرافق التصدير، لا سيما للنقل البحري، 50 مليون دولار إلى 150 مليون دولار أخرى إلى النفقات الرأسمالية، اعتماداً على حجم المشروع.

١٣.٢ التمويل

يمثل التمويل عنصراً أساسياً في نجاح مشاريع الهيدروجين الأخضر، حيث يساهم في توفير الموارد اللازمة لتطوير البنية التحتية، ودعم الاستثمارات طويلة الأجل، وتعزيز القدرة التنافسية في الأسواق العالمية.

١٣.٢.١ المنح والإعانات الحكومية

تلعب الحكومات في العديد من الدول دوراً محورياً في دعم وتمويل مشاريع الهيدروجين الأخضر من خلال أدوات متنوعة مثل المنح المباشرة، الإعانات، والحوافز الجمركية والضريبية، بما يخفف من الأعباء المالية ويشجع على الاستثمار في هذا القطاع الواعد. فعلى سبيل المثال، في مصر يتضح التزام الحكومة بتطوير الطاقة المتجددة من خلال مبادرات تقودها هيئة الطاقة الجديدة والمتجددة (NREA) ووزارة الكهرباء والطاقة المتجددة.

- **المنح الحكومية:** تقدم الحكومة المصرية منحاً وإعانات لمشاريع الطاقة المتجددة، بما في ذلك إنتاج الهيدروجين، ضمن استراتيجيتها الوطنية للطاقة. يمكن أن تغطي هذه المنح جزءاً كبيراً من التكاليف الرأسمالية لدمج الطاقة المتجددة وتركيب المحولات الكهربائية.

- **الحوافز الضريبية:** توفر مصر حوافز ضريبية لمشاريع الطاقة المتجددة، مما يمكن أن يقلل العبء الضريبي الإجمالي على مرافق إنتاج الهيدروجين، ويعزز جدوى المشروع.

٣.٢.٢ رأس المال المؤسسي ورأس مال الشركات

يعد القطاع الخاص مصدراً حاسماً لتمويل مشاريع الهيدروجين واسعة النطاق. يمكن أن يأتي الاستثمار من شركات الطاقة، وشركات الأسهم الخاصة، والتكتلات الصناعية المهتمة باقتصاد الهيدروجين.

- **الأسهم الخاصة ورأس المال الاستثماري:** تركز شركات الاستثمار المتخصصة في الطاقة المتجددة والبنية التحتية بشكل متزايد على الهيدروجين الأخضر كقطاع نمو. من المرجح أن يوفر هؤلاء المستثمرون تمويلاً بالأسهم والديون، لا سيما مقابل المشاركة في الإيرادات المستقبلية.
- **الاستثمار المؤسسي:** تستثمر شركات الطاقة متعددة الجنسيات، لا سيما تلك التي تركز على إزالة الكربون، في مشاريع الهيدروجين كجزء من انتقالها إلى طاقة أنظف. يمكن أن تجلب الشراكات مع هذه الشركات رأس مال كبيراً وخبرة فنية.

٣.٢.٣ الدعم الدولي: البنوك متعددة الأطراف وصناديق المناخ العالمية

تقدم المنظمات الدولية وبنوك التنمية متعددة الأطراف منحاً وقروضاً ميسرة للمشاريع التي تساهم في الأهداف البيئية العالمية، بما في ذلك تقليل انبعاثات الكربون من خلال إنتاج الهيدروجين الأخضر.

- **الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA):** تقدم IRENA دعماً مالياً لمشاريع الطاقة المتجددة، بما في ذلك إنتاج الهيدروجين، من خلال منصة تسهيل المشاريع الخاصة بها. يشمل هذا الدعم المنح والقروض والمساعدة الفنية.
- **البنك الدولي ومؤسسة التمويل الدولية (IFC):** يوفر البنك الدولي ومؤسسة التمويل الدولية تمويلاً لمشاريع البنية التحتية في الأسواق الناشئة، بما في ذلك تلك المتعلقة بالطاقة المتجددة والهيدروجين. تقدم هذه المؤسسات منحاً وقروضاً ميسرة، مع التركيز على التنمية المستدامة.
- **صندوق المناخ الأخضر (GCF):** يقدم صندوق المناخ الأخضر، الذي أنشئ لدعم التكيف مع المناخ والتخفيف من آثاره في البلدان النامية، منحاً وتمويلاً ميسراً للمشاريع التي تتوافق مع مهمته. مشاريع الهيدروجين الأخضر التي تساهم في تقليل الانبعاثات مؤهلة للحصول على تمويل من صندوق المناخ الأخضر.

