

جيوسياسية تحول قطاع الطاقة عامل الهيدروجين



© الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA 2022)

يجوز، ما لم يرد بخلاف ذلك، استخدام المادة الواردة في هذا المنشور بحرية ومشاركتها ونسخها وإعادة إنتاجها وطباعتها و/أو تخزينها شريطة أن تتم الإشارة بشكل واضح إلى "الوكالة الدولية للطاقة المتجددة" بوصفها مصدر هذا المنشور. ومالك حقوق نشره وطباعته. وقد تكون المعلومات المنسوبة إلى أطراف ثالثة ضمن هذه المادة خاضعة لحقوق النشر والتأليف الخاصة بها، وكذلك لشروط استخدام وقيود منفصلة، وقد يستلزم الحصول على إذن تلك الأطراف قبل استخدام هذه المادة بأي شكل كان.

التوثيق: الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (2022)، جيوستراتيجية تحول الطاقة: عامل الهيدروجين، الوكالة الدولية للطاقة المتجددة، أبوظبي.

الرقم المعياري الدولي: 978-92-9260-457-8

تمت ترجمة هذا الملخص التنفيذي من تقرير "Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor" (2022) 978-92-9260-370-0. في حال وجود تعارض بين الترجمة العربية والنص الأصلي باللغة الإنجليزية، يسري العمل بالنص الإنجليزي.

يمكن التحميل من: www.irena.org/publications

لمزيد من المعلومات أو لتقديم الملاحظات: info@irena.org

حول "الوكالة الدولية للطاقة المتجددة"

تعد الوكالة الدولية للطاقة المتجددة "إيرينا" مركزاً عالمياً، ومنصة رئيسية للتعاون الدولي، وملقياً لرواد السياسة والتكنولوجيا والموارد والمعرفة المالية المتخصصة في مجال الطاقة المتجددة. وتعمل الوكالة، منذ تأسيسها كمنظمة حكومية في عام 2011، على تشجيع اعتماد واستخدام جميع أشكال الطاقة المتجددة على نطاق واسع ومستدام بما فيها الطاقة الحيوية، والطاقة الحرارية الجوفية، والطاقة المائية، وطاقة المحيطات، والطاقة الشمسية، وطاقة الرياح، وذلك في إطار سعيها المتواصل لتحقيق التنمية المستدامة، وتعزيز سبل الحصول على الطاقة، وتحقيق أمن الطاقة، ودفع عجلة النمو الاقتصادي منخفض الكربون للوصول إلى مستقبل مزدهر.

www.irena.org

إخلاء المسؤولية

يُقَدَّم هذا المنشور والمادة التي يحتوي عليها "بحالتيهما". وقد اتخذت الوكالة الدولية للطاقة المتجددة جميع الاحتياطات المعقولة للتحقق من ثبوت صحة المادة التي يحتوي عليها هذا المنشور. ومع ذلك، لا تتحمل الوكالة الدولية للطاقة المتجددة أو أي من مسؤوليها أو وكلائها، أو مزودي البيانات، أو الأطراف الثالثة الأخرى من مزودي المحتوى -مسؤولية تقديم أي ضمانات صريحة كانت أم ضمنية؛ كما لا يتحملون أي مسؤولية حيال تبعات استخدام هذا المنشور والمواد الواردة فيه.

إنّ المعلومات الواردة في هذا المنشور لا تمثل بالضرورة وجهات نظر جميع أعضاء الوكالة الدولية للطاقة المتجددة. ولا ينطوي ذكر شركات محددة أو مشاريع أو منتجات معينة على أي تأييد أو ترقية لها من طرف الوكالة الدولية للطاقة المتجددة تفضيلاً لها عن سواها مما له طبيعة مماثلة ولم يرد ذكره. لا تنطوي التسميات المستخدمة في هذا المنشور، ولا طريقة عرض المادة، على أي إعراب عن رأي من جانب الوكالة الدولية للطاقة المتجددة أو بشأن المركز القانوني لأي منطقة أو بلد أو إقليم أو مدينة أو منطقة خاضعة لسلطاتها، أو تتعلق بتقسيم حدودها أو تخومها.

مقدمة

أدى الانتشار المتسارع لمصادر الطاقة المتجددة إلى إحداث تحول عالمي في مجال الطاقة ترافق مع تداعيات جيوسياسية بعيدة المدى. وجسد تقرير "عالم جديد"، الصادر في عام 2019 عن اللجنة العالمية للوكالة الدولية للطاقة المتجددة حول جيوسياسية تحول قطاع الطاقة، أول خطوة في هذا المجال. وقد سلط التقرير الضوء على دور بزوغ عصر الطاقة الجديد في إعادة صياغة شكل العلاقات بين الدول والمجتمعات وبناء "عالم جديد" قائم على القوة والأمن والازدهار واستقلال الطاقة.

ونظراً لوتيرة التغير المتسارعة، من المهم مراقبة الانعكاسات والعوامل الجيوسياسية لعملية التحول، ومواكبة التطورات، ولعب دور فاعل في رسم ملامح المستقبل. وفي عام 2020، طلبت جمعية "آيرينا" العمومية من الوكالة المضي قدماً في هذا العمل ضمن الإطار التعاوني* بشأن جيوسياسية تحول قطاع الطاقة. وتم تحديد الهيدروجين كمجال بارز يستلزم المزيد من التحليل، نظراً لموجة الاهتمام الأخيرة التي حظي بها. وكثيراً ما استقطب الهيدروجين الاهتمام لكنه ظل مجالاً مناسباً في حوار الطاقة العالمي. واليوم، يشهد تركيزاً غير مسبوق على صعيد السياسات، نظراً لدوره الجوهري في إزالة الكربون من القطاعات التي تجد صعوبة في ركوب موجة التحول.

ولم يزل هناك الكثير من الشكوك حول كيفية تطور سوق الهيدروجين، ومن سيلعب نجمه كقادة في السوق، وما هي الآثار الجيوسياسية التي قد تنشأ. وتقدم الوكالة من خلال هذا التقرير تحليلًا مستنيراً حول كيفية حدوث هذه الشكوك. وسيعتمد هذا التحليل في معظمه على أطر السياسات التي تضعها الحكومات، بما في ذلك الحوافز التي تختارها الحكومات على خلفية العواقب الاجتماعية والاقتصادية الناتجة عن الأوبئة العالمية، والآثار المناخية التي تتضح انعكاساتها بشكل متزايد، والحاجة الملحة لتقليص الفجوة بين الواجبات والممنوعات.

ويتوقع تقرير "نظرة مستقبلية لتحولات الطاقة حول العالم" من "آيرينا" أنها قادرة على تلبية ما يصل إلى 12% من الاستهلاك النهائي للطاقة بحلول عام 2050. ولتحقيق ذلك، سيكون من الضروري تحديد الأولويات بشكل صحيح، خاصة في وقت مبكر، بالتزامن مع تطور الأسواق وارتفاع التكاليف. ولن يتم ضمان مساهمة الهيدروجين الإيجابية في دعم جهود التنمية ومكافحة تغير المناخ إلا من خلال وضع قواعد ومعايير شفافة وذات مصداقية ومنظومة متماسكة تتجاوز الحدود الوطنية والإقليمية والقطاعية. ومن خلال التعاون الدولي بشكل أساسي، فإن سوق الهيدروجين الناشئ لديه القدرة على أن يكون شاملاً ولا مركزي ومفتوح أمام البلدان المتقدمة والنامية على حد سواء.



