أكاديمية أنور قرقاش الدبلوماسية
ANWAR GARGASH DIPLOMATIC ACADEMY

Centre for Climate Diplomacy

جهود تنويع مصادر الطاقة في دول مجلس التعاون الخليجي: مسارات السياسات الخاصة بالهيدروجين النظيف

الدكتور جيم كراني

حقوق النشر: أكاديمية أنور قرقاش الدبلوماسية 2025

بيان إخلاء المسؤولية: الآراء الواردة في هذه الوثيقة تُعبّر عن رأي المؤلف فقط ولا تعكس بالضرورة وجهة نظر أكاديمية أنور قرقاش الدبلوماسية، باعتبارها جهة اتحادية مستقلة، وكذلك لا تُعبّر عن وجهة نظر حكومة دولة الإمارات العربية المتحدة.

أغسطس 2025

المؤلفون:

الدكتور جيم كراني

باحث غير مقيم في مركز الدّبلوماسيّة المناخية بأكاديمية أنور قرقاش الدّبلوماسيّة. الدكتور جيم كراني هو أيضًا زميل والاس س. ويلسون لدراسات الطاقة في معهد بيكر للسياسات العامة التابع لجامعة رايس في هيوستن بالولايات المتحدة الأمريكية. وهو متخصص في الشؤون الجيوسياسية للطاقة، مع تركيز خاص على الدول المصدرة للنفط والتحديات التي تواجهها في دعم الطاقة والاستهلاك المحلي وتغير المناخ. الدكتور كرين هو مؤلف كتابين وهما --- City of Gold: Dubai and the Dream of Capitalism and Energy Kingdoms: Oil and Political Survival in the Persian Gulf. وأمضى ما يقرب من 20 عامًا كصحفي؛ ستة منها في الشرق الأوسط، وحصل على درجة الدكتوراه من جامعة كامبريدج.

ملخَّص:

تمتلك منطقة الخليج والشرق الأوسط ككل بعضًا من أفضل الميزات العالمية لاقتصادات الهيدروجين، بما في ذلك الأراضي الشاغرة ورأس المال الاستثماري والجيولوجيا المثالية تحت الأرض والمناطق الصناعية المجمعة والمواهب الهندسية وأشعة الشمس الغزيرة التي يمكن تحويلها إلى كهرباء نظيفة. وهذه السمات تجعل منطقة الخليج من أرخص الأماكن في العالم لإنتاج الهيدروجين.

- الشرق الأوسط هو فعلًا مستهلك ومنتج كبير للهيدروجين الرمادي. ومع ذلك، لا تزال تكلفة احتجاز الكربون وتخزينه (CCS) والهيدروجين الأخضر مرتفعة للغاية مقارنة بالبدائل. وقد أعاق مشاريع الهيدروجين النظيف في المنطقة نقص الدعم الحكومي للاستثمار، مقارنة بالمناطق الأخرى التي قدمت إعانات وأطر تشريعية لتهيئة الأجواء أمام الاستثمار في هذا المجال.
- بالإضافة إلى ذلك، تخلق التطورات في التكنولوجيا المنافسة شكوكًا حول الطلب والأسواق الأكثر ملاءمة. تبحث هذه النظرة التحليلية بيئة الاستثمار والسياسات في الخليج نحو توفير حاضنة لقطاع الهيدروجين للاستهلاك المحلي والتصدير. وتشير الورقة البحثية إلى أنه على المدى البعيد، يجب التخلص من الكربون من أربعة قطاعات رئيسية للطاقة للوصول إلى الحياد الكربوني، وهي قطاعات توليد الطاقة والمباني والصناعة والنقل.
- تُوضِّح النظرة التحليلية أن مزايا الهيدروجين تشمل قدرته على العمل كبديل "جاهز" للوقود الهيدروكربوني عالي الانبعاثات. وتعني هذه القدرة أن قطاعات مثل الصناعات الثقيلة والنقل التجاري بالشاحنات والسكك الحديدية والشحن والطيران هي أسواق رئيسية محتملة.
- أخيراً، ونظراً للسمات الفريدة التي تتصف بها المنطقة لإنتاج الهيدروجين والفوائد المحتملة للتنويع بالنسبة للدول والشركات المعتمدة على المواد الهيدروكربونية في عالم يتزايد فيه التوجه نحو التخلص من الكربون، نقترح ثلاث توصيات رئيسية في مجال السياسات لزيادة إنتاج الهيدروجين في المنطقة:
  - أولاً:- التنظيم المدروس وربما الاستثمار أو الإعانات - والقيام بتجارب تعاقدية حتى يتم العثور على نموذج مفيد، مثل الخطة المطبقة في عُمان.
  - ثانياً:- التركيز على الأسواق المحلية أولاً، نظراً للاستهلاك الكبير الموجود مسبقاً للهيدروجين الرمادي في التكرير والأسمدة (الصناعات الثقيلة). يمكن إزالة الكربون من هذا القطاع أولاً؛ لأن قطاع النقل بالشاحنات والشحن والصناعات الأخرى تحتاج إلى مزيد من الوقت للوصول إلى مستويات مناسبة من الطلب.
  - أخيراً:- يجب على الحكومات في الخليج أن تتبنى المزايا الاستراتيجية لتكون في صدارة الاستثمار في هذا المجال. وتوفر الاستثمارات الرائدة التي تقوم بها الدولة إشارات وضمانات استثمارية مفيدة للقطاع الخاص والمستثمرين الأجانب.

تفاصيل الموضوع:

يبرز الهيدروجين النظيف كمصدر طاقة محتمل يوفر مسارًا بديلًا بين "ترك النفط في الأرض" و"عدم القيام بأي شيء" بشأن تغير المناخ، بالنسبة لمنتجي النفط والغاز الطبيعي. ويمكن أن يتم إنتاج الهيدروجين بأقل قدر من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، وقد يسد الوقود النظيف الاحتراق خانات مهمة في إزالة الكربون. من بين الدول التي تتبنى الهيدروجين النظيف دول مجلس التعاون الخليجي، التي أعلنت معظمها عن جهود كبيرة للإنتاج التجاري للهيدروجين من خلال عمليتين لا تنبعث منها انبعاثات أو منخفضة الانبعاثات: عن طريق تحويل الهيدروكربونات وعزل ثاني أكسيد الكربون - المعروف غالباً باسم الهيدروجين "الأزرق" - أو باستخدام الطاقة المتجددة لتحليل المياه كهربائياً، والمعروف باسم الهيدروجين "الأخضر".

في منطقة دول مجلس التعاون الخليجي، يعالج الهيدروجين خمس أولويات متزامنة على الأقل في جانب السياسات:

- استمرار تدفق إيرادات الاحتياطيات الهيدروكربونية.
- الحد من الانبعاثات الجوية الناتجة عن استهلاك تلك الموارد.
- الحفاظ على الأسواق من خلال تقديم أنواع وقود بديلة يمكن أن "تتناسب" مع التكنولوجيا الحالية.
- الاستفادة من المزايا النسبية لشبه الجزيرة العربية المتمثلة في الأراضي الشاغرة والتخزين الجيولوجي وأشعة الشمس.
- تعزيز إزالة الكربون من القطاعات غير الملائمة للكهرباء أو طاقة البطاريات.

تجد منطقة الخليج نفسها في موقف صعب إزاء التغير المناخي. فمناخ شبه الجزيرة العربية القاسي أصلاً والطقس الذي تتزايد حدته في دول مجلس التعاون الخليجي يضع هذه الدول في طليعة الدول التي تعاني من أضرار المناخ، وفي الوقت ذاته يهدد العمل المناخي تدفق إيرادات النفط التي تقف وراء ازدهار المنطقة. لذلك تحتاج دول الخليج إلى نجاح العمل المناخي، ويفضل أن يكون ذلك دون التأثير على اقتصاداتها.

يُنظر إلى الهيدروجين الأزرق منخفض الكربون على أنه استراتيجية التخفيف الأقل احتمالاً أن تسبب تعطل الأصول في قطاعات النفط المحلية، لا سيما في البلدان التي لديها احتياطيات يمكن أن تستمر في الإنتاج بالمستويات الحالية لعدة عقود. على هذا النحو، توفر المشاريع في مجال الهيدروجين الأزرق إمكانية الحفاظ على الاقتصادات السياسية القائمة على النفط مع السعي في الوقت نفسه إلى تحقيق أهداف "الحياد الكربوني" في المستقبل. وتشمل الأهداف الوطنية للحياد الكربوني الأهداف التي وضعتها دولة الإمارات العربية المتحدة وسلطنة عمان (2050) والمملكة العربية السعودية والكويت والبحرين (2060). قطر هي الدولة الخليجية الوحيدة التي لا تملك مثل تلك الأهداف.

الهيدروجين ليس مجرد إستراتيجية للحفاظ على إيرادات النفط والغاز. فمن نواحٍ عديدة، يلعب الهيدروجين دوراً مكملاً - وليس منافساً - للكهرباء المولدة من الطاقة المتجددة. وهو أداة لإزالة الكربون مناسبة تمامًا للقطاعات التي لا يمكن تشغيلها من خلال الكهربة الخالية من الكربون، مثل الحرارة الصناعية في صناعات الصلب أو الصناعات الكيميائية أو النقل التجاري الثقيل مثل الطيران والسكك الحديدية والشاحنات والشحن البحري. بل ويمكن للهيدروجين أن يغذي حتى توليد الطاقة الحرارية التي لا تعتمد على الطقس، مما يوفر دعمًا لمصادر الطاقة المتجددة. وتمتلك منطقة الخليج والشرق الأوسط ككل بعضًا من أفضل الميزات العالمية لاقتصادات الهيدروجين، بما في ذلك الأراضي الشاغرة ورأس المال الاستثماري والجيولوجيا المثالية تحت الأرض والمناطق الصناعية المجمعة والمواهب الهندسية وأشعة الشمس الغزيرة التي يمكن تحويلها إلى كهرباء نظيفة. وهذه السمات تجعل منطقة الخليج من أرخص الأماكن في العالم لإنتاج الهيدروجين.