١٤. التوصيات الاستراتيجية المصنفة حول الهيدروجين الأخضر في المنطقة العربية

١٤.١ التعاون الإقليمي والاستراتيجي

- تأسيس مجلس عربي للهيدروجين الأخضر ليكون منصة تنسيقية مركزية لتوحيد الجهود، تنسيق السياسات، والاستثمارات، وتطوير البنية التحتية العابرة للحدود.
- تعزيز الشراكات الاستراتيجية على المستويات المختلفة:
 - محلياً: بناء شراكات قوية بين الحكومات، القطاع الخاص، والمؤسسات الأكاديمية والبحثية؛ إنشاء حاضنات أعمال ومراكز ابتكار وطنية؛ دعم الشركات الناشئة والمشروعات الصغيرة والمتوسطة (SMEs) للمشاركة في سلاسل القيمة.

- إقليمياً وعبر الحدود: المشاركة في منصات عربية وإقليمية لتبادل المعرفة والخبرات؛ تطوير مشاريع بنية تحتية مشتركة مثل ممرات الهيدروجين الإقليمية وشبكات الربط الكهربائي والهيدروجيني؛ تشجيع شراكات ثلاثية (عربية – أوروبية – آسيوية) لتسهيل الوصول للأسواق العالمية.
- تطوير ممرات إقليمية ودولية لربط الدول العربية بمراكز الاستهلاك الأوروبية والآسيوية (على غرار مشروع SouthH2 Corridor)
- الاستفادة من البنية التحتية للغاز الطبيعي القائمة من خلال إعادة استخدامها لنقل الهيدروجين أو مزجه مع الغاز لتقليل التكاليف.
- تعزيز التعاون مع الاتحاد الأوروبي والشركاء الدوليين لجذب التمويل ونقل التكنولوجيا ودعم الدبلوماسية الطاقية.

١٤.٢. السياسات والتنظيم والتمويل

- اعتماد معايير موحدة لنقاء الهيدروجين، أنظمة السلامة، ومعايير النقل لتسهيل التجارة.
- وضع حوافز مالية واضحة ومستدامة مثل الإعفاءات الضريبية، الشهادات الخضراء، وبرامج الدعم الحكومي.
- تفعيل التمويل المدمج (عام + خاص + متعدد الأطراف) لدعم المشروعات الكبرى للهيدروجين والأمنيا.
- دمج الهيدروجين في المساهمات المحددة وطنياً (NDCs) لجذب تمويل المناخ وتحقيق أهداف خفض الانبعاثات.
- تطوير الأطر التنظيمية: سن تشريعات شاملة لتنظيم النقل، التخزين، والتوزيع؛ مواءمة القوانين والمعايير مع الأسواق المستوردة (خاصة الأوروبية).
- إنشاء صناديق وطنية وإقليمية للبحث والتطوير (R&D) لتحسين الكفاءة وخفض التكاليف.
- وضع مبادئ تسعير عادلة ومنصات شفافة لتبادل البيانات بين المنتجين والمستهلكين.

١٤.٣. التكنولوجيا والابتكار

- توسيع نشر المحطات الكهربائية: استخدام تقنية *ALK* للإنتاج واسع النطاق منخفض التكلفة، و *PEM* للتشغيل المرن مع الطاقة المتجددة.
- الاستثمار في تطوير تقنية *SOEC* عالية الكفاءة للصناعات كثيفة الطاقة.
- اعتماد أنظمة هجينة للتوليد والتحليل الكهربائي (*RO*) مع مبادلات ضغط لتقليل الضغط على الموارد المائية العذبة.
- إطلاق مشاريع تجريبية لتقنيات الناقلات العضوية السائلة (*LOHC*) والهيدروجين/الأمنيا للنقل لمسافات طويلة.
- تشجيع الابتكار المحلي وتعزيز التعاون بين الجامعات ومراكز البحوث والصناعة على مستوى الوطن العربي، بما يسهم في توطيد تصنيع معدات التحليل الكهربائي والخزانات والتقنيات الداعمة.