فرانشيسكو لا كاميرا
مدير عام الوكالة الدولية
للطاقة المتجددة

وأمامنا طريق طويل لنقطعه. فعلى سبيل المثال، بمجرد انطلاق مؤتمر الأمم المتحدة للمناخ في غلاسكو في أكتوبر 2021، استحوذت أزمة الطاقة على أسواق الطاقة العالمية. وساهم تقلب أسعار النفط والغاز في حفز إيجاد مجموعة من التدابير العاجلة للحد من الآثار المترتبة على المنتجين والمستهلكين في جميع أنحاء العالم. وتعتبر هذه الآثار بمثابة تذكير صارخ بالمركزية المستمرة للوقود الأحفوري في جيوسياسية للطاقة. كما أنها تؤكد على الضرورة الملحة للانتقال إلى نظم طاقة مرنة تتماشى مع ضرورات التنمية والمناخ المنصوص عليها في اتفاق باريس وأجندة أعمال 2030.

واليوم، تحظى الحكومات بفرصة فريدة لصياغة شكل ظهور الهيدروجين، عبر المساهمة في تصميم الأسواق الداعمة لتحول الطاقة مع تجنب القيود وأوجه عدم الكفاءة الحالية، والحد من حالات عدم المساواة، والآثار على النتائج الجيوسياسية لبناء أنظمة طاقة أنظف وأكثر عدلاً. وعلى قدر التحديات ستكون الفرص. أمل أن يساعد هذا التقرير صناع السياسات وأصحاب المصلحة على إيجاد طريقة فعالة لاستكشاف المجهول، وتخفيف المخاطر، والتغلب على العقبات في السنوات المقبلة.

* النظر التعاونية للوكالة الدولية للطاقة المتجددة (آيرينا) هي منصات تتيح للجهات الفاعلة العامة والخاصة وغيرها فرصة تبادل الخبرات وتعميق العمل التحليلي وتعزيز أطر التعاون الدولي حول تحولات قطاع الطاقة.

جدول المحتويات

03	تمهيد
09	شكر وتقدير
10	ملخص لصناع السياسات

18	مقدمة
18	1.1 فجر الهيدروجين النظيف
21	1.2 الأهمية الجيوسياسية للهيدروجين النظيف
22	1.3 أهداف التقرير

24	دور الهيدروجين في عملية انتقال الطاقة
24	2.1 ما هو الهيدروجين
26	2.2 مسارات الإنتاج الرئيسية
29	2.3 تطبيقات الهيدروجين وتحديد الأولويات
31	2.4 معوقات نشر استخدام الهيدروجين
33	2.5 آفاق التجارة الدولية للهيدروجين

38	إعادة رسم الخارطة الجيوسياسية
39	3.1 السياقون إلى تبني السياسات والأسواق الرائدة
45	3.2 فئة جديدة من مصدري الطاقة
49	3.3 تأثير مسار الانتقال على الدول المنتجة للوقود الأحفوري
55	3.4 ظهور قادة جدد في عالم التكنولوجيا
65	3.5 التنمية الصناعية في البلدان الغنية بالطاقة المتجددة

01

02

03





68	التجارة والأمان وعلاقات الاعتماد المتبادل
70	4.1 خريطة جديدة للتجارة
74	4.2 إرساء قواعد اللعبة
76	4.3 دبلوماسية الهيدروجين
78	4.4 التحولات في العلاقات السياسية
81	4.5 تعزيز أمن الطاقة
85	4.6 المخاطر التجارية ونقاط الضعف

04

	الأسباب الجذرية لعدم الاستقرار الجيوسياسي
92	دور الهيدروجين في معالجتها
93	5.1 التحولات الاجتماعية - السياسية
96	5.2 تغير المناخ والإجهاد المائي وانعدام الأمن الغذائي
102	5.3 الهيدروجين والدول النامية

05

	اعتبارات السياسة العامة
104	وسبل المضي قدماً

06

108	المراجع
-----	---------

جدول الأشكال

11	الشكل S.1 التغيرات في قيمة تجارة منتجات الطاقة بين عامي 2020 و2050
12	الشكل S.2 شبكة متنامية من طرق وخطط اتفاقات تجارة الهيدروجين
14	الشكل S.3 أولويات سياسة الهيدروجين النظيف
20	الشكل 1.1 توقعات الطلب العالمي على الهيدروجين بحلول عام 2050
25	الشكل 2.1 استهلاك الهيدروجين في عام 2020
26	الشكل 2.2 التصنيف اللوني لإنتاج الهيدروجين
29	الشكل 2.3 الاستخدامات المحتملة للهيدروجين النظيف
30	الشكل 2.4 أولويات سياسة الهيدروجين النظيف
32	الشكل 2.5 المعوقات الأساسية أمام تطوير سياسات واستراتيجيات إنتاج الهيدروجين
33	الشكل 2.6 الإمكانيات الفنية للطاقة الشمسية عالمياً
34	الشكل 2.7 الإمكانيات الفنية لطاقة الرياح عالمياً
35	الشكل 2.8 كفاءة التكلفة لخيارات نقل الهيدروجين بالاستناد إلى المسافة وحجم الشحنات
37	الشكل 2.9 الشبكة المتنامية لطرق وخطط واتفاقيات تجارة الهيدروجين
39	الشكل 3.1 استراتيجيات الهيدروجين القائمة وقيد الإعداد، أكتوبر 2021
42	الشكل 3.2 متوسط التمويل السنوي المحتمل لمشاريع الهيدروجين، 2021 – 2030
43	الشكل 3.3 مشاريع واستثمارات الهيدروجين النظيف كما في شهر نوفمبر 2021
	الشكل 3.4 الإمكانيات التقنية لإنتاج الهيدروجين الأخضر بأقل من 1,5 دولار أمريكي لكل كيلوجرام بحلول 2050، حسب مقياس إكساجول
45	الشكل 3.5 تأثير فرضيات التكلفة على إنتاج الهيدروجين في دول معينة
47	الشكل 3.6 مخاطر الأصول العالقة بالنسبة لكبار مصدري الوقود الأحفوري الصافي، 2019
50	الشكل 3.7 آراء الخبراء حول استراتيجيات الهيدروجين وتأثيرها على منتجي الغاز والنفط
51	الشكل 3.8 آراء الخبراء حول إيرادات الهيدروجين المستقبلية وهيكلية السوق
54	الشكل 3.9 فرص الريادة التكنولوجية في سلاسل قيمة الهيدروجين الأخضر
55	الشكل 3.10 التوزيع الجغرافي لمجموعات براءات الاختراع المتعلقة بالهيدروجين، 2010 – 2020
56	الشكل 3.11 تدفق الاختراعات بمجال تكنولوجيا الهيدروجين، 2010 – 2020
58	الشكل 3.12 إمكانات السوق المقدرة لمعدات ومكونات الهيدروجين، 2050
59	الشكل 3.13 القدرة العالمية المقدرة لتصنيع أجهزة التحليل الكهربائي، 2021 – 2024، بناءً على خطط الاستثمار
61	
63	الشكل 3.14 مبيعات خلايا الوقود حسب المنطقة التي تتبناها، 2016 - 2020