رغم ما سبق، تبدد بعض الزخم الأخير حول الهيدروجين في دول مجلس التعاون الخليجي، وبدأت تظهر نظرة أكثر واقعية. فالهيدروجين النظيف واحتجاز الكربون وتخزينه عمليتان مكلفتان وتستهلكان طاقة كثيفة، وليس الكثير من العملاء لديهم الرغبة لدفع فارق سعري كبير للهيدروجين النظيف إذا لم تكن هناك عقوبات على استخدام الوقود الحالي. وقال الرئيس التنفيذي لأرامكو السعودية أمين الناصر عن الهيدروجين الأخضر في عام 2023: "تتراوح تكاليف الإنتاج اليوم بين 200 إلى 400 دولار لما يعادل برميل النفط، ولهذا السبب يصعب الحصول على اتفاقيات شراء تجارية".[1] وعلاوة على ذلك، من الصعب استبدال الطاقة أو الإيرادات المستمدة من قطاع النفط والغاز الهائل - أحد أكبر القطاعات العالمية إلى

جانب قطاعي الأغذية وتجارة التجزئة - ولكن يمكن أن يكون الهيدروجين بمثابة أداة تحوط مكملة، حيث من المحتمل أن يتناسب الطلب عليه عكسيًا مع الطلب على النفط والغاز في قطاعي النقل والصناعة.

تبحث هذه النظرة التحليلية بيئة الاستثمار والسياسات في الخليج نحو توفير حاضنة لقطاع الهيدروجين للاستهلاك المحلي والتصدير.

الهيدروجين وقرينه، احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه

لطالما أعرب المديرون التنفيذيون في قطاع النفط والغاز عن شكوكهم بشأن الاستثمار في الطاقة المتجددة، والطاقة الشمسية وطاقة الرياح على وجه الخصوص، بسبب التقطّع في إنتاج الطاقة وعدم ملاءمتها لبعض الاستخدامات- لا سيما قطاع النقل الذي يهيمن عليه النفط، حيث يتنافس استخدام الكهرباء لتشغيل المركبات مباشرةً مع مصدر الطلب الأساسي على النفط. وكذلك لا تتوافق الخبرة الهندسية والتجارية المطلوبة لمصادر الطاقة المتجددة مع إنتاج المواد الهيدروكربونية. ولعل العامل الأكثر أهمية هو انخفاض معدل العائد عند مقارنته بالاستثمار في النفط والغاز.[2] بالنسبة للدول التي تعتمد على صادرات النفط لتمويل ميزانياتها الوطنية، يُنظر إلى استثمارات الطاقة المتجددة على أنها غير كافية عندما يتعلق الأمر بهوامش الربح السخية من بيع احتياطيات النفط منخفضة التكلفة. وأخيراً، يوفر النفط والغاز فرصاً أبسط بكثير للتصدير مقارنة بالكهرباء، التي لا يمكن بيعها عملياً خارج حدود البلدان المجاورة.[3]

بالنسبة لقادة مؤسسات النفط، يوفر الهيدروجين واحتجاز الكربون وتخزينه نقاط التقاء أوسع مع نموذج العمل القائم. وبما أنه كان يتم توليد الهيدروجين من خلال تحويل الوقود الأحفوري لعقود من الزمن دون احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه، فإن التعديلات على عملية الهيدروجين المعروفة توفر مسارًا متوافقًا مع المناخ وتحافظ على إنتاج وقيمة الاحتياطيات الهيدروكربونية.[4] ويظل نموذج العمل الخاص بالتوريد المستمر للمواد الهيدروكربونية قائمًا.

احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه عامل رئيس في هذا التحول. أولاً، يوفر احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه الجزء "النظيف" من إنتاج الهيدروجين من الهيدروكربونات عن طريق تفتيت نفايات ثاني أكسيد الكربون الناتج عن تكسير الوقود الأحفوري إلى الأجزاء المكونة له. على سبيل المثال، يعتمد إنتاج الهيدروجين الأزرق على "إصلاح" أو فصل الميثان أو النافثا إلى هيدروجين وثاني أكسيد الكربون، وعزل الكربون بشكل دائم.[5] ثانيًا، احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه مكلف وكثيف الاستهلاك للطاقة وغير اقتصادي بدون دعم أو قيود حكومية على الكربون. ويُنظر إلى تعزيز إنتاج الهيدروجين النظيف على أنه أمر استراتيجي بما فيه الكفاية بالنسبة للعديد من الحكومات لدعم تطوير قدرات احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه.[6]

كان حوالي ثلث المشاريع العالمية لاحتجاز الكربون وتخزينه التي تم إطلاقها في عام 2023 تتعلق بإنتاج الهيدروجين أو الأمونيا منخفضة الكربون. في جميع أنحاء العالم، تم تزويد حوالي 15 محطة لتوليد الهيدروجين في جميع أنحاء العالم بمحطات احتجاز الكربون حتى أواخر عام 2024. وكان معظم هذه المحطات في مصافي التكرير ومصانع الأسمدة في أمريكا الشمالية، حيث تم حقن حوالي مليون طن سنويًا من ثاني أكسيد الكربون المحتجز في أماكن تخزين دائمة، بينما يُستخدم الباقي في الاستخلاص المعزز للنفط أو في المشروبات الغازية أو الصوبات الزراعية.[7] والجدير بالذكر أن معدلات الاحتجاز في حوالي نصف هذه المحطات كانت منخفضة للغاية لدرجة لا تتيح للجهات التنظيمية تصنيف الهيدروجين المنتج على أنه منخفض الانبعاثات.

حاجز التكلفة

عند الحديث عن دول الخليج، التي تمتلك ما يقرب من سدس الاحتياطي العالمي من الغاز الطبيعي، فإن إنتاج الهيدروجين منخفض الكربون من الغاز الطبيعي مع احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه له أهمية كبيرة. ولكن تكلفة احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه هي سبب كبير في صعوبة القيام بذلك. فلا الهيدروجين "الأزرق" ولا الهيدروجين "الأخضر" الناتج من التحليل الكهربائي للمياه الذي يعمل بالطاقة المتجددة قادر على المنافسة من حيث التكلفة مع الهيدروجين التقليدي غير المطفأ أو "الرمادي".

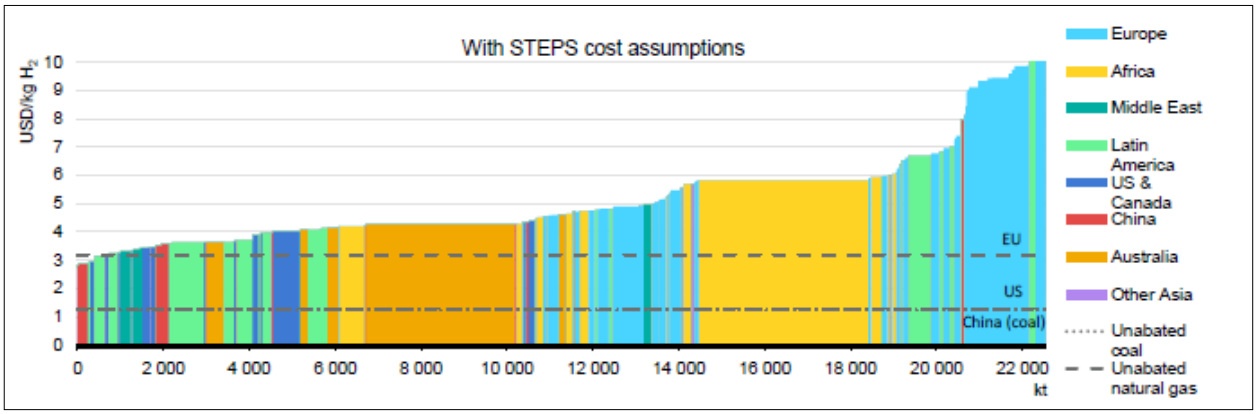
هناك حاجة إلى كميات كبيرة من الطاقة لتوليد الحرارة لأكثر تقنيات إنتاج الهيدروجين شيوعًا، والمعروفة باسم إصلاح الميثان بالبخار (SMR) أو إصلاح النافثا بالبخار، وهي عملية تفصل الهيدروجين عن الميثان أو النافثا، وهو أحد مشتقات النفط. وهناك حاجة إلى طاقة أكثر لاحتجاز وضغط ونقل وضخ نفايات الكربون تحت الأرض. إذا كان الهيدروجين المنتج سيتم تصديره، فقد يتعين أن يخضع لتحويل آخر، على الأرجح إلى أمونيا (أو ميثانول) وهو ما يتطلب مدخلات طاقة

إضافية. وإذا كان من المقرر إعادة تحويل الأمونيا أو الميثانول إلى هيدروجين عند نقطة الاستخدام، فإن احتياجات الطاقة تزداد أكثر. ويؤدي تجميع الكثير من مدخلات الطاقة إلى تقليل إجمالي الناتج، من حيث الطاقة القابلة للاستخدام في نهاية العملية.

مع ذلك، إذا كان الهيدروجين القائم على احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه مكلفًا، فإن استخدام الكهرباء المتجددة لتحليل الماء كهربائيًا وفصل محتوى الهيدروجين - الهيدروجين الأخضر - أكثر تكلفةً. التحويل إلى أمونيا قابلة للنقل وتكاليف إعادة التحويل مماثلة لتكاليف الهيدروجين الأزرق. والأهم من ذلك أن الهيدروجين الأخضر يمكن إنتاجه بدون مواد هيدروكربونية، مما يجعله مجديًا في البلدان التي لديها موارد متجددة وفيرة.