١٤.٤. البنية التحتية

- تطوير مراكز إقليمية للطاقة المتجددة والهيدروجين (مثل المنطقة الاقتصادية لقناة السويس في مصر، الأقاليم الجنوبية بالمغرب، الدقم بسلطنة عمان، ونيوم بالسعودية).
- تجهيز الموانئ العربية لتصبح موانئ هيدروجين عبر إنشاء مرافق للتخزين، التسييل، والتصدير وفق أعلى معايير السلامة.

- إنشاء مرافق تخزين تحت الأرض (الكهوف الملحية، حقول الغاز المستنفدة) لتأمين التوازن الموسمي.
- تخطيط سلاسل لوجستية متعددة الوسائط تشمل الأنابيب للتجارة الإقليمية، النقل البحري للتصدير، والطرق/السكك الحديدية للتوزيع المحلي.
- تشكيل لجنة متخصصة لدراسة إعادة استخدام خطوط الغاز الطبيعي القائمة لنقل الهيدروجين، عبر:
 - تقييم الجاهزية الفنية والأمنية.
 - إعداد خطط إعادة التأهيل والتعديل.
 - تقدير التكاليف والعوائد الاقتصادية مقارنة ببناء خطوط جديدة.
 - وضع إطار تنظيمي وتشغيلي لإدارة النقل بين الدول.
 - دراسة إمكانية إنشاء شبكة عربية للهيدروجين شبيهة بالشبكات الأوروبية.

١٤.٥. الاستدامة والبيئة

- الاعتماد على تحلية المياه بالطاقة المتجددة لتقليل استنزاف الموارد المائية العذبة.
- تطبيق مبادئ الاقتصاد الدائري: إعادة استخدام الرجيع الملحي، تدوير المواد والمعدات.
- تقليل المخاطر البيئية: مثل تسرب الهيدروجين، هشاشة المعادن، فقدان الغاز أثناء التخزين والنقل عبر أنظمة مراقبة حديثة.
- تقييم تأثيرات استخدام الأراضي لضمان التوازن بين مشروعات الطاقة المتجددة وحماية البيئة والزراعة.

١٤.٦. تطوير السوق والاندماج الصناعي

- إعطاء الأولوية لإنتاج الأمونيا الخضراء كمنتج استراتيجي لنقل الهيدروجين واستخدامه في الأسمدة.
- دعم استخدام الهيدروجين في الصناعات الثقيلة (الحديد والصلب، الأسمنت، التكرير) لتقليل الانبعاثات.
- إنشاء محطات وقود للهيدروجين لدعم النقل النظيف (الحافلات، الشاحنات، السفن).
- إطلاق شهادات ضمان منشأ عربية للهيدروجين الأخضر لتعزيز ثقة الأسواق العالمية.
- تعزيز موقع الموانئ العربية كمراكز لإعادة التصدير وإنشاء ممرات خضراء عربية-دولية.

١٤.٧. بناء القدرات ورأس المال البشري

- تأسيس مراكز تدريب إقليمية متخصصة في تقنيات الهيدروجين والسلامة والتشغيل.
- إدماج مناهج تعليمية عن الهيدروجين والطاقة المتجددة في الجامعات والمعاهد الفنية.
- تشجيع التصنيع المحلي للمعدات والتقنيات الأساسية لتقليل الاعتماد على الاستيراد.
- إطلاق برامج وظائف خضراء مرتبطة بمشاريع الهيدروجين العملاقة لتوفير فرص عمل مباشرة وغير مباشرة.

١٤.٨. مسارات الربط الإقليمي والدولي

• إقليمياً:

- تحديد مسارات الإمداد بين الدول العربية الغنية بالموارد (مثل مصر، المغرب، السعودية، عمان) والدول ذات الطلب المرتفع.
- الاستثمار في البنية التحتية اللوجستية (طرق، سكك حديدية، محطات تحلية) لدعم النقل الداخلي.
- تعزيز الربط الكهربائي العربي لتغذية وحدات التحليل الكهربائي.

• دولياً:

- ربط الدول العربية بمواني أوروبا (ألمانيا، هولندا، إيطاليا)، آسيا (اليابان، الصين، كوريا)، وأمريكا الشمالية.
- تطوير خطوط أنابيب دولية أو إعادة استخدام الخطوط القائمة.
- بناء بنية تحتية متخصصة للشحن البحري (ناقلات الأمونيا، الهيدروجين السائل، LOHC).
- مواجهة التحديات اللوجستية مثل تكاليف النقل والتخزين وإعادة التحويل.