جدول الأشكال

الشكل 4.1 آراء أعضاء الوكالة الدولية للطاقة المتجددة حول آثار الهيدروجين	11
على السياسة الخارجية بحلول عام	12
الشكل 4.2 التحولات في قيم تجارة سلع الطاقة بين عامي 2020-2050	14
الشكل 4.3 الخريطة العالمية لأنابيب نقل الغاز الطبيعي	20
الشكل 4.4 طرق الهيدروجين المحتملة عبر أفريقيا على طول الطرق السريعة الحالية والمستقبلية العابرة للقارة	25
الشكل 4.5 اتفاقيات التجارة الثنائية ومذكرات التفاهم لعدد من الدول، والتي أُعلن عنها اعتباراً من نوفمبر 2021	26
الشكل 4.6 أكبر 20 مشروعاً مُعلنًا للهيدروجين الأخضر على مستوى جيجا في العالم	29
الشكل 4.7 كبار منتجي المواد الأساسية للأجهزة التحليل الكهربائي	30
الشكل 5.1 آراء الخبراء حول تأثير الهيدروجين على مخرجات محددة للتنمية المستدامة بحلول عام 2050	32
الشكل 5.2 الدول التي قد تصبح فيها تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر أقل من الهيدروجين الأزرق سنوياً	33
الشكل 5.3 استهلاك المياه لإنتاج الهيدروجين في عام 2050 مقارنةً مع قطاعات محددة اليوم	34
الشكل 5.4 الخريطة الحرارية لمستويات الإجهاد المائي	



جدول الجداول

28	الجدول 2.1 مقارنة بين تقنيات التحليل الكهربائي الأساسية
60	الجدول 3.1 أمثلة تاريخية لمصانع إنتاج الهيدروجين باستخدام التحليل الكهربائي واسع النطاق
66	الجدول 3.2 اقتصاديات اختيار الموقع الصناعي
96	الجدول 5.1 الطرق السبعة التي يهدد بها تغير المناخ الاستقرار

جدول الإطارات

19	الإطار 1.1 المصطلحات الرئيسية المستخدمة في هذا التقرير
	الإطار 1.2 التوقعات الرئيسية لاستخدام الهيدروجين بحلول عام 2050 في سيناريو آيرينا لوقف ارتفاع درجات الحرارة عند 1.5 درجة مئوية
23	الإطار 2.1 ما هو التحليل الكهربائي؟
28	الإطار 2.2 استطلاعات العوامل الجيوسياسية لإنتاج الهيدروجين
32	الإطار 2.3 الوسائل الرئيسية الثلاث لنقل الهيدروجين باستخدام السفن
36	الإطار 3.1 السباقون؟ الرؤى الخاصة للبلدان والمناطق السباق في تبني الهيدروجين
40	الإطار 3.2 مشاريع الهيدروجين في أفريقيا
44	الإطار 3.3 أهمية فرضيات تكلفة رأس المال بالنسبة لتوقعات تجارة الهيدروجين
46	الإطار 3.4 التحول من مستورد إلى مصدّر للطاقة؟ أنشطة الهيدروجين في بلدان معينة مستوردة للوقود الأحفوري تتمتع بإمكانات تصدير الهيدروجين الأخضر
48	الإطار 3.5 التمحور نحو الهيدروجين؟ استراتيجيات الهيدروجين لدى دول مختارة مصدّرة للوقود الأحفوري
52	الإطار 4.1 فرص البنية التحتية المتاحة أمام أفريقيا في قطاع الشحن البحري
72	الإطار 4.2 ظهور دبلوماسية الهيدروجين
79	الإطار 4.3 تقليل الحجم ومخاطر السعر في تجارة الهيدروجين: دروس مستفادة من تطور سوق الغاز الطبيعي المسال
86	



شكر وتقدير

تم إعداد هذا التقرير بإشراف وتوجيه إيزابيث برس. وتتضمن قائمة المؤلفين ثيجس فان دي غراف (المؤلف الرئيسي لهذا التقرير ومستشار في الوكالة الدولية للطاقة المتجددة)، وهيريب بلانكو، وإيمانويل بيانكو، ووايمان تسانغ. كما أثرى كل من ربيعة فروخي ودولف جيلين التقرير بتوجيهاتهم ونصائحهم القيّمة.

وكان أيضاً لعدد من الزملاء في الوكالة الدولية للطاقة المتجددة مساهمات قيّمة، ومنهم: رولاند روش، وفرانسيסקو بوشيل، وفرانشيسكو باسيمي، وبول كومور، وأناستازيا كيفاليدو، وكليز كيس، وإيمانول طيبي، و أوتي كوليه، وكاثلين دانيال، وإيمين غيربودج، وباربرا جينكس، وجيفري لو، وستيفانو مارجوتشيو، وكيلي ريج (مستشارة في الوكالة الدولية للطاقة المتجددة).

كما ساهم العديد من المسؤولين الحكوميين والخبراء الدوليين بآرائهم ومراجعاتهم لمسودات التقرير، وكانت تعليقاتهم واقتراحاتهم ذات قيمة كبيرة. ومن بينهم روني بيلمانز (جامعة لوفان الكاثوليكية)، وليوناردو بيلترانو (مركز سياسة الطاقة العالمية في جامعة كولومبيا)، وبيتر بيتس، وكينغسميل بوند (مبادرة تعقب الكربون)، وهوغو بروير (وزارة الخارجية، هولندا)، وميليندا كرين، وماتياس دويتش (أغورا إنبرجي ويند)، وجونزالو اسكريبانو (المعهد الدولي للدراسات الدولية والاستراتيجية)، وهان فينسترا (وزارة الشؤون الاقتصادية وسياسة المناخ، هولندا)، وليزا فيشر (إي ثري جي)، وجنيومير فليس (أغورا إنبرجي ويند)، وجوناثان جافنتا (إي ثري جي)، وهانز أولاف إريك (وزارة الخارجية، النرويج)، ورود كمبتر (المديرية العامة للطاقة، التابعة للمفوضية الأوروبية)، وهولجر كليتزنج (وزارة الخارجية، ألمانيا)، وجيمس مينوبي (مكتب الرئيس، ناميبيا)، وبول موينتس (أغورا إنبرجي ويند)، وأليخاندرو نونيز جيمينيز (جامعة هارفارد والمعهد الفدرالي للتكنولوجيا في زورخ)، وأندرا أوفلاند (المعهد النرويجي للشؤون الدولية)، وكارستن ساش (وزارة البيئة، ألمانيا)، وبياتريكس شمولينغ (وزارة التغير المناخي والبيئة، الإمارات العربية المتحدة)، وجريفيث طومبسون (جامعة لوبولا شيكاغو)، ونيكوس تسافوس (مركز الدراسات الاستراتيجية والدولية)، وتاتيانا أولكينا (شركة سناس للغاز الطبيعي)، وسي فان دير ليند (كلينجيدل)، وكريستن فيستفال (مؤسسة الهيدروجين العالمية)، ورالف فيرمير (وزارة الخارجية، هولندا)، وفرانك ووترز (رلبانس للصناعات).