تقدر وكالة الطاقة الدولية أن إنتاج الهيدروجين المتجدد (الأخضر) أو الهيدروجين الأحفوري المخفف (الأزرق عادة) أعلى تكلفة بما يتراوح بين 1.5 وست مرات من الهيدروجين الأحفوري غير المخفف (الرمادي)، والأسعار المعروضة هي أضعاف أسعار الغاز الطبيعي أو الوقود القائم على النفط. الهيدروجين غير المشتق من الغاز الطبيعي (الرمادي) في الولايات المتحدة والهيدروجين المشتق من الفحم (البني) في الصين، تراوحت تكلفته بين دولار واحد و2 دولار للكيلوغرام الواحد في عام 2024. وتؤدي إضافة احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه إلى رفع السعر بحوالي 0.50 دولار/كجم، ليتراوح بين 1.50 دولار و2.50 دولار/كجم. بحلول عام 2030، يمكن أن تؤدي وفورات الحجم والكفاءات الأخرى إلى خفض التكلفة إلى حد ما. وفي الوقت نفسه، يمكن إنتاج الهيدروجين (الأخضر) المتجدد في الشرق الأوسط، وكذلك أجزاء من الصين وأمريكا الجنوبية (تشيلي) الذي يكلف الآن حوالي 5-4 دولارات للكيلوغرام الواحد، يمكن إنتاجه بسعر يتراوح بين 3 إلى 3.50 دولار للكيلوغرام بحلول عام 2030، حيث يصبح الإنتاج أكثر كفاءة. قد يصل سعر الهيدروجين المتجدد في المناطق الأقل ملاءمة مثل أوروبا إلى ما بين 8 إلى 10 دولارات للكيلوغرام الواحد (الشكل 1).[8]

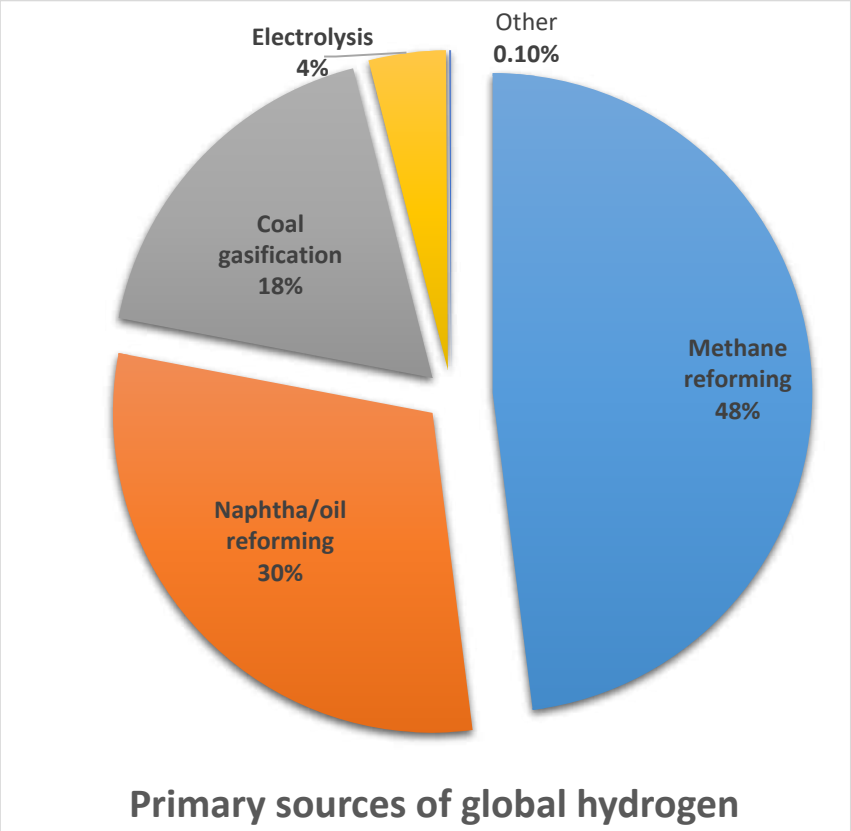
في ضوء هذه النفقات، يتطلب الهيدروجين سياسات مساعدة لإنتاجه: إما إعانات لجعله منافساً للبدائل الأرخص، أو فرض قيود على انبعاثات الكربون مثل فرض ضريبة للكربون. وبما أن إنشاء مصانع الإنتاج مكلف للغاية، فإن الاستثمار في الهيدروجين يتطلب عادةً عقود بيع طويلة الأجل أو اتفاقيات "شراء" وهو ما سيتم مناقشته أدناه.



الشكل 1: تُظهر التكاليف المتوقعة للهيدروجين المتجدد في عام 2030 أن الصين والشرق الأوسط وأمريكا الجنوبية هي الأكثر كفاءة (المصدر: الوكالة الدولية للطاقة 2024)

الغموض المحيط بالطلب

ما لا يثير الدهشة أن العثور على مشترين على المدى الطويل لدعم مثل هذه الاستثمارات كثيفة رأس المال كان صعباً، حتى في منطقة تتمتع بمزايا تنافسية في مجال الهيدروجين القائم على الطاقة المتجددة واحتجاز الكربون وتخزينه. على الصعيد العالمي، بلغت اتفاقيات الشراء "المؤكدة" حوالي 2 مليون طن سنويًا فقط من الهيدروجين النظيف في عام 2024، وفقًا لأرقام مجموعة بوسطن الاستشارية.[9] ويمثل ذلك تقريبًا ضعف أقل من مليون طن سنويًا من الهيدروجين النظيف المنتج في عام 2023، وهو ما يمثل أقل من 1% من 97 مليون طن من الهيدروجين المنتج في جميع أنحاء العالم عام 2023، وكلها تقريبًا من النوع "الرمادي" غير المطفأ (الشكل 2). وتم استخدام معظمها (حوالي 75 طن متري) في التكرير وإنتاج الأمونيا للصناعة والأسمدة. وذكرت وكالة الطاقة الدولية أن معظم الهيدروجين منخفض الانبعاثات كان أزرق اللون - الغاز الطبيعي مع احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه - في حين أن الهيدروجين الإلكتروليتي أو الأخضر كان أقل من 100,000 طن في جميع أنحاء العالم.

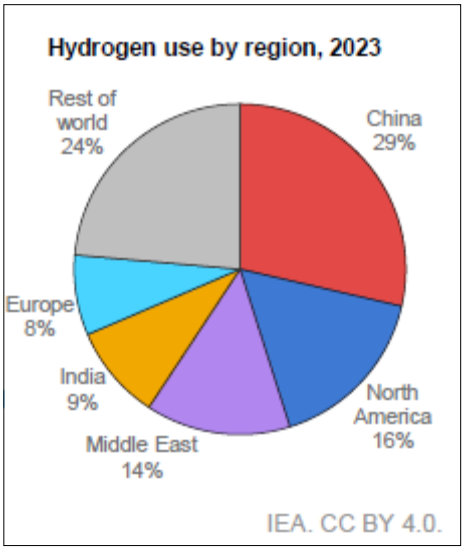


الشكل2: يُنتج معظم الهيدروجين العالمي من الوقود الأحفوري (المصدر: مخيمر وآخرون 2024)[10]

وجدت دراسة نُشرت في مجلة Nature Energy عام 2025 والتي رصدت 190 مشروعًا من مشاريع الهيدروجين (الأخضر) المتجدد أن 7% فقط من هذه المشاريع انتهت في الموعد المحدد. ويتطلب تنفيذ كل ذلك دون تسعير الكربون دعمًا بقيمة 1.3 تريليون دولار.[11] في الشرق الأوسط، لم يصل سوى عدد قليل من مشاريع الهيدروجين المعلنة بقيمة 250 مليار دولار التي تستهدف الإنتاج بحلول عام 2030 إلى قرار الاستثمار النهائي بحلول عام 2023، ويرجع ذلك أساساً إلى عدم وجود عقود شراء.[12]

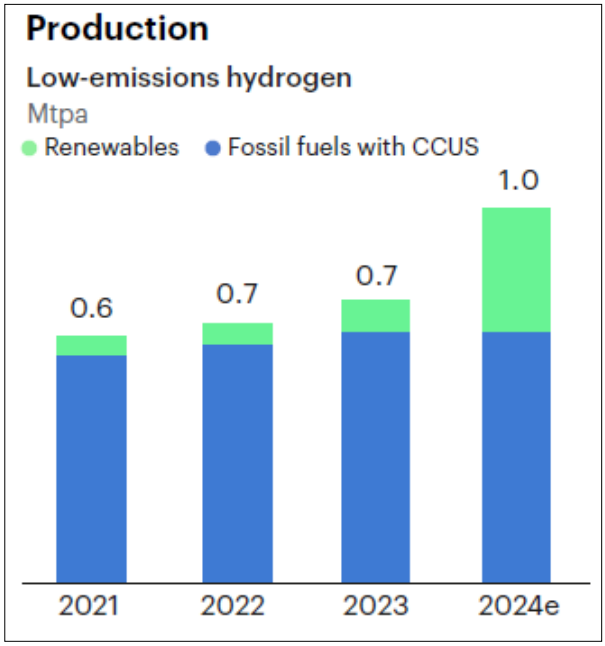
" كانت مشكلة الهيدروجين هي مشكلة الشراء بالنسبة لنا. لم نتمكن من التعاقد مع أي شخص. وقال رئيس شركة أرامكو السعودية للتنقيب والإنتاج ناصر النعيمي في عام 2024: "لكي أتخذ قرار الاستثمار النهائي، نحن نحتاج إلى مشترين، ولكن في الوقت الحالي ليس لدينا ذلك".[13] وقال الرئيس التنفيذي لشركة أرامكو أمين الناصر في عام 2023: "نظرًا لارتفاع الأسعار، يجد العملاء في جميع أنحاء العالم صعوبةً في التعامل مع هذه الأسعار المرتفعة وينتظرون الحوافز الحكومية".[14]

الشرق الأوسط هو فعلًا مستهلك رئيس للهيدروجين (الشكل 3)، وهو أيضًا منتج رئيس للهيدروجين من الغاز الطبيعي، حيث يولد حوالي 20% من الإجمالي حسب تقديرات الوكالة الدولية للطاقة، ولكن هذا الهيدروجين من النوع غير المخفف أو "الرمادي" الذي تنبعث منه كميات كبيرة من ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. كان هناك أربع محطات فقط لإنتاج الهيدروجين منخفض الكربون في منطقة الخليج حتى نهاية عام 2024. ولم تنتج المنطقة سوى كميات قليلة من الهيدروجين النظيف.