١٤.٩. بناء القدرات والتسويق

- تنمية رأس المال البشري: برامج تدريبية متخصصة ومراكز إقليمية للبحث والتطوير.
- تسويق الهيدروجين العربي: إطلاق علامة موحدة باسم "الهيدروجين العربي الأخضر" للترويج عالمياً.
- تشجيع الاندماج الصناعي: استخدام الهيدروجين والأمونيا الخضراء في الزراعة والصناعات التحويلية لدعم الطلب المحلي وتعزيز سلاسل القيمة.

١٥. المراجع

- [1] فيوليا – بيان صحفي لمحطة حسيان SWRO بقدرة 818,000 م³/يوم؛ تفاصيل تتضمن استهلاك ~2.9 ك.و.س/م³.
<https://www.veolia.com/sites/g/files/dvc4206/files/document/2024/05/press-release-Hassyan-05132024.pdf>
- [2] هيئة كهرباء ومياه دبي (DEWA) – الإغلاق المالي لمحطة حسيان نيسان 2024، بقدرة 180 MIGD.
<https://www.dewa.gov.ae/en/about-us/media-publications/latest-news/2024/04/dewa-and-acwa-power-reach-financial-close>
- [3] شركة أكوا باور – مشروع الطويلة (200 MIGD ≈ 909,201 RO IWP م³/يوم).
<https://acwapower.com/en/projects/taweelah-ro-desalination-iwp/>
- [4] شركة أكوا باور/EWEC – بدء تشغيل المرحلة الأولى لمحطة الطويلة RO، أكبر محطة تحلية بالتناضح العكسي في العالم.
<https://www.acwapower.com/news/acwa-power-and-ewec-announce-the-start-of-operations-for-the-first-phase-of-al-taweelah-iwp-the-worlds-largest-reverse-osmosis-water-desalination-facility/>
- [5] شركة أكوا باور – مشروع رابغ-3 (600,000 IWP م³/يوم).
<https://acwapower.com/en/projects/rabigh-3-iwp/>
- [6] NOMAC – محطة رابغ-3 (600,000 م³/يوم).
<https://www.nomac.com/en/our-operations/nomac-globally-old/rabigh-3-iwp/>