واستفاد هذا التقرير أيضاً من إطار العمل التعاوني للوكالة الدولية للطاقة المتجددة حول جيوسياسية تحول الطاقة، حيث التقى القائمون عليها مرتين لمناقشة الموضوع.

وشارك العديد من الخبراء في استطلاعات الرأي التي ساعدت في تطوير التقرير وكانت تعليقاتهم بالغة القيمة. ومنهم ماركو باروني، وإيرين إم بلانتون، ونعوم بوسيدان، وجيمس بوين، ومايكل برادشاو، وآندي كالتز، وكيليان كرون، وفرناندو دي سيسترينيس، وكريستيان داوني، وریشما فرانسيس، وجوليو فريد مان، وأورنابا غوش، وماركو غيولي، وكريس غودال، وماريا غوين، وليور هيرمان، وفوتر جاكوبس، وصوهيت كربوز، وتييري ليبيرك، ورويم ميلز، وإليونورا مورو، ومونيكا ناجاشيما، وميشيل نوسان، ومصطفى أوكي، وخورخي بينا، وسيدريك فيليبتر، وراينر كويتزو، وأورنجزيب قريشي، وأليسون ريف، وبابريس سانلي، وماسيمو سانتاريلي، وروربت شيفر، ودانيال شولتن، وروسانا سيتا، وراضية سداوي، وعدنان شهاب الدين، وتوم سمولينكا، وألكسندر سكلو، وروديغر تشرنينغ، وفرانك أومباخ، وبول فان سون، وإد فان وبيك، وسيريل ويدرسهوفن.

وقد قدم كل من ستيفاني كلارك، وداريا جازول، ونيكول بوكستالر، وداميان براندي الدعم في جوانب النشر والاتصال والتحرير. وتمت مراجعة التقرير من قبل ستيفن ب. كينيدي (Steven B. Kennedy)، وتصميم الرسوم البيانية من قبل وكالة الإعلانات weeks.de Werbeagentur GmbH.

وتتوجه "آيرينا" بعميق امتنانها للدعم الكبير المقدم من جانب وزارة الخارجية الألمانية الاتحادية ووزارة الخارجية في النرويج، اللتين ساهمتا بإنجاح إعداد هذا التقرير.

ملخص لصناع السياسات

يشهد قطاع الطاقة انتقالاً غير مسبوق من حيث حجمه وتأثيره العميق على سائر التوجهات الاجتماعية والاقتصادية والتكنولوجية والجيوسياسية الراسخة حول العالم. وتشكل مصادر الطاقة المتجددة اليوم، إلى جانب كفاءة الطاقة، التوجه السائد في عملية الانتقال الواسعة التي يشهدها قطاع الطاقة العالمي. ولا يقوم هذا الانتقال على استبدال الوقود، بل هو انتقال إلى نظام مختلف ينطوي على اضطرابات سياسية وتقنية وبيئية واقتصادية خاصة به. والسؤال الأساسي الذي يتناوله هذا التقرير هو ما إذا كان الهيدروجين سيفاقم هذه الاضطرابات أو يخفف من وطأتها وإلى أي مدى وبأي شكل سيكون ذلك.

يعتبر الهيدروجين حتى الآن القطعة الناقصة لحل أحجية الطاقة النظيفة، ومن المرجح أن يحدث اضطراباً أكبر في سلاسل قيمة الطاقة في السنوات القادمة. وكان التغير المناخي الحتمي المحرك الرئيسي لإعادة توجيه اهتمام السياسات نحو الهيدروجين. وبحسب سيناريو الوكالة الدولية للطاقة المتجددة لوقف ارتفاع درجات الحرارة عند 1.5 درجة مئوية، فإن الهيدروجين النظيف¹ قادر على تلبية ما يصل إلى 12% من الاستهلاك النهائي للطاقة بحلول عام 2050. وسيتم إنتاج معظمه باستخدام مصادر الطاقة المتجددة، والباقي سيكون من الغاز واحتجاز الكربون وتخزينه.

ومن المرجح أن يؤثر الهيدروجين على جغرافية تجارة الطاقة، حيث سيعزز علاقات الطاقة على المستوى الإقليمي. فمع انخفاض تكاليف الطاقة المتجددة، وارتفاع تكاليف نقل الهيدروجين، يُرجح أن تشهد الخريطة الجيوسياسية الناشئة نمواً في علاقات الطاقة الإقليمية. إذ يمكن نشر الطاقة المتجددة في جميع الدول، فضلاً عن إمكانية تصدير الكهرباء المتجددة إلى البلدان المجاورة عبر كابلات النقل. كما يستطيع الهيدروجين تسهيل نقل الطاقة المتجددة المُنتجة لمسافات أطول عبر خطوط الأنابيب والشحن، وبالتالي تمكين الاستفادة من الموارد المتجددة غير المستغلة في المواقع النائية. علاوةً على ذلك، يمكن تغيير وظيفة بعض خطوط أنابيب الغاز الطبيعي الحالية لاستخدامها في نقل الهيدروجين بعد إجراء تعديلات تقنية عليها.

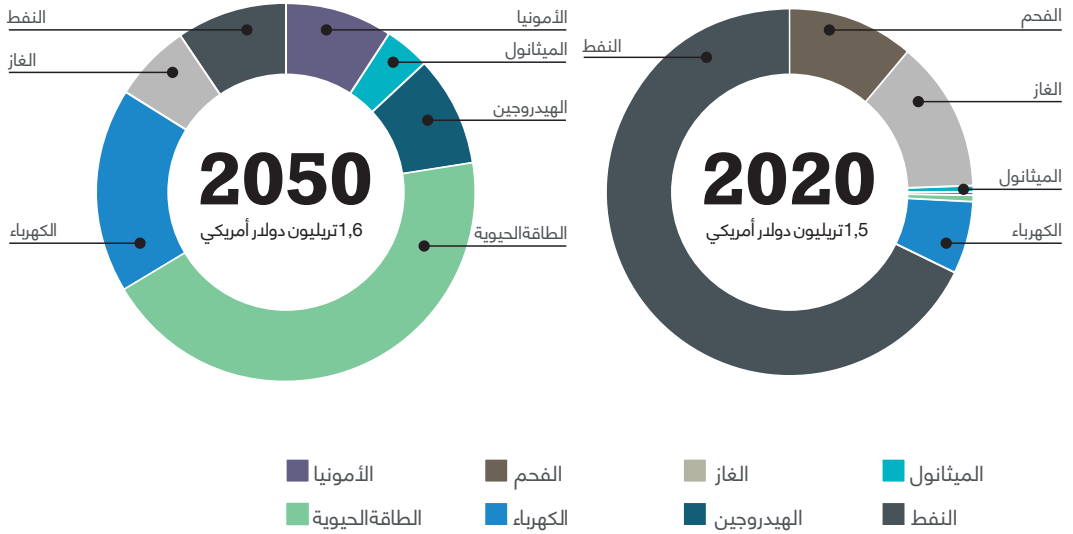
كما بوسع البلدان الغنية بمصادر الطاقة المتجددة منخفضة التكلفة أن تصبح منتجة للهيدروجين الأخضر، مع مواجهة ما يترتب على ذلك من عواقب جغرافية واقتصادية وجيوسياسية. ويمكن أن يكون الهيدروجين الأخضر ذو كفاءة اقتصادية أكبر في المواقع التي تحتوي على مزيج مثالي من الموارد المتجددة الوفيرة، ومساحات واسعة لإقامة مزارع للطاقة الشمسية أو طاقة الرياح، وتوافر المياه، إلى جانب القدرة على التصدير إلى مراكز الطلب الكبيرة. ويمكن أن تنشأ محاور جديدة للطاقة في الأماكن التي تستغل هذه العوامل لتصبح مراكزاً لإنتاج واستخدام الهيدروجين.