الشكل 3: كان الشرق الأوسط مستهلكًا كبيرًا للهيدروجين في عام 2023، ولكن معظمه في التكرير وإنتاج الأمونيا والميثانول، عادةً للأسمدة (وكالة الطاقة الدولية 2024)

على هذا النحو، لا يزال إنتاج الهيدروجين يتصف بالكثافة الشديدة للكربون، حيث مثّل ما يقرب من جيجا طن من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في عام 2024.[15] وبالنظر إلى ارتفاع التكاليف، كان هناك عدد قليل من مستهلكي الهيدروجين التقليديين على استعداد لتحويل الاستهلاك إلى الهيدروجين منخفض الانبعاثات دون سياسات تقلل من فجوة التكلفة. ومع ذلك، فإن استبدال الاستخدامات التقليدية مثل الأمونيا ربما تكون أقل الأسواق خطورة بالنسبة للهيدروجين منخفض الانبعاثات بسبب الأسواق والطلب الموجود مسبقاً.



الشكل4: لا يزال الإنتاج العالمي من الهيدروجين منخفض الانبعاثات (الأزرق والأخضر) قليلًا مقارنة بالهيدروجين التقليدي (الرمادي)، لكن الإنتاج ارتفع بنسبة 50% منذ عام 2021. (المصدر: استعراض الهيدروجين العالمي الصادر عن وكالة الطاقة الدولية 2024)

تسببت صعوبات الانطلاق في تأجيل أو إلغاء خطط استثمارية طموحة. على سبيل المثال، أشارت شركة أرامكو السعودية إلى أنها ستعيد تقييم التزاماتها السابقة نظرًا لصعوبة العثور على عملاء مستعدين لتوقيع عقود طويلة الأجل للحصول على هيدروجين منخفض الكربون ولكن بتكلفة أعلى. وكانت أرامكو السعودية قد أعلنت عن طموحاتها

لإنتاج 11 مليون طن سنويًا من الأمونيا "الزرقاء" منخفضة الكربون الموجهة للتصدير بحلول عام 2030، باستخدام لقيم الغاز من حقل الجافورة غير التقليدي في المنطقة الشرقية. ولم تتمكن الشركة من العثور على عملاء مستعدين لتوقيع صفقات طويلة الأجل بأسعار مرتفعة بما يكفي لتغطية التكاليف. وسرعان ما أعلنت أرامكو عن تحول في استراتيجيتها نحو السوق المحلية لكمية معادلة تقريبًا من الهيدروجين الأزرق.[16]

Count of Project		Status				
Country	Hydrogen type	Operating	Planned	Proposed	Under Construction	Grand Total
Bahrain	Green		1			1
	Grey		1			1
Kuwait	Grey				1	1
Oman	Blue			1		1
	Green		6	9		15
	Grey	1				1
	Transportation		1	1		2
Qatar	Blue				1	1
Saudi Arabia	Blue	1	1	1		3
	Green			3	1	4
	Grey	1				1
	Industrial			1		1
United Arab Em	Blue			1	2	3
	Green	1	5	8		14
	Research			1		1
Grand Total		4	15	26	5	50

الشكل 5: كانت هناك أربع محطات هيدروجين تعمل في دول مجلس التعاون الخليجي في عام 2024، وخمس محطات أخرى قيد الإنشاء والعديد من المحطات الأخرى في مراحل التخطيط (المصدر: أبحاث معهد بيكر 2024)

تعثرت مشاريع الهيدروجين في الشرق الأوسط بسبب نقص الدعم الحكومي للاستثمار في هذا المجال. حيث تحتاج هذه المشاريع، على غرار الغاز الطبيعي المسال، إلى عوائد مضمونة على الاستثمار - من خلال عقود شراء طويلة الأجل - لجذب التمويل. وعلى النقيض من ذلك، فإن أطر السياسات العامة مثل أحكام الهيدروجين في قانون خفض التضخم في الولايات المتحدة، أو بعثة الهيدروجين الوطنية في الهند، أو الخطة الصناعية للاتفاقات الخضراء للاتحاد الأوروبي قد قدمت إعانات وأطر تنظيمية توفر المزيد من الوضوح أمام الاستثمار، على الرغم من أنه لا يزال يتعين تحديد ما إذا كانت الإعانات تعوض التكلفة الإضافية للهيدروجين النظيف.[17] على الصعيد العالمي، تشير المعدلات المرتفعة للإخفاق إلى أن الشركات ربما يرجع إعلانها عن مشاريع الهيدروجين النظيف إلى أسباب استراتيجية، مثل جذب الانتباه أو الحصول على الإعانات.[18]

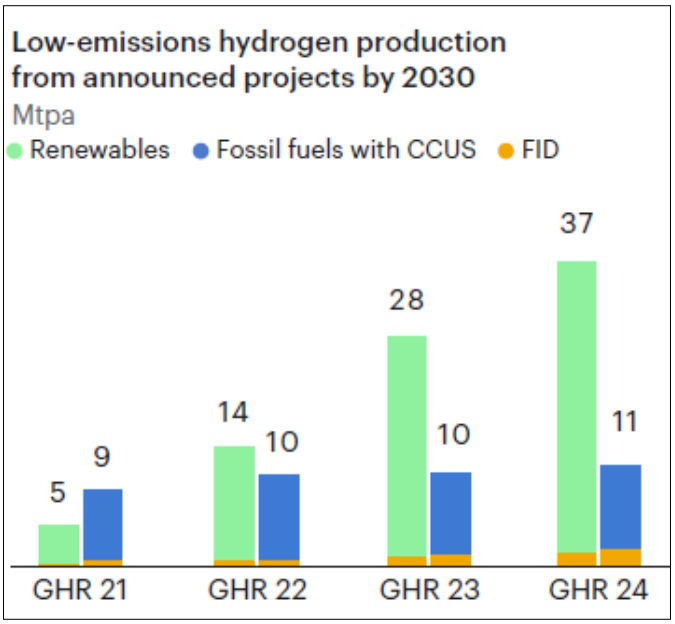
في أماكن أخرى، تم إلغاء مشاريع الهيدروجين تمامًا، بما في ذلك مشروع وقود الطيران الميثانول الإلكتروني الرائد لشركة أورستيد - الذي تم إلغاؤه بسبب نقص الطلب حتى بعد اتخاذ قرار الاستثمار النهائي في عام 2022 وبدء إنشاء المشروع.[19] وقال الرئيس التنفيذي لشركة أورستيد مادس نيبر لصحيفة فاينانشيال تايمز: "تدهورت حالة الأعمال بعد اكتمالها بسبب عدم القدرة على توقيع عقود شراء طويلة الأجل بأسعار مستدامة وارتفاع تكاليف المشروع بشدة".[20]

أدى غموض البيئة التشريعية أيضًا إلى التأثير على الجداول الزمنية للمشاريع وفتور حماس المستثمرين. وعلّقت شركة كونستيليشن إنيرجي الأمريكية خططها لإنتاج الهيدروجين "الوردي" عن طريق التحليل الكهربائي بالطاقة النووية في عام 2023 بسبب الغموض حول الدعم الحكومي. وتمت معالجة هذه المخاوف جزئيًا في عام 2025 - من خلال المزايا الضريبية الأمريكية للهيدروجين المولّد من الطاقة النووية.[21]

أخيرًا، تخلق التطورات في التكنولوجيا المنافسة شكوكًا حول الأسواق الأكثر ملاءمة. على سبيل المثال، يمكن للتطورات في البطاريات الكهروحرارية[22] أن تستحوذ على جزء من السوق الصناعية، في حين أن الأداء الفعال لمضخات الحرارة الكهربائية أقنع بعض الحكومات بإعادة النظر في استخدام الهيدروجين كوقود للتدفئة المنزلية.[23]

المضي قدماً في بعض القطاعات

رغم ما سبق، أعقب عدد من الإعلانات في أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين ضخ استثمارات في بعض الحالات. ويتوقف النجاح على تطوير مصدر محلي للطلب على الهيدروجين النظيف، أو من خلال إيجاد عملاء مستوردين لتصدير الهيدروجين إليهم. وإجمالاً، يتوقف توقيع اتفاقيات الإمداد على دعم السياسات من قبل الحكومات، سواء في سوق إنتاج أو استيراد الهيدروجين. ويمكن ملاحظة صعوبات الإمداد في أعداد إعلانات المشاريع في الشكل 6. عند الحديث عن 2030، تشير تقارير وكالة الطاقة الدولية إلى أن الإنتاج السنوي من الهيدروجين منخفض الكربون يمكن أن يصل إلى 49 مليون طن سنويًا إذا تم بناء جميع المشاريع المعلن عنها، ولكن تلك التي وصلت إلى مرحلة قرار الاستثمار النهائي بحلول أواخر عام 2024 ستوفر 3.4 مليون طن سنويًا فقط.[24]