- [7] IDOM – ملف مشروع رابغ-3. <https://www.idom.com/en/project/rabigh-3-seawater-desalination-plant-600000-m3-day/>
- [8] أكوا باور – تدشين محطة الجبيل-3A (جازلة) بقدرة 600,000 م³/يوم. <https://www.acwapower.com/news/acwa-power-inaugurates-jubail-3a-iwp-jazlah-water-desalination-company/>
- [9] NOMAC – حقائق عن محطة الجبيل-3A. <https://www.nomac.com/en/our-operations/nomac-globally/jubail-3a-iwp/>
- [10] GS Inima – الإغلاق المالي لمحطة الغبرة (300,000 م³/يوم). <https://inima.com/en/gs-inima-aljomaih-energy-water-and-sogex-oman-have-reached-financial-close-for-the-ghubrah-iii-desalination-plant-in-oman/>
- [11] GS Inima – صفحة مشروع الغبرة III. <https://inima.com/en/project/ghubrah-iii/>
- [12] عمان أوبزرفر – افتتاح محطة بركاء (100,000 م³/يوم). <https://www.omanobserver.om/article/1163274/business/economy/barka-v-desalination-plant-inaugurated>
- [13] عمان أوبزرفر – محطة بركاء 5 مدعومة بوحدة طاقة شمسية بقدرة 6.5 ميغاواط تغطي ~11% من الاستهلاك. <https://www.omanobserver.om/article/1167510/business/economy/solar-power-for-new-barka-5-desalination-plant-in-oman>
- [14] مجلة سمات ووتر – محطة أكادير/شتوكة (275,000→400,000 م³/يوم). <https://smartwatermagazine.com/news/smart-water-magazine/africas-largest-desalination-plant-be-built-morocco>
- [15] صندوق مصر السيادي – برنامج تحلية المياه (3.35 مليون م³/يوم بحلول 2025؛ 8.85 مليون م³/يوم بحلول 2050). <https://tsfe.com/pressDetails24.html>
- [16] صندوق مصر السيادي (PDF) – طرح التأهيل المسبق لنفس الأهداف. https://tsfe.com/development/public/uploads/press_pdfs/16836441272WtfjvrVPqNiRVlIjAP4p.pdf
- [17] محطة أم الحول للطاقة – توسعة بقدرة ~280,000 م³/يوم. <https://ummalhoul.net>
- [18] أكوا باور – محطة الدور IWPP II (البحرين) بقدرة ~227,000 م³/يوم. <https://acwapower.com/en/projects/al-dur2-iwpp/>
- [19] بنك الاستثمار الأوروبي (EIB) – مشروع محطة دوراليه SWRO في جيبوتي (45,000→22,500 م³/يوم). <https://www.eib.org/en/press/all/2023-261-global-gateway-eur-79m-eib-support-for-water-desalination-and-wastewater-treatment-in-djibouti>
- [20] اليونيسف/الاتحاد الأوروبي – اكتمال توسعة محطة تحلية غزة الجنوبية يونيو 2023. <https://www.unicef.org/sop/press-releases/eu-and-unicef-mark-completion-final-phase-expansion-southern-gaza-seawater>
- [21] رويترز – عقد محطة البصرة العملاقة SWRO (العراق). <https://www.reuters.com/sustainability/land-use-biodiversity/powerchina-wins-4-billion-contract-iraqi-water-desalination-plant-sources-say-2025-07-24/>
- [22] Aquatech – برنامج الجزائر للتحلية: 11 محطة SWRO بطاقة 5.8 مليون م³/يوم بحلول 2030. <https://www.aquatechtrade.com/news/water-security/algeria-water-security-tied-to-11-new-desalination-plants>
- [23] IWMI/FAO – مرجع مفتوح حول معالجة وإعادة استخدام المياه في المنطقة (ReWater-MENA). <https://rewater-mena.iwmi.org/wp-content/uploads/sites/13/2022/11/Water-reuse-in-the-Middle-East-and-North-Africa-A-sourcebook.pdf>
- [24] الأطلس العالمي للطاقة الشمسية – بيانات GHI/DNI لمنطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا. <https://globalsolaratlas.info/>
- [25] الأطلس العالمي لطاقة الرياح – خرائط الدول لسرعات الرياح عند 100 م. <https://globalwindatlas.info/>