وستكون أعمال الهيدروجين أكثر تنافسية وأقل ربحية من النفط والغاز. فلن تكون إيرادات الهيدروجين النظيف مثل إيرادات النفط والغاز في وقتنا الراهن. إذ يتطلب إنتاج الهيدروجين عملية تحويل، وليس استخراج، كما يمكن إنتاجه بشكل تنافسي في العديد من الأماكن. وسيفقد هذا من احتمالات تحصيل ذات الأرباح المتولدة عن الوقود الأحفوري، والتي تمثل اليوم حوالي 2% من الناتج المحلي الإجمالي العالمي. علاوةً على ذلك، ومع انخفاض تكاليف الهيدروجين الأخضر، سيدخل مشاركون جدد ومتنوعون إلى السوق، مما يجعل الهيدروجين أكثر قدرة على المنافسة.

1 يستخدم هذا التقرير مصطلح "الهيدروجين النظيف" للإشارة إلى هذا المزيج من الهيدروجين الأخضر والهيدروجين الأزرق. انظر الشكل 2.2.

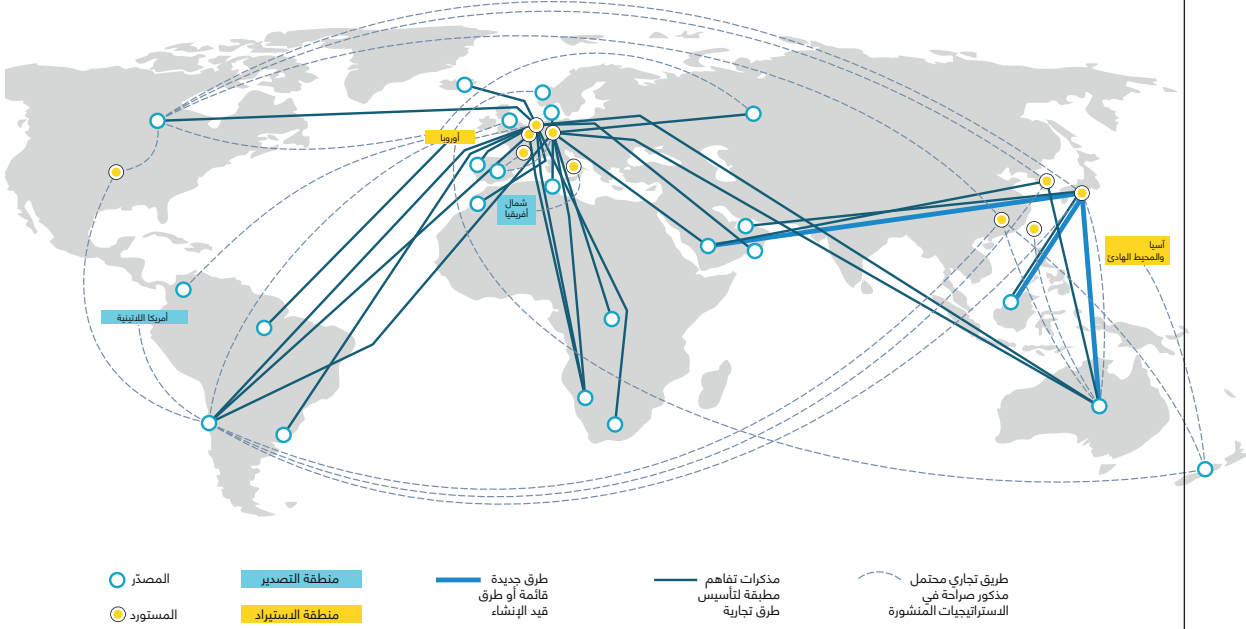


الشكل S.1: التغيرات في قيمة تجارة منتجات الطاقة بين عامي 2020 و2050



وستولد تدفقات تجارية واستثمارات في الهيدروجين أنماطاً جديدةً من الاعتماد المتبادل مع إحداث تغيرات في العلاقات الثنائية. ويبدو أن الصفقات الثنائية متسارعة النمو ستأخذ طابعاً مختلفاً عن العلاقات التي سادت في القرن العشرين وكانت قائمة على الهيدروكربون. ويشير وجود أكثر من 30 دولة وإقليم يعتمدون استراتيجيات للهيدروجين تتضمن خطط استيراد أو تصدير، إلى أن تجارة الهيدروجين الدولية ستتمو وبشكل متزايد. كما أن الدول التي لم يسبق لها المتاجرة في الطاقة بالشكل التقليدي، تبني علاقات ثنائية تركز على تقنيات الهيدروجين وجزئياته. ومع تغير العلاقات الاقتصادية بين الدول، ستتغير ديناميكياتها السياسية أيضاً.

الشكل S.2: شبكة متنامية من طرق وخطط اتفاقات تجارة الهيدروجين



مصدر الخريطة: ناتشرال إيرثر، 2021

ملاحظات: تستند المعلومات الواردة في هذا الشكل إلى المعلومات الموجودة في الوثائق الحكومية وقت كتابة هذا التقرير. إخلاء مسؤولية: هذه الخريطة متاحة للأغراض التوضيحية فقط. والحدود الموضحة في الشكل لا تعني أي تأييد أو قبول من الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (إيرينا)

وباتت دبلوماسية الهيدروجين عنصراً أساسياً في العلاقات الدبلوماسية الاقتصادية بين العديد من البلدان. وغالباً ما يعتبر الوصول إلى الهيدروجين عاملاً لبلوغ أمن الطاقة والمرونة الوطنية عموماً، ولا سيما للصناعات التي تكون الحلول الأخرى فيها غير مجدية أو غير اقتصادية. وقد شرعت بعض الدول التي من المتوقع أن تكون مستوردة، في بناء علاقات دبلوماسية عمادها الهيدروجين. وتصدرت ألمانيا واليابان قائمة هذه الدول، مع وجود دول أخرى تسير على خطاهما. وبينما يقوم المصدرون المحتملون بتطبيق استراتيجيات مماثلة، فإن العديد منهم يركزون على الهيدروجين - الأخضر تحديداً - في علاقاتهم الدبلوماسية الرفيعة.