الشكل 6: زادت إعلانات المشاريع بشدة في كل من تقارير استعراض مشاريع الهيدروجين العالمية الأربعة التي أجرتها الوكالة الدولية للطاقة منذ عام 2021، ولكن لم يصل سوى عدد قليل من المشاريع المعلنة إلى قرار الاستثمار النهائي بحلول نهاية عام 2024 (يظهر قرار الاستثمار النهائي باللون الذهبي) (المصدر: الوكالة الدولية للطاقة 2024)

المشاريع القائمة في دول مجلس التعاون الخليجي في عام 2024

على الرغم من أن اتفاقيات الإمداد كانت صعبة المنال، إلا أن بعضها كان ناجحًا بما يكفي لبدء إنتاج الهيدروجين. ونعرض أدناه بعضاً منها:

- مشروع الهيدروجين الأخضر، مجمع محمد بن راشد للطاقة الشمسية، دبي، دولة الإمارات العربية المتحدة؛ 0.19 كيلو طن/سنة؛ التحليل الكهربائي؛ مشروع عامل
- أبو ظبي المرحلة 1 لاحتجاز وتخزين الكربون، شركة الإمارات لصناعة الحديد والصلب المرحلة 1، الريادة، مشروع التقاط وتخزين الكربون، مشروع عامل
- مشروع نيوم للهيدروجين الأخضر، المملكة العربية السعودية؛ 373 كيلو طن/يوم؛ تحليل كهربائي؛ قيد الإنشاء
- مشروع قافكو للأمونيا، قطر؛ 1.2 مليون طن سنويًا؛ غاز طبيعي مع احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه؛ قيد الإنشاء
- شركة الهيدروجين الأخضر والكيماويات الخضراء SPC، المرحلة 1، عُمان؛ 55 كيلو طن/يوم؛ التحليل الكهربائي؛ قيد الإنشاء
- فرتيجلوب للأمونيا الزرقاء مع احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه، أبو ظبي، دولة الإمارات العربية المتحدة؛ 1 مليون طن سنويًا، في مراحل التخطيط

أكبر مشروع للتحليل الكهربائي قيد الإنشاء حاليًا في جميع أنحاء العالم هو مشروع نيوم للهيدروجين الأخضر باستخدام 2.2 جيجاوات من الطاقة المتجددة لتحليل المياه بالكهرباء في أقصى غرب المملكة العربية السعودية. وصل مشروع نيوم إلى قرار الاستثمار النهائي في عام 2023 وكان من المتوقع أن يبدأ الإنتاج في عام 2026. ويطمح شركاء نيوم الرئيسيون في شركة إير برودكتس وشركة أكوا باور إلى بناء 4 جيجاوات من طاقة الرياح والطاقة الشمسية لإنتاج ما يصل إلى 600 طن من الهيدروجين الأخضر يوميًا أو 373,000 طن/سنة، لتحويلها إلى ما يصل إلى 1.2 مليون طن/سنة من الأمونيا للتصدير. وستتم تحلية المياه المستخدمة في التحليل الكهربائي، مما يزيد من التكلفة. ومع ذلك، فإن مشروع نيوم هو واحد من المشاريع القليلة التي تمكنت من الحصول على عقود شراء لإنتاجها، حيث ذكرت تقارير في عام 2024 أنه تلقى طلبات إمداد تتجاوز قدرة التصميم الحالي للمشروع. وتشمل اتفاقية الشراء التي أبرمتها شركة توتال إنيرجيز لمدة 15 عامًا شراء 70 ألف طن/سنويًا، لكن شركة النفط الفرنسية الكبرى طلبت منذ ذلك الحين المزيد من الإمدادات، ساعيةً إلى توفير 500 ألف طن/سنويًا في نهاية المطاف للبدء في استبدال الهيدروجين الرمادي في مصافي التكرير في الاتحاد الأوروبي.[25]

في مكان آخر في المملكة العربية السعودية وتحديدًا في المنطقة الشرقية، ستقود أرامكو السعودية تحالف شركات لتطوير مركز لالتقاط الكربون وتخزينه بطاقة 9 ملايين طن/سنة بحلول عام 2028 في مدينة الجبيل الصناعية، وهي مركز للتكرير وإنتاج البتروكيماويات ومصدر رئيس للانبعاثات. وتمتلك أرامكو السعودية حصة 60% من أسهمها، بينما تمتلك كل من شركة الغازات الصناعية لايند ومزود خدمات ما تحت السطح شركة SLB حصة 20% لكل منهما.[26] ومن المتوقع أن تصبح الجبيل أحد المواقع المركزية في المملكة لإنتاج الهيدروجين الأزرق والأمونيا.

في دولة الإمارات العربية المتحدة، بدأ مشروعان كبيران يتشكلان عندما جمعت أبو ظبي مشاريع الهيدروجين والكيماويات منخفضة الكربون تحت شركة XRG، وهي قسم جديد تابع لمجموعة النفط الوطنية "أدنوك". ومن المتوقع أن تشرف شركة XRG على العديد من استثمارات أبوظبي بما في ذلك حصة أدنوك البالغة 86% في شركة فيرتيجلوب للأسمدة، والتي تهدف إلى إنتاج مليون طن/سنوياً من الأمونيا الزرقاء بحلول عام 2027 - والتي تمتلك أيضاً حصة 35% في مشروع إكسون موبيل المقترح لإنتاج 860 ألف طن/سنوياً من الهيدروجين الأزرق ومليون طن/سنوياً من الأمونيا الزرقاء في تكساس. وقد تشارك شركة XRG أيضًا في أعمال الهيدروجين الأخضر التي تقوم بها مجموعة «مصدر» في أبوظبي، والتي تسعى إلى إنتاج مليون طن/سنة في غضون عقد من الزمن، وهي مملوكة بنسبة 43% لمجموعة أدنوك.[27]

بدأ العمل في مصنع الأمونيا والأسمدة الزرقاء "قافكو-7" المملوك للدولة في قطر في نوفمبر 2024. وتخطط شركة قطر للطاقة وقافكو المملوكة للدولة لإنتاج 1.2 مليون طن/سنة من الأمونيا مع حقن ما يصل إلى 1.5 مليون طن/سنة من الكربون الناتج عن استخدام الغاز الطبيعي في إنتاج الهيدروجين، وهو ما يقول المطورون إنه كافٍ لتصنيف المصنع على أنه منخفض الكربون أو "أزرق". وسيتم توليد جزء من الكهرباء في موقع مسيعيد خارج الدوحة من الطاقة الشمسية، مما يقلل من البصمة الكربونية للمحطة.[28]

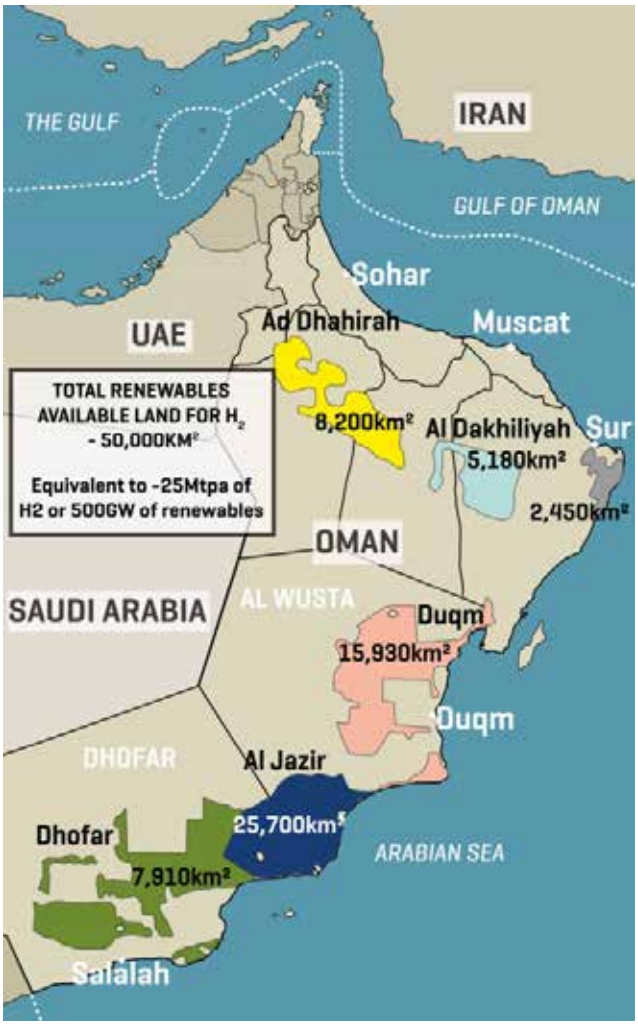
الأمونيا في قطاع الكهرباء

يبدو أن أحد السبل المحتملة لتصدير الهيدروجين الأزرق ـ وذلك من خلال تحويله إلى أمونيا لشحن بحري أقل تكلفة بكثير من الهيدروجين النقي - يحفز المنافسة بين الموردين الطموحين. وأكدت المشاريع التجريبية في الصين وإندونيسيا واليابان إمكانية الحرق المشترك للأمونيا مع الفحم في محطات الكهرباء. فقد أجرت شركة JERA اليابانية لتوليد الطاقة تجربة مدتها ثلاثة أشهر في عام 2024 للحرق المشترك لنسبة 20% من الأمونيا إلى جانب الفحم في محطة هيكينان 4 لتوليد الكهرباء. ويقال إن الشركة تهدف إلى زيادة نسبة الأمونيا إلى الفحم إلى 50% بحلول عام 2028.[29] ولكن بينما وفرت أرامكو الأمونيا الزرقاء لاختبار الحرق الذي أجرته شركة JERA، يبدو أن الشركة اليابانية تعمل مع شركة إكسون موبيل للحصول على الهيدروجين من مصنع في تكساس. وبحثت مذكرة وُقّعت بين شركة الكهرباء اليابانية JERA وشركة إكسون شراء نحو 500,000 طن/سنة من الأمونيا الزرقاء منخفضة الكربون من تكساس إلى اليابان.[30]