- [26] الأطلس العالمي للطاقة الشمسية – بوابة تحميل بيانات الشرق الأوسط وشمال إفريقيا.
<https://globalsolaratlas.info/download/middle-east-and-north-africa>
- [27] جامعة DTU/هيئة الطاقة الجديدة والمتجددة المصرية (NREA) – موارد الرياح في خليج السويس (8~10.5 م/ث).
https://orbit.dtu.dk/files/123680166/Wind_resources_of_the_Gulf.pdf
- [28] الأطلس العالمي لطاقة الرياح – خرائط المغرب/عمان (الأطلسي ووظفار).
<https://globalwindatlas.info/>
- [29] مصدر – مشروع بنبان الشمسي (1.8~ غيغاواط).
<https://masdar.ae/en/renewables/our-projects/benban>
- [30] الوكالة المغربية للطاقة المستدامة (MASEN) – مجمع نور ورزازات للطاقة الشمسية.
<https://www.masen.ma/en/projects/solar/noor-ouarzazate>
- [31] ناريفا – مشروع مزرعة طرفاية للرياح.
<https://www.nareva.ma/en/project/wind-farm-tarfaya>
- [32] مصدر/TSK – مشروع ظفار لطاقة الرياح (50 ميغاواط).
<https://masdar.ae/en/masdar-clean-energy/projects/dhofar-wind-project>
- [33] مصدر – مشروع الظفرة للطاقة الشمسية الكهروضوئية (2 غيغاواط).
<https://masdar.ae/en/renewables/our-projects/al-dhafra-solar-pv>
- [34] توتال إنرجيز – بيان صحفي عن محطة الخرسة للطاقة الشمسية (800 ميغاواط).
<https://totalenergies.com/media/news/press-releases/Qatar-TotalEnergies-announces-the-startup-of-Al-Kharsaah-solar-plant>
- [35] توتال إنرجيز – صفحة مشروع محطة الخرسة.
<https://totalenergies.com/company/projects/solar/al-kharsaah-solar-power-plant-qatar>
- [36] البنك الدولي – مشروع الطاقة الحرارية الجوفية في بحيرة عسل (جيبوتي).
<https://projects.worldbank.org/en/projects-operations/project-detail/P162128>
- [37] هيئة كهرباء ومياه دبي – أقل تعرفه مياه محلاة مسجلة 0.38923 دولار/م³ لمحطة حصيان SWRO (مايو 2023).
<https://www.dewa.gov.ae/en/about-us/media-publications/latest-news/2023/05/dewa-receives-the-lowest-water>
- [38] نفس المرجع السابق (DEWA).
- [39] Saudi Gulf Projects – خبر تقديم أقل عطاء لمحطة الجبيل-3A IWP (مارس 2020).
<https://www.saudigulfprojects.com/2020/03/acwa-power-led-consortium-submitted-lowest-bid-for-jubail-3a-iwp/>
- [40] MEED – اختيار العارض المفضل لمحطة الدور II IWPP في البحرين (أكتوبر 2018).
<https://www.meed.com/bahrain-selects-preferred-bidder-al-dur-2-iwpp>
- [41] Nama Power & Water Procurement – التعرف المصرح بها (Bulk Supply Tariffs).
<https://omanpwp.om/planning-economics>
- [42] JICA – تقرير الدراسة التحضيرية لمشروع محطة معالجة مياه الصرف في قابس (تونس).
https://www.jica.go.jp/english/about/policy/environment/id/middle_east/a_b_fi/tunisia/_ics_Files/afieldfile/2025/01/07/186_Preparatory_Survey_Volume_01.pdf
- [43] Enterprise Egypt – تقرير عن التكلفة البيئية لتحلية المياه في مصر (أغسطس 2023).
<https://enterprise.news/egypt/en/news/story/1cf51e74-0e87-4120-9615-e08f8581ecf1/what%25e2%2580%2599s-the-environmental-cost-of-desalination%3F>
- [44] البنك الدولي – "تحلية المياه باستخدام الطاقة المتجددة: حل ناشئ لسد فجوة المياه في الشرق الأوسط وشمال إفريقيا" (2012).
<https://documents1.worldbank.org/curated/en/443161468275091537/pdf/730700PUB0EPI001200pub0date09026012.pdf>
- [45] O.K.M., Ouda. – مراجعة تعرفه المياه البلدية في السعودية (2013).
<https://scispace.com/pdf/review-of-saudi-arabia-municipal-water-tariff-3q2opt5szi.pdf>