ويعتبر الهيدروجين النظيف بالنسبة لمصدري الوقود الأحفوري طريقة جذابة لتنويع اقتصادهم. ويتجه العديد من المصدرين الحاليين إلى الهيدروجين النظيف لتطوير صناعات تصديرية جديدة. وعلى هذا الصعيد، يمكنهم الاستفادة من البنية التحتية القائمة لقطاع الطاقة، والقوى العاملة الماهرة، والعلاقات التجارية الحالية في مجال الطاقة. وفيما يبدو الهيدروجين الأزرق الخيار الأنسب في هذا السياق، لكن تتمتع العديد من البلدان المنتجة للوقود الأحفوري بإمكانات متجددة وافرّة تمكنها من التحول مباشرة إلى الهيدروجين الأخضر أيضاً. وتتبنى "خارطة طريق تحقيق الريادة في مجال الهيدروجين" لدولة الإمارات العربية المتحدة هذا النهج المزدوج بوضوح، في الوقت الذي تستكشف فيه العديد من الدول الأخرى هذا المسار، بما في ذلك أستراليا وسلطنة عمان والمملكة العربية السعودية. ومع ذلك، يجب على منتجي الوقود الأحفوري مواصلة تطوير استراتيجيات للتحول الاقتصادي واسع النطاق، ولا سيما أن الهيدروجين لن يعوض الخسائر في الإيرادات.



القدرة التقنية لإنتاج الكهرباء النظيفة - وبالتالي كميات كبيرة من الهيدروجين الأخضر - تتجاوز الطلب العالمي المقدر بعدة درجات من حيث الحجم. وأعربت العديد من البلدان عن طموحها بأن تصبح مُصدرة للهيدروجين، مما يحد من احتمالية احتكار دولة معينة للصادرات. ويبدو أنه حتى الدول المستوردة بشكل كامل للطاقة، مثل تشيلي والمغرب ونامبيا، تعتزم أن تصبح مصدرة للهيدروجين الأخضر انطلاقاً من استراتيجياتها وصفقاتها الثنائية المتزايدة. ومع ذلك، فإن المعروض من الهيدروجين سيكون مقيداً بوتيرة توظيف رأس المال وتكلفة الإنتاج، خاصةً عندما لا تكون الأسواق طويلة الأجل مضمونة.

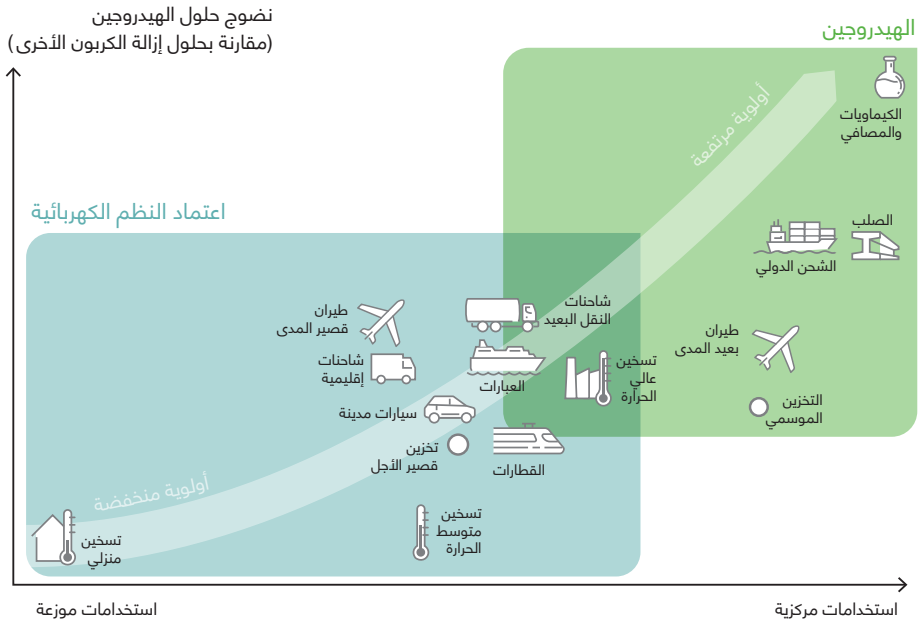
وتتمتع أفريقيا والأمريكيتان والشرق الأوسط وأوقيانوسيا بأعلى الإمكانيات التقنية لإنتاج الهيدروجين الأخضر. ومع ذلك، فإن القدرة على إنتاج كميات كبيرة منه بتكلفة منخفضة تتباين إلى حد كبير، مما يحتم على البلدان وضع استراتيجياتها بما يناسب الأولويات الاجتماعية والاقتصادية العامة، بما في ذلك القدرة على التخلص من الكربون في أنظمة الطاقة الخاصة بها أو الحد من مشكلة الوصول إلى الطاقة والفقر السائد حالياً في أكثر من 80 دولة حول العالم. ويعد الوصول إلى مصادر الطاقة المتجددة الوفيرة أحد الأصول التي يركز عليها سباق الهيدروجين النظيف، ولكنه قد لا يكون كافياً. وهناك العديد من العوامل الأخرى التي تلعب دوراً مهماً بما في ذلك البنية التحتية الحالية ومزيج الطاقة الحالي، إلى جانب تكلفة رأس المال وتوفر التقنيات اللازمة. كما أن قدرة بلوغ الإمكانيات التقنية ستعتمد أيضاً على عوامل معنوية مثل الدعم الحكومي والمناخ الاستثماري والاستقرار السياسي.

وليس بالضرورة أن تؤدي تكاليف ارتفاع المشاريع إلى إعاقه الاستثمار في البلدان ذات المخاطر العالية، حيث يُظهر قطاعا النفط والغاز الطبيعي أنه حيثما تكون الإيرادات المحتملة كافية، سيتدفق الاستثمار رغم مخاطر البلد. وهذا ينطبق على البلدان التي تظهر إمكانيات منخفضة التكلفة بالنسبة للهيدروجين الأخضر. وهناك حدود لذلك بلا شك. فمن غير المرجح أن تتمكن البلدان التي تشهد اضطرابات، والتي يتمتع بعضها بإمكانيات كبيرة، من اغتنام فرص الاستثمار بسبب المخاطر الموهلة لممارسة الأعمال التجارية في مثل هذه المواقع.



يمكن أن يشهد العقد الأول من القرن الحادي والعشرين سباقاً كبيراً على ريادة التكنولوجيا، حيث من المرجح أن تنخفض التكاليف بشكل حاد مع ازدياد معدلات التعليم وتوسيع نطاق البنية التحتية اللازمة. وفي الغالب، ستظهر الجغرافيا السياسية للهيدروجين النظيف على عدة مراحل. وبحسب التوقعات، ستبدأ المنافسة بين الهيدروجين الأخضر والأزرق على التكاليف في أواخر هذا العقد. ومن المحتمل أن يحدث هذا في وقت أبكر في بلدان مثل الصين (بسبب انخفاض تكاليف أجهزة التحليل الكهربائي)، أو البرازيل والهند (لتوافر مصادر الطاقة المتجددة الرخيصة وأسعار الغاز المرتفعة نسبياً). وخلال الارتفاع الحاد في أسعار الغاز الطبيعي عام 2021، كان الهيدروجين الأخضر بالفعل أقل تكلفة من الرمادي في جميع أنحاء أوروبا. لكن استغلال هذا المورد سيعتمد إلى حد كبير على الطلب المتوقع، وخاصة في القطاعات التي تفتقر إلى بدائل.