تفيد التقارير أن قطاعات الكهرباء الأخرى التي تعتمد على الفحم في كوريا الجنوبية والصين وبولندا تسعى إلى الحرق المشترك للأمونيا. فقد أعلنت كوريا الجنوبية عن خطط لاستخدام الحرق المشترك للأمونيا منخفضة الكربون بنسبة 2.4% من طاقتها بحلول عام 2030، ولكن تكاليف الأمونيا المعروضة كانت سترفع التكاليف إلى ما يزيد عن الحد الأقصى الذي حددته الحكومة وهو 0.35 دولار أمريكي لكل كيلوواط ساعة.[31] وتقبل كوريا الجنوبية الهيدروجين المشتق من الوقود الأحفوري باعتباره "نظيفًا" طالما تم التقاط 90% على الأقل من الكربون.[32]

النموذج العُماني

في الخليج، كان الاهتمام يتجه نحو نموذج عُمان الفريد في تطوير الهيدروجين في سلطنة عُمان، وذلك بسبب نجاحها في جذب المستثمرين الأجانب. ويدير هذا القطاع شركة هايدروم المملوكة للحكومة، والتي تؤجر امتيازات الأراضي بطريقة مماثلة لامتيازات النفط، ولكن بحقوق طويلة الأجل لتطوير الأرض لإنتاج الهيدروجين الأخضر بدلاً من التنقيب عن الهيدروكربونات وتتقاضى شركة هايدروم رسوم إيجار للأرض وحصة صغيرة من أي أرباح تصديرية، ولكن حتى الآن فإن أسهم المشروع - والمخاطر - تقع على عاتق المستثمرين. وقد خصصت الحكومة خمس مناطق رئيسية (الشكل 7) تبلغ مساحتها الإجمالية 50,000 كيلومتر مربع من أراضيها تتلقى إشعاعًا شمسيًا كافيًا لتوليد 500 جيجاوات من الطاقة وإنتاج 25 مليون طن/سنة من الهيدروجين النظيف.



الشكل 7: مناطق تطوير الهيدروجين المحددة في عُمان والمفتوحة أمام الامتيازات الأجنبية. (المصدر: الوكالة الدولية للطاقة 2024)

منحت شركة هايدروم خمسة امتيازات داخل هذه المناطق لشركات الطاقة بما في ذلك شركتي EDF وEngieg الفرنسيتين، وشركة J-Power اليابانية، وشركة Fortescue الأسترالية، وشركة Actis البريطانية لتطوير البنية التحتية، حيث بلغ إجمالي الإنتاج أكثر من مليوني طن من الهيدروجين سنويًا.[33] ومع ذلك، لم يتم الإعلان إلا عن القليل جدًا من عمليات الإمداد أو التمويل المؤكد، ولم يحصل أي من المشاريع - بخلاف الجهود التجريبية الصغيرة - على قرار استثماري نهائي بحلول يناير 2025.

بصرف النظر عما سبق، فإن النموذج العُماني يوفر للمستثمرين الأجانب الشفافية المطلوبة بشدة. وتمنح هايدروم المشاريع لمقدمي العطاءات على أساس "الحصة" الحكومية المحتملة من رسوم الإيجار وصادرات الوقود النظيف، بالإضافة إلى ما إذا كان مقدمو العطاءات قد حصلوا على عقود شراء وحجم هذه العقود. وتمتد عقود الإيجار لعدة عقود بطريقة مماثلة لامتيازات النفط. ويتمتع أصحاب الامتيازات بالحماية من العديد من المخاطر من خلال العقود الموقعة مع الحكومة العمانية التي تنص على معايير محددة مثل الحدود الدقيقة والشروط الكاملة لحقوق استخدام الأراضي. ويقترن ذلك بالتزامات على المستثمر بالوصول إلى مراحل متقدمة في تركيب قدرات توليد الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، والتي بدورها سيتم الاستفادة منها لإنتاج الهيدروجين الأخضر - إما لتحويله إلى أمونيا للتصدير أو للاستخدام الصناعي المحلي.[34]

في ميناء الدقم العُماني على بحر العرب، يعكف اتحاد شركات يضم شركة BP على تصميم مشروع الدقم هايبورت للهيدروجين الأخضر في ميناء الدقم بطاقة إنتاجية تبلغ حوالي 1.3 جيجاوات من طاقة الرياح والطاقة الشمسية في مرحلته الأولى.[35] وقد منحت شركة هايدروم امتيازًا آخر بمساحة 340 كيلومترًا مربعًا بالقرب من الدقم إلى تحالف شركات تقوده شركة Engie الفرنسية للكهرباء وشركة POSCO الكورية لصناعة الصلب. وتشير الخطط الأولية للامتياز الذي تبلغ مدته 47 عاماً إلى توليد 5 جيجاوات من طاقة الرياح والطاقة الشمسية مع قدرة التخزين في البطاريات ومحطة هيدروجين. بحلول عام 2030، يهدف تحالف الشركات إلى البدء في إنتاج 200,000 طن سنويًا من الهيدروجين الأخضر الذي سيتم تحويله إلى حوالي 1.2 مليون طن سنويًا من الأمونيا الخضراء لإزالة الكربون من مصانع الصلب الكورية التابعة لشركة POSCO.[36]

لا يزال نجاح إنجي وبوسكو في تأمين اتفاقيات شراء طويلة الأجل بعيد المنال بالنسبة للمستثمرين الآخرين، وهي العقبة الرئيسية أمام بدء العمل في المشاريع التي تم منحها. وقالت نجلاء الجمالي، الرئيس التنفيذي لشركة أوكيو للطاقة البديلة الحكومية العمانية: "إن الاستعداد للالتزام بحجم معين، والاستعداد للالتزام بسعر ثابت لمدة 20 عامًا، أمر يصعب قبوله من كلا الجانبين".[37]

تمكن نموذج الامتياز العماني من جذب مستثمرين أجانب على الرغم من بيئة الاستثمار العمانية الأكثر صعوبة والتصنيف الائتماني المنخفض مقارنة بالدول المجاورة مثل المملكة العربية السعودية ودولة الإمارات العربية المتحدة. أما خارج سلطنة عمان، فليس هناك إلا القليل من التفاصيل في منطقة دول مجلس التعاون الخليجي حول المواقع والحدود الدقيقة للأراضي المخصصة لمشاريع الهيدروجين الأخضر، وشروط ومدة الاستخدام، مما يمنع المستثمرين من إطلاق دراسات جدوى لحساب إمكانية توليد الطاقة الشمسية والرياح وإنتاج الهيدروجين.

إزالة الكربون: الهيدروجين واحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزين الكربون وتخزينه مقابل الطاقة المتجددة

على المدى البعيد، يجب إزالة الكربون من أربعة قطاعات رئيسية للطلب على الطاقة للوصول إلى الحياد الكربوني. وهذه القطاعات هي توليد الكهرباء والمباني والصناعة والنقل.

عملية إزالة الكربون في توليد الكهرباء تحرز تقدمًا، بقيادة الطاقة النووية وطاقة الرياح والطاقة الشمسية والطاقة الكهرومائية والتخزين في البطاريات والطاقة الحرارية الأرضية وخيارات أخرى. في قطاع المباني، لا تزال هناك حاجة إلى تحويل التدفئة والطهي من أنظمة التدفئة والطهي القائمة على احتراق الوقود إلى أنظمة فعالة تعمل بالكهرباء، ولكن الحلول متاحة بما في ذلك المضخات الحرارية والطهي بمواقد الكهرباء. أما قطاع النقل فهو أقل تقدماً في هذا المجال، لكن قطاع الكهرباء وتخزين الطاقة في البطاريات يحققان تقدماً في قطاع النقل الشخصي من خلال السيارات الهجينة والكهربائية. عندما تكون الكهرباء التي تدفع هذه المركبات (أو تلك التي تشغّل التدفئة والطهي) خالية من الكربون، فإن قطاعي الطاقة والمباني سيصبحان خاليين من الكربون.

يمكن أن يلعب الهيدروجين والوقود المشتق منه دورًا في القطاعات المتبقية التي لم تحرز فيها عملية إزالة الكربون تقدمًا يذكر. ولم تحرز عملية إزالة الكربون اعتمادًا على البطاريات تقدماً يذكر في مجال النقل الثقيل، بما في ذلك النقل التجاري بالشاحنات والسكك الحديدية والشحن والطيران. هذه هي الأسواق المحتملة الرئيسية. أما الصناعات الثقيلة، مع احتياجاتها لدرجات الحرارة المرتفعة للغاية، فهي سوق آخر. ويصعب تحقيق الحرارة العالية من خلال الكهرباء، وتتطلب عمومًا وقوداً خاصاً قابلاً للاحتراق مثل الفحم وفحم الكوك والغاز الطبيعي. ويبرز الهيدروجين منخفض الكربون كأحد البدائل المحتملة الرائدة.