- [46] نفس المرجع (Ouda) – نسخة منشورة على ResearchGate
https://www.researchgate.net/publication/262202288_Review_of_Saudi_Arabia_Municipal_Water_Tariff
- [47] W.K. Al-Zubari. – "تكاليف إمداد المياه البلدية في البحرين". معهد تشاتام هاوس (2014).
https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/field/field_document/20141216MunicipalWaterBahrainAlZubari.pdf
- [48] هيئة تنظيم الخدمات العامة في عُمان – التعرف المصريح بها.
<https://apsr.om/en/tariffs>
- [49] F. Ben Jemaa. – "التحلية في تونس: التجربة الماضية وآفاق المستقبل" (2015).
https://www.researchgate.net/publication/263522295_Desalination_in_Tunisia_Past_experience_and_future_prospects
- [50] S. Abdel-Gawad. – "صناعة تحلية المياه في مصر" (2015).
https://www.researchgate.net/publication/237255021_WATER_DESALINATION_IN_EGYPT
- [51] R. Anderson & D. McCauley. – "تعرفة المياه في الشرق الأوسط وشمال إفريقيا".
https://www.researchgate.net/figure/Water-Tariffs-in-the-Middle-East-and-North-Africa_fig1_277308578
- [52] Hydrogen Europe – دراسة جدوى حول "ممر الهيدروجين" بين إفريقيا وأوروبا (أغسطس 2025).
<https://hydrogeneurope.eu/feasibility-study-completed-for-hydrogen-corridor-linking-africa-to-europe/>
- [53] Frontiers – مقال: "المد الأخضر: قناة السويس كمركز رئيسي للهيدروجين الأخضر بين الشرق الأوسط وأوروبا" (فبراير 2025).
<https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2025.1538792/full>
- [54] Atomfair – "مراكز الهيدروجين الأخضر في الشرق الأوسط".
<https://atomfair.com/hydrogen-primer/article.php?id=G84-1628>
- [55] منظمة الهيدروجين الأخضر – "موريتانيا: إطار استراتيجي جديد للهيدروجين الأخضر".
<https://gh2.org/countries/mauritania/>
- [56] المفوضية الأوروبية (n.d.). استراتيجية الهيدروجين في الاتحاد الأوروبي في إطار الصفقة الخضراء الأوروبية. Available at: <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/eu-policy/eu-hydrogen-strategy-under-eu-green-deal>
- [57] تقرير NREL (2024) يعطي أرقام تصنيع/تكلفة مُحَدَّثَة ويعرض سيناريوهات حيث تظهر أرقام مثل ~\$812/kW أو ~\$1,000/kW حسب معدل التصنيع والمقترضات — يمكن استخدامها لحساب CAPEX لمشروعات بحجم 100 MW
<https://docs.nrel.gov/docs/fy24osti/87625.pdf>
- [58] مراجعة IEA (Global Hydrogen Review 2024) تشير إلى أن أرقام تكاليف المحطات قد تَمَّت مراجعتها للأعلى مؤخراً وتعتمد كثيراً على بيانات مشاريع فعلية. عند استخدام قيم IEA الأحدث قد تحسلي على أرقام CAPEX أعلى من النطاق 50–120 IEA Analysis - IEA 2024 – Executive summary
- [59] مراجعة علمية تجمع دراسات كثيرة (MDPI، 2023) تذكر تقديرات حول ~\$500–600/كجم كسعر رأسمالي لمكونات خزن معينة في بعض التحليلات. هذه مراجعة مفيدة تعرض نطاقات أوردتها دراسات سابقة. A Review on the Cost Analysis of Hydrogen Gas Storage Tanks for Fuel Cell Vehicles
- [60] ملخصات وأوراق قطاعية (مثل مراجعات تقنيات التخزين وملخصات Hydrogen Council و مصادر تحليلية أخرى) تشير إلى أن التكلفة الرأسمالية قد تتراوح تقريباً من ~\$500 إلى ~\$1,500 لكل كجم سعة حسب التقنية (LOHC, LH2، مكثف مبرد، خزانات ضغط، أو تخزين تحت الأرض). (ملخصات سوقية تناقش نطاقات رأسمالية مماثلة). Green hydrogen storage: Technologies and economic perspectives
- [61] Ahmed, A. et al. (2025) 'Solid oxide electrolysis for hydrogen production: Advances and challenges', *International Journal of Hydrogen Energy*.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.038>
 (From: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319925000382>)

- [62] Al-Saidi, M. and Hussein, H. (2022) 'Hydrogen energy transition in the Middle East and North Africa: Prospects and challenges', *Energy Reports*, 8, pp. 12455–12466. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.162>.
(From: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1875510022002979>)
- [63] Carnegie Endowment for International Peace (2024) *Morocco and Oman's energy transition: Oil exporting to renewable futures*. Available at: <https://carnegieendowment.org/research/2024/05/morocco-oman-energy-transition-oil-exporting-renewable>
- [64] Department of Energy & Climate Change (2023) *Hydrogen transport and storage cost report*. Available at: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/659e600b915e0b00135838a6/hydrogen-transport-and-storage-cost-report.pdf>
- [65] European Clean Hydrogen Alliance (2023) *Updated buildings roundtable report on hydrogen readiness*. European Commission. Available at: https://single-market-economy.ec.europa.eu/document/download/607b5657-14f1-4d37-9e4b-355a15a89543_en
- [66] European Hydrogen Backbone (2023) *EHB final design report, 20 November 2023*. Available at: <https://ehb.eu/files/downloads/EHB-2023-20-Nov-FINAL-design.pdf>
- [67] Grand View Research (2023) *Green hydrogen market outlook: Europe*. Available at: <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/green-hydrogen-market/europe>
- [68] International Energy Agency (2021) *Global hydrogen review 2021*. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>
- [69] International Energy Agency (2021) *Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector*. Available at: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- [70] International Energy Agency (n.d.) *Hydrogen – Low-emission fuels*. Available at: <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>
- [71] Martínez, S. et al. (2023) 'Review of hydrogen compression technologies for large-scale applications', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 113049. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113049>.
(From: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032123002174>)
- [72] McDaniel, A. (2023) *Hydrogen program review presentation*. U.S. Department of Energy. Available at: https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/review23/ia004d_mcdaniel_2023_o-pdf.pdf
- [73] Oxford Institute for Energy Studies (2023) *Hydrogen pipelines vs. HVDC lines*. Available at: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2023/11/ET27-Hydrogen-pipelines-vs.-HVDC-lines.pdf>
- [71] Transition Accelerator (2023) *Hydrogen compression: Technical brief 1.1*. Available at: https://transitionaccelerator.ca/wp-content/uploads/2023/04/TA-Technical-Brief-1.1_TEEA-Hydrogen-Compression_PUBLISHED.pdf
- [74] U.S. Department of Energy (n.d.) *Hydrogen safety factsheet*. Available at: https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/h2_safety_fsheets.pdf
- [75] U.S. Department of Energy (n.d.) *Hydrogen storage*. Available at: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>
- [76] World Economic Forum (2023) *Oman: Clean green hydrogen and renewables*. Available at: <https://www.weforum.org/stories/2023/08/oman-clean-green-hydrogen-renewables> (Accessed: 25 September 2025).
- [77] Zhang, Y. et al. (2023) 'Emerging trends in green hydrogen pathways', *Energy Reports*, 9, pp. 1123–1138.