الشكل 3.1: أولويات سياسة الهيدروجين النظيف



المصادر: آيرينا (سيصدر قريباً - ب)

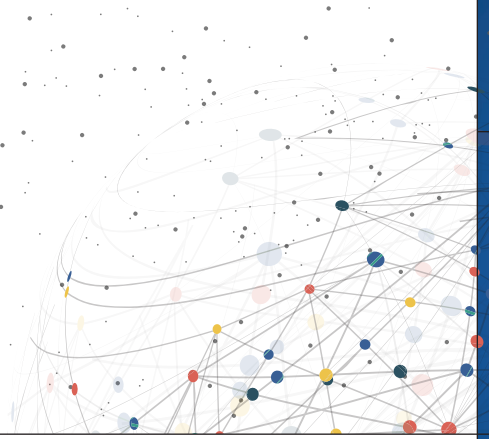
وستشهد تجارة الهيدروجين العابرة للحدود نمواً في ثلاثينيات القرن الحالي، بما ينسجم مع القدرة التنافسية للهيدروجين الأخضر من حيث التكلفة. وبحسب العديد من سيناريوهات إزالة الكربون، سيبدأ الطلب على الهيدروجين اعتباراً من عام 2035. وتتصور الوكالة الدولية للطاقة المتجددة أن ثلثي إنتاج الهيدروجين الأخضر في عام 2050 سيُستخدم محلياً، وسيتم تصدير الثلث المتبقي. ومن المرجح أن تسهل خطوط الأنابيب، بما في ذلك خطوط أنابيب الغاز الطبيعي بعد تعديلها، نصف هذه التجارة. أما النصف الآخر الذي يأتي على شكل مشتقات هيدروجينية، وبالأخص الأمونيا، فسيتم شحنه عبر السفن.

ويمكن للبلدان والأقاليم ترسيخ ريادتها التكنولوجية وصياغة قواعد السوق المتنامية، على المدى القصير إلى المتوسط. كما أن امتلاك حصة في سلسلة قيمة الهيدروجين من شأنها أن تعزز القدرة التنافسية الاقتصادية. وينطوي ذلك على مخاطر اقتصادية مباشرة كبيرة وإمكانات سوقية عالية. أما على المدى الطويل، فبوسع الدول التي تمتلك إمكانات كبيرة من الطاقة المتجددة أن تصبح مواقع للتصنيع الأخضر، مستفيدة من إمكاناتها لجذب الصناعات التي تستهلك كميات كبيرة من الطاقة.

ويمثل تصنيع المعدات فرصة لكسب القيمة في السنوات والعقود القادمة. ونظراً لاتساع نطاق سلسلة قيمة الهيدروجين، فينبغي توجيه معظم الاستثمارات إلى الطاقة المتجددة. وعلى امتداد سلسلة القيمة هذه، تشير التقديرات إلى إمكانات سوقية تتراوح بين 50 و60 مليار دولار أمريكي للأجهزة التحليل الكهربائي وأخرى بقيمة 21-25 مليار دولار أمريكي لخلايا الوقود بحلول منتصف القرن. واستطاعت الصين وأوروبا واليابان تسجيل بداية قوية في إنتاج أجهزة التحليل الكهربائي وبيعها، لكن السوق لا يزال ناشئاً وصغيراً نسبياً. ويمكن للابتكار والتقنيات الحديثة أن تغير مشهد التصنيع الحالي.

ويمكن لأي شكل من أشكال الهيدروجين أن يعزز استقلالية الطاقة ومرونتها، ولكن معظم المنافع ستأتي من الهيدروجين الأخضر. إذ يستطيع الهيدروجين اليوم تعزيز أمن الطاقة بثلاث طرق رئيسية هي: (1) الحد من الاعتماد على الواردات، (2) والتخفيف من تقلب الأسعار و(3) وتحسين فعالية ومرونة نظام الطاقة عبر تنوعه. وترتبط معظم هذه المكاسب بالهيدروجين الأخضر. وعلى النقيض من ذلك، سيتبع الهيدروجين الأزرق أنماط أسواق الغاز، مما سيفضي إلى الدتكال على الواردات ويسبب تقلبات في السوق. علاوة على ذلك، فإن الانخفاض المتوقع في تكلفة الهيدروجين الأخضر يهدد الاستثمارات القائمة في سلاسل توريد الوقود الأحفوري بالتوقف، ولا سيما الأصول المقرر تشغيلها لسنوات عديدة.

ومن المرجح أن المواد الخام اللازمة لتقنيات الهيدروجين والطاقة المتجددة ستلفت الانتباه أكثر إلى قضية أمن المواد. ففي حين أن معظم المعادن والفلزات من الموارد الجيولوجية كافية حالياً، إلا أن الأسواق قد تشهد نقصاً جراء الطلب المتنامي بسرعة، والفترات الزمنية الطويلة التي تستغرقها مشاريع التعدين والتكرير. وأي تحول في العرض أو الطلب، ولو بشكل طفيف نسبياً، قد يؤدي إلى تقلبات كبيرة في الأسعار. والتي ستعكس آثارها على سلاسل توريد الهيدروجين وعلى التكلفة الإجمالية للمعدات، فضلاً عن تأثير شركات التعدين ومصدري المواد الخام. وعند دراسة المخاطر المحتملة، يمكن استقاء الدروس من العقبات التي فرضتها جائحة "كوفيد-19" على سلسلة التوريد والتي تختلف بطبيعتها عن المخاطر المعروفة أساساً.



ومن غير المرجح أن تحكم القوة العسكرية تدفقات تجارة الهيدروجين، أو أن تصبح هذه التجارة احتكارية. وذلك نظراً لإمكانية إنتاج الهيدروجين من عدة مصادر أولية للطاقة وفي العديد من البلدان. ففي الواقع، الهيدروجين هو مُنتج مُصنّع وليس مادة أولية أو مصدراً للطاقة. لذلك، من غير المتوقع أن تتأثر تدفقات تجارة الطاقة الخضراء بسهولة بالقوى الجيوسياسية مثل النفط والغاز. ومع ذلك، يمكن أن ينشأ نقص في الإمدادات، لا سيما في السنوات الأولى من تجارة الهيدروجين، حيث يكون عدد الموردين محدوداً ولا تزال معظم التجارة محصورة في إطار العلاقات الثنائية.

وسيكون لصياغة القواعد والمعايير وحوكمة تجارة الهيدروجين تأثير كبير على تحديد التقنيات التي تهيمن على الأسواق المستقبلية. ويتوقف نجاح سوق الهيدروجين النظيف على إمكانية إرساء قواعد ومعايير وتشريعات تتسم بالانسجام والشفافية لتسهيل نشره عبر مختلف البلدان والأقاليم والقطاعات. وتهدف المعايير إلى تحسين جودة وسلامة وإمكانية التشغيل البيئي لمختلف السلع والخدمات. وفي الوقت نفسه، قد يؤدي تباين المعايير إلى إعاقة التقدم وتجزئة السوق، وإثارة المنافسة على الصعيد التنظيمي، عدا عن نشوء حواجز تجارية. ويمكن أن يشكل إعداد المعايير ساحةً للمنافسة الجيوسياسية أو التعاون الدولي. وفي نهاية المطاف، يمكن لجميع اللاعبين الاستفادة من نظام عالمي متماسك وشفاف.