بعبارة أخرى، بالنسبة لوسائل النقل الثقيلة والصناعة، فإن الوقود القابل للاحتراق - أي الجزيئات - أكثر تأثيرًا من الإلكترونات التي يتم توصيلها بواسطة الطاقة الخالية من الكربون أو البطاريات، حيث تنقصها نسب كثافة الوزن إلى الطاقة. ويمكن حرق جزيئات الهيدروجين مباشرةً كوقود قابل للاحتراق أو، كما ذكرنا، تحويلها إلى حاملات طاقة مثل الأمونيا أو الميثانول، والتي يمكن إعادة تحويلها إلى هيدروجين أو حرقها.[38]

يحقق الوقود المشتق من الهيدروجين نجاحات أولية في القطاع البحري. فقد ذكرت وكالة الطاقة الدولية أن هناك 50 سفينة تعمل بوقود الميثانول في عام 2024 من بين عدد متنامٍ من الطلبات على «السفن التي لديها القدرة على العمل بأنواع الوقود البديلة». الميثانول هو أحد مشتقات الهيدروجين الأسهل في التعامل معه من الهيدروجين أو الأمونيا. كان هناك طلبيات لنحو 290 سفينة تعمل بالميثانول، وحوالي 30 سفينة تعمل بوقود الأمونيا، ونحو 30 سفينة هيدروجين حتى سبتمبر 2024. وتعمل سفن الميثانول في أسطول الحاويات، في حين أن الأمونيا مفضلة لناقلات السوائب والناقلات. تُستخدم السفن التي تعمل بالهيدروجين في الأساس في زوارق القطر والسفن السياحية والعبارات.[39]

الهيدروجين كإستراتيجية تحوُّط مناخية

تشمل مزايا الهيدروجين قدرته على العمل كبديل "جاهز" للوقود الهيدروكربوني عالي الانبعاثات. ويمكن أن تستمر بعض المحركات والغلايات وخطوط الأنابيب وأنظمة التخزين - إلى جانب سلاسل التوريد من المنتج إلى العميل - في الخدمة مع إجراء تعديلات. وستبقى المهارات والعلاقات التجارية المرتبطة بها من قطاع الهيدروكربونات ذات أهمية. وتقلل أوجه التضافر هذه من البنية التحتية الضخمة وهيكلة الأعمال المطلوبة في أجزاء أخرى من عملية انتقال الطاقة.

هناك عوامل جذب أخرى. حيث يمكن لمنتجي النفط أيضًا الاستفادة من الهيدروجين كأداة تحوُّط تخفف من الخسائر الناجمة عن انخفاض الطلب على النفط والغاز بسبب المناخ. ومن المتوقع أن يرتبط الطلب على الهيدروجين النظيف ومشتقاته ارتباطًا عكسيًا بالطلب على النفط الخام والغاز الطبيعي. وكلما أدى العمل المناخي إلى تقويض استهلاك الهيدروكربونات تدريجيًا، زاد الطلب على الوقود النظيف مثل الهيدروجين. لذا، في حين أن هناك احتمالًا لحدوث اضطرابات في الإيرادات في أي انتقال كبير بعيداً عن الوقود الأحفوري، فإن الدول والشركات القائمة على النفط والغاز التي تقوم بالتنويع في الهيدروجين قد تستطيع تعويض بعض الخسائر من خلال زيادة مبيعات الهيدروجين النظيف.

يجادل Poudineh Fattouh بأن استراتيجية التحوط ربما تقلل من الأداء الأفضل لمنتجي النفط في ظل استمرار الطلب القوي على النفط، مقابل تحسين الأداء الأسوأ للمنتجين في ظل تحول أسرع من المتوقع إلى الطاقة النظيفة. العوائد من الاستراتيجية القائمة على الهيدروجين أقل، نظراً للاستثمارات الرأسمالية الكبيرة المطلوبة وهوامش الربح الأقل بكثير في قطاع الهيدروجين.[40] ولكن التنويع خارج نطاق النفط أمر جذاب؛ لأنه يتم التحوط من المخاطر، مما يقلل من تعرض الاقتصاد القائم على النفط للمخاطر ككل .

التحوط عن طريق الاستثمار في الهيدروجين له مزايا أخرى للدول والشركات المنتجة للنفط. فبما أنه يمكن إنتاج الهيدروجين منخفض الكربون ومشتقاته مثل الأمونيا من الهيدروكربونات - باستخدام تقنية احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه لتحويل الانبعاثات تحت الأرض - فإنه يمكن أن يطيل عمر احتياطيات النفط الخام والغاز الطبيعي، ويتوافق مع قطاعات الأعمال القائمة على توفير الوقود القابل للاحتراق. وتشير الاستراتيجية أيضًا إلى أن منتجي النفط لديهم مبرر أقوى لمواصلة إنتاج وتصدير النفط والغاز وجني ريع مستمر في الوقت الذي يسعون فيه إلى خفض تكاليف احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه وتحسين الكفاءة التكنولوجية والمهارات والعوائد على الوقود منخفض الكربون.

لهذه الأسباب وربما لأسباب أخرى، يبقى الهيدروجين المدعوم برفيقه القريب احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه أكثر جاذبية من التحول عن أعمال توريد الوقود إلى أعمال التزويد بالكهرباء عبر توليد الطاقة المتجددة، حيث تختلف نماذج الأعمال والمهارات والمدخلات المادية، والتي تقوم على استثمارات رأسمالية أولية في بنية تحتية تعمل لعقود من الزمن دون وقود قابل للاحتراق أو سلسلة توريد.[41]

يرى المزيدي أن الالتزام بضخ استثمارات كبيرة في الهيدروجين منخفض الكربون "قد يكون الطريقة الأكثر فعالية من حيث التكلفة للتحول في مجال الطاقة" و"الطريقة الوحيدة للبلدان المنتجة للنفط والغاز في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا لتجنب المخاطر الكبيرة المتمثلة في تعطل الأصول في كثير من احتياطياتها من النفط والغاز".[42]

الخاتمة وتوصيات السياسات

الدول المنتجة للنفط في الشرق الأوسط لديها دوافع قوية لتعزيز الهيدروجين كمصدر طاقة انتقالي. حيث تتمتع المنطقة بمزايا نسبية تُحسد عليها في كلا الشكلين من الهيدروجين منخفض الكربون، سواء تم إنتاجه من الهيدروكربونات أو عن طريق التحليل الكهربائي للمياه باستخدام الطاقة المتجددة. وما يتوفر للمنطقة من أشعة الشمس، وأراضٍ شاغرة، ومخزون جيولوجي تحت سطح الأرض، ومستودع للمواد الهيدروكربونية، والعملة الصعبة المتاحة للاستثمار، والمهارات المهنية يجعلها وجهة استثمارية مثالية. وتوفر المزايا التحوطية للهيدروجين مبررات اقتصادية أكثر. ويتمتع الهيدروجين القائم على الهيدروكربونات مع احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه بميزة إضافية تتمثل في توفير مسار مستمر لاستثمار احتياطيات النفط والغاز الوفيرة منخفضة التكلفة في بلدان الشرق الأوسط الرئيسية. ومن الواضح أن الطلب الضعيف وغير المؤكد على الهيدروجين النظيف قد قوض الحماس الذي ظهر في البداية. وعلاوة على ذلك، لم يتم إيلاء اهتمام كافٍ حتى الآن للاستخدام المحلي للهيدروجين وربما كان هناك تركيز مفرط على الإمداد. لذا، توصي هذه النظرة التحليلية بما يلي:

- تنظيم واستثمار مدروس أو تقديم إعانات مدروسة لمواجهة الشكوك حول الهيدروجين. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن توفر التجارب التعاقدية وسيلةً للمضي قدمًا إلى أن يتم العثور على نموذج مفيد، مثل النموذج المطبق في عُمان.

- استهداف الأسواق المحلية أولاً؛ نظرًا للاستهلاك الكبير الموجود مسبقًا للهيدروجين الرمادي في التكرير والأسمدة، جراء فهم مخاطر الطلب. يمكن إزالة الكربون من هذا القطاع أولاً؛ حيث تسعى الدول إلى تطوير طلب الصناعات الثقيلة ثم عملاء التصدير في وقت لاحق. سيستغرق الأمر بعض الوقت لإنشاء سلاسل توريد للهيدروجين النظيف في النقل بالشاحنات والشحن والصناعة.

- يجب على الحكومات في الخليج أن تتبنى المزايا الاستراتيجية لقيادة دفة الاستثمار، كما تفعل في قطاعات أخرى من "المشاريع العملاقة" في العقارات. وتوفر الاستثمارات الرائدة التي تقوم بها الدولة إشارات وضمانات استثمارية مفيدة للقطاع الخاص والمستثمرين الأجانب. عندما تتيح الحكومات بعض الحماية من المخاطر، وربما تغطية بعض الفجوات في التكلفة بين الأشكال غير النظيفة والنظيفة من الهيدروجين، فإنه ينبغي أن تكون الشركات قادرة أخيرًا على الاستفادة من المزايا النسبية الكثيرة والمقنعة في المنطقة.

الملحق: أنواع الهيدروجين

يتم إنتاج الهيدروجين منخفض الكربون بثلاث طرق رئيسية:

التحليل الكهربائي للماء: عندما يتم استخدام الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح الخالية من الكربون، يوصف الهيدروجين المنتج بأنه "أخضر". عندما تعمل الطاقة النووية الخالية من الكربون على تشغيل المحلل الكهربائي، يوصف الهيدروجين بأنه "وردي".

الإصلاح بالبخار: يمكن تحويل المدخلات من الغاز الطبيعي (الأكثر شيوعًا) أو النافثا أو الفحم أو النفط إلى هيدروجين من خلال عملية كثيفة الحرارة. إذا تم التقاط الانبعاثات وعزلها، فإن النتيجة الأكثر شيوعًا هي الهيدروجين "الأزرق".

الانحلال الحراري للميثان: يتم إنتاج ما يسمى بالهيدروجين "الفيروزي" عن طريق حرق الميثان (احتراق منخفض الأكسجين) الذي ينتج عنه الهيدروجين وأسود الكربون الصلب كمخرجات.

وهناك نوع رابع، يسمى الهيدروجين الطبيعي، يمكن العثور عليه أيضًا في الرواسب الجوفية. يُعرف هذا الشكل الذي يصعب العثور عليه حتى الآن باسم الهيدروجين "الأبيض" أو "الذهبي".