<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.02.013>.
 (From: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772826923000135>)

[78] National Energy Agency (IEA) (2019) The Future of Hydrogen. Paris: IEA. Available at: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2019/06/the-future-of-hydrogen_2d59d5dd/1e0514c4-en.pdf (Accessed: 26 September 2025).

[79] IEA (2024) Global Hydrogen Review 2024. Paris: International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>

[80] Abdin, Z., Khalil pour, K. & Catchpole, K. (2022) 'Projecting the levelized cost of large-scale hydrogen storage for stationary applications', Energy Conversion and Management, 270, 116241.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116241>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890422010184>

[81] IEA (2021) Global Energy Review 2021. Paris: International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021>

[82] https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf.

[83] Sgarbossa, F., Arena, S., Tang, O., & Peron, M. (2023). Renewable hydrogen supply chains: A planning matrix and an agenda for future research. International Journal of Production Economics, 255, 108674.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108674>

[84] KAPSOM Green Ammonia, <https://www.kapsom.com/wp-content/uploads/2024/01/kapsom-green-ammonia.pdf>

[85] IEA report, The Future of Hydrogen:
 Available at: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

[86] Global horizontal irradiation:
 Available at: <https://globalsolaratlas.info/download/world>

[87] Global Wind Atlas:
 Available at: <https://globalwindatlas.info/en/>

[88] IEA report, The Future of Hydrogen:
 Available at: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> [85]

[89] IKEM, BOWE2H Strategic Roadmap: Offshore wind and power-to hydrogen in the Baltic Sea Region:
 Available at: <https://www.ikem.de/wp-content/uploads/2024/09/240916-BOWE2H-Strategic-Roadmap.pdf>

[90] DNV Report, Building a marine supply infrastructure as part of a future hydrogen society, Building a marine supply infrastructure as part of a future hydrogen society - Industry insights:
 Available at: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Building-a-marine-supply-infrastructure-as-part-of-a-future-hydrogen-society/>

[91] SouthH2 Corridor:
 Available at: <https://www.south2corridor.net/>

[92] Dinh, Q. V., Pereira, P. H. T., Nagle, A. J., & Leahy, P. G. (2024). Levelised cost of transmission comparison for green hydrogen and ammonia in new-build offshore energy infrastructure: Pipelines, tankers, and HVDC. International Journal of Hydrogen Energy, 62, 684-69
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.066> .

[93] Weichenhain, Uwe, "Hydrogen transportation | The key to unlocking the clean hydrogen economy", Roland Berger GmbH, Brussels 2021.

[94] Forbs, Hydrogen Risks Being The Great Missed Opportunity Of The Energy Transition:

Available at: <https://www.forbes.com/sites/sverrealvik/2022/06/24/hydrogen-risks-being-the-great-missed-opportunity-of-the-energy-transition/>