Endnotes

1. "Remarks by Amin H. Nasser at the 24th World Petroleum Congress." Sept. 18, 2023, Calgary, Canada. Saudi Aramco website; https://www.aramco.com/en/news-media/speeches/2023/remarks-by-amin-h-nasser-at-the-24th-world-petroleum-congress

2. See, for example: Brett Christophers, "Fossilised Capital: Price and Profit in the Energy Transition," New Political Economy 27, no. 1 (January 2, 2022): 146–59, https://doi.org/10.1080/13563467.2021.1926957. Krane, Jim, "Why Oilmen Will Never Be Interested in Renewables," Forbes, February 14, 2019, https://www.forbes.com/sites/thebakersinstitute/2019/02/14/why-oilmen-will-never-be-interested-in-renewables/; Kate Aronoff, "Oil Companies Are Finally Being Honest About Their Feelings on Renewable Energy," The New Republic, February 8, 2023, https://newrepublic.com/article/170442/oil-companies-wind-energy-looney.

3. Worldwide, less than 3% of power generated was traded across an international border. Electricity Market Report; International Energy Agency, December 2020; https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-december-2020/2020-global-overview-trade

4. There are climate harms from hydrogen emissions and production methods. See, for example: Ilissa B Ocko and Steven P Hamburg, "Climate Consequences of Hydrogen Emissions," Atmospheric Chemistry and Physics 22, no. 14 (2022): 9349–68.

5. Producing hydrogen by electrolyzing water does not produce a carbon waste stream or require CCS.

6. CCS is also useful in capturing emissions from other industrial facilities, including power plants, natural gas processing facilities, and steel and cement plants. High purity CO2 waste streams, such as those emanating from corn ethanol plants, allow for more efficient capture.

7. International Energy Agency, "Global Hydrogen Review 2024," NGO research report (Paris: IEA, 2024), 79.

8. International Energy Agency, 83.

9. Camilla Palladino, "Lex in depth: how the hydrogen hype fizzled out." Financial Times, May 19, 2024; https://www.ft.com/content/14a60649-172a-45c1-99a9-039f481430e7

10. Esmail Mohamed Ali Mokheimer et al., "Fuel Reforming Processes for Hydrogen Production," Fuel 359 (2024): 130427, https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130427.

11. Adrian Odenweller and Falko Ueckerdt, "The Green Hydrogen Ambition and Implementation Gap," Nature Energy, January 14, 2025, https://doi.org/10.1038/s41560-024-01684-7.

12. Sowmya Sundar, "INTERVIEW: 'Offtake Contracts Are the Biggest Challenge to FIDs in Clean Hydrogen Projects,'" Zawya, February 2, 2023, online edition, https://www.zawya.com/en/projects/industry/interview-offtake-contracts-are-the-biggest-challenge-to-fids-in-clean-hydrogen-projects-exbz2xqt.

13. "Aramco Considers Saudi-Based LNG As International Growth Moves Ahead." MEES, February 16, 2024; http://archives.mees.com/issues/2046/articles/63036

14. "Aramco Considers Saudi-Based LNG As International Growth Moves Ahead." MEES, February 16, 2024; http://archives.mees.com/issues/2046/articles/63036

15. International Energy Agency, "Global Hydrogen Review 2024."

16. Numerous articles have covered changes in Aramco's plans, including: Vladimir Afanasiev, "Aramco reveals failure to secure blue hydrogen offtake deals." Upstream magazine, Nov. 5, 2024; https://www.upstreamonline.com/energy-transition/aramco-reveals-failure-to-secure-blue-hydrogen-offtake-deals/2-1-1735046
See also: Jim Krane and Jan Frederik Braun, "Saudi Aramco's Clean Hydrogen Efforts: Between Economic Diversification and Effective Climate Action," in The Clean Hydrogen Economy and Saudi Arabia, ed. Rami Shabaneh et al. (London: Routledge, 2024), 63–81. Also see: "Aramco Hydrogen Plans Face Offtake Challenge." MEES, Oct. 20, 2023; http://archives.mees.com/issues/2030/articles/62628

17. Sundar, "INTERVIEW: 'Offtake Contracts Are the Biggest Challenge to FIDs in Clean Hydrogen Projects.'"

18. Odenweller and Ueckerdt, "The Green Hydrogen Ambition and Implementation Gap."

19. Rachel Millard, "Ørsted scraps flagship European green fuels project." Financial Times, Aug. 15, 2024; https://www.ft.com/content/abdd1c41-b6bd-4d15-9aa4-502c9ad70cb3

20. Rachel Millard, "Ørsted scraps flagship European green fuels project." Financial Times, Aug. 15, 2024; https://www.ft.com/content/abdd1c41-b6bd-4d15-9aa4-502c9ad70cb3

21. "Constellation Statement on Clean Hydrogen Guidelines." Constellation Energy press release, Jan. 3, 2025; https://www.constellationenergy.com/newsroom/2025/constellation-statement-on-clean-hydrogen-guidelines.html

22. Electrothermal batteries use electricity to heat bricks or rocks to store and deliver industrial heat, currently 400-600 celsius but with the potential to reach 1500C. Even when powered by intermittent renewables, these batteries are more efficient than generating and burning hydrogen. See: Casey Crownhart, "How thermal batteries are heating up energy storage." MIT Technology Review, April 15, 2024; https://www.technologyreview.com/2024/04/15/1091042/thermal-batteries-heat-energy-storage/

23. For instance, the United Kingdom has declared "existing low carbon heat options like heat pumps and heat networks, which will be the primary means of decarbonisation for the foreseeable future." See: "Hydrogen heating: overview." GOV.UK, Dec. 17, 2024; https://www.gov.uk/government/publications/hydrogen-heating-overview/hydrogen-heating-overview--2

24. International Energy Agency, "Global Hydrogen Review 2024."

25. "Decarbonization of European Refineries: A first agreement signed between TotalEnergies and Air Products for the delivery of Green Hydrogen." TotalEnergies press release, June 7, 2024; https://totalenergies.com/news/press-releases/decarbonization-european-refineries-first-agreement-signed-between

26. "Aramco: Landmark CCS Deal." MEES, December 6, 2024; http://archives.mees.com/issues/2088/articles/64021

27. "Adnoc's New XRG Arm Gets Covestro Boost." MEES, Dec. 6, 2024; http://archives.mees.com/issues/2088/articles/64011

28. "Qatar Launches Construction On $1.2bn Blue Ammonia Plant For 2026 Start-Up." MEES, November 29, 2024; http://archives.mees.com/issues/2087/articles/63997

29. "JERA concludes successful co-firing trial at Hekinan." Ammonia Energy Association press release, July 1, 2024; https://ammoniaenergy.org/articles/jera-concludes-successful-co-firing-trial-at-hekinan/

30. Annabel Cossins-Smith, "JERA and ExxonMobil agree on hydrogen and ammonia development." MSN, March 25, 2024; https://www.msn.com/en-us/money/companies/jera-and-exxonmobil-agree-on-hydrogen-and-ammonia-development/ar-BB1kwanu

31. "South Korea: Low-carbon hydrogen tenders struggle due to high costs." Energynews, December 18, 2024; https://energynews.pro/en/south-korea-low-carbon-hydrogen-tenders-struggle-due-to-high-costs/

32. International Energy Agency, "Global Hydrogen Review 2024."

33. "Two More Hydrogen Projects Awarded In Oman's South." MEES, May 3, 2024; http://archives.mees.com/issues/2057/articles/63301

34. Author interview with industry participant on condition of anonymity, Jan. 16, 2025.

35. See: "BP To Lead Oman Green H2 Project." MEES, August 2, 2024; http://archives.mees.com/issues/2070/articles/63624;

36. "ENGIE and POSCO to develop a 1.2mtp Green Ammonia Project in Oman." Engie press release, June 22, 2023; https://engiemiddleeast.com/media/engie-and-posco-to-develop-a-1-2mtp-green-ammonia-project-in-oman/

37. Ibid

38. Wa'el Almazeedi, "Hydrogen Investment: Carving out a Competitive Position for the MENA Region in the Energy Transition," in The Clean Hydrogen Economy and Saudi Arabia, ed. Rami Shabaneh et al. (London: Routledge, 2024), 157–207.

39. International Energy Agency, "Global Hydrogen Review 2024."

40. Rahmatallah Poudineh and Bassam Fattouh, "Diversification Strategy Under Deep Uncertainty For MENA Oil Exporting Countries," Energy Insight (Oxford: Oxford Institute for Energy Studies, May 2020), https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2020/05/Diversification-Strategy-Under-Deep-Uncertainty-for-MENA-Oil-Exporting-Countries-Insight-69.pdf.

41. Jim Krane and Robert Idel, "More Transitions, Less Risk: How Renewable Energy Reduces Risks from Mining, Trade and Political Dependence," Energy Research & Social Science 82 (2021): 102311. Almazeedi, Wael, Al-Ramadhan Mohammad, Al-Sirri Dalal, Halabi Mamun, Hamadah Fawzi, Omar Essam, et al. 2021. "White Paper Towards a Hydrogen Strategy for Kuwait." Kuwait: Kuwait Foundation for the Advancement of Sciences. Both cited in Krane and Braun, "Saudi Aramco's Clean Hydrogen Efforts: Between Economic Diversification and Effective Climate Action."

42. Almazeedi, "Hydrogen Investment: Carving out a Competitive Position for the MENA Region in the Energy Transition."

أكاديمية أنور قرقاش الدبلوماسية
ANWAR GARGASH DIPLOMATIC ACADEMY

مركز الدبلوماسية المناخية
Centre for Climate Diplomacy

In Collaboration with

MUBADALA

أدنوك ADNOC

Email: CCD@agda.ac.ae

www.agda.ac.ae
@agdauae
Anwar Gargash Diplomatic Academy