وسيستدعي ذلك وجود شهادات منشأ في ظل نظام دولي شفاف وموثوق من أجل رصد وإدارة مساهمة الهيدروجين في جهود تغير المناخ. فضلاً عن ضرورة التزام الشفافية في كيفية قياس الانبعاثات. وخصوصاً أن مخاطر احتباس الكربون معروفة جيداً إذا ساهمت استراتيجيات الهيدروجين بإطالة استخدام الوقود الأحفوري وأعاقَت كفاءة الطاقة وجهود اعتماد النظم الكهربائية. وعليه، يمكن أن يساعد اعتماد أطر سياسات قوية ومدرّسة جيداً في ضمان مساهمة الهيدروجين بشكل فعال في تقليل انبعاثات غازات الدفيئة.

كما أن اعتماد الشفافية في الأسعار منذ مراحل مبكرة سيحفز تطور سوق الهيدروجين العالمي بسرعة. ومن المحتمل أن يكون للعملة وآليات التسعير التي تسود في الأسواق الناشئة تأثيرات جيوسياسية كبيرة. وستصبح العملة المختارة معياراً عالمياً أثناء توسع السوق. وسيجري أولئك المرتبطون بهذه العملة أنفسهم إلى حد ما من تقلبات تكاليف الاستيراد. على سبيل المثال، يسعى الاتحاد الأوروبي، الذي سيصبح في الغالب من أبرز المستوردين، إلى دفع قيمة وارداته المستقبلية من الهيدروجين باليورو. علاوة على ذلك، قد يكون تحديد سعر للكربون أمراً مفيداً، أو حتى ضرورياً، لينتمكن الهيدروجين الأخضر من منافسة بدله الرمادي، والوقود الأحفوري لاحقاً. وعليه، قد يتورط الهيدروجين في حروب أوسع من تلك التي تشهدها تجارة الكربون.

وفي حين أن قرارات الاستثمار طويلة الأمد ومخاطر توقف الوصول عالية، يجب تقييم البنية التحتية الثابتة على أساس منطقي طويل النجل. وفي كل قرار استثماري وتخطيطي يتخذ بشأن البنية التحتية للطاقة اليوم، يجب الأخذ بعين الاعتبار أن جغرافية الاقتصاد الحالي من الكربون غالباً ما ستكون مختلفة كلياً عما يُعتبر منطقياً حالياً. وستسهم عمليات اعتماد النظم الكهربائية الضخمة للاستخدامات النهائية في تغيير شكل الطلب. أما بالنسبة لجانب العرض، فمن المرجح أن يكون إنتاج الهيدروجين المتجدد في مواقع أخرى غير حقول النفط والغاز الحالية. وفي حين يمكن الاستفادة من بعض البنية التحتية القائمة لأغراض أخرى، فيجب حساب التحديات التقنية والتكاليف الاقتصادية المترتبة على هذه الخطوة مسبقاً.

ويمكن لمساعدة البلدان النامية على نشر تقنيات الهيدروجين في وقت مبكر أن يساهم في تعزيز أمن الطاقة للجميع، بالإضافة إلى منع اتساع فجوة إزالة الكربون العالمية. كما أن تنوع سوق الهيدروجين قد يقلل من مخاطر سلسلة التوريد ويحسن أمن الطاقة للجميع. وسيشكل الوصول إلى التكنولوجيا، والتدريب، وبناء القدرات، والتمويل ميسور التكلفة، مفتاحاً لتحقيق أقصى إمكانات الهيدروجين في إزالة الكربون من نظام الطاقة العالمي والمساهمة في إرساء العدالة والاستقرار عالمياً. علاوة على ذلك، سيسهم تأسيس علاقات تجارية عمادها الهيدروجين بإطلاق إمكانات جديدة لإنشاء سلاسل قيمة الهيدروجين المحلية، وتحفيز الصناعات الخضراء، وخلق فرص عمل في البلدان الغنية بمصادر الطاقة المتجددة.

ويجب أن تركز الجهود العالمية على الاستخدامات التي تنطوي على مزايا فورية وتحقق وفورات الحجم، خصوصاً في السنوات القادمة. فإعطاء الأولوية للاستخدامات ذات الطلب المرتفع والتي يكون الهيدروجين هو البديل الأفضل - وربما الوحيد - لها، من المرجح أن تكون أكثر كفاءة من حيث التكلفة وأقل عرضة لمخاطر الأسواق الناشئة. على سبيل المثال، دعم وتسريع التحول إلى الهيدروجين الأخضر في الاستخدامات الصناعية، حيث يُستخدم الهيدروجين بالفعل، مثل التكرير وإنتاج الأمونيا والميثانول.

ويمكن للهيدروجين أن يترك آثاراً إيجابية وسلبية معاً على التنمية المستدامة، وذلك بناءً على آلية تطويره. وغالباً ما يستخدم مفهوم "الأمن البشري" لوصف الأسباب الجذرية لعدم الاستقرار الجيوسياسي من أجل تحليل التهديدات مثل تغير المناخ والفقر والمرض، والتي يمكن أن تقوض السلام والاستقرار داخل البلدان وفيما بينهم. ومن الآن فصاعداً، سيكون من المهم اكتساب فهم أكبر للطبيعة متعددة الأبعاد التي تحكم التهديدات ونقاط الضعف العالمية من أجل التنبؤ ببعض المخاطر التي تترافق مع نشر الهيدروجين على نطاق واسع ولجم آثارها.



الفصل الأول

مقدمة:

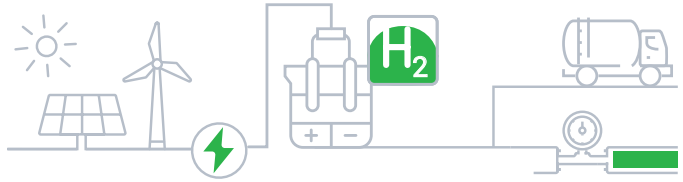
1.1 فجر الهيدروجين النظيف:

تصدر الهيدروجين النظيف في السنوات الأخيرة أجندات الطاقة، حيث برز وكأنه الحلقة المفقودة لحل لغز الطاقة النظيفة. واليوم، ازداد عدد البلدان التي وضعت خارطة طريق واستراتيجيات وطنية في هذا الصدد، حيث تم تخصيص جزء كبير من أموال التحفيز والتعافي من آثار جائحة كوفيد - 19 لتسريع وتيرة انتشار الهيدروجين. وشهد مؤتمر الأطراف في اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ (COP26) لعام 2021 في مدينة غلاسكو، اتفاق 32 دولة إلى جانب الاتحاد الأوروبي على التعاون معاً لتسريع وتيرة تطوير وانتشار الهيدروجين النظيف (البطار 1.1) وضمان "توافر الطاقة المتجددة ميسورة التكلفة والهيدروجين منخفض الكربون عالمياً بحلول عام 2030". (اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ، 2021).

© atk work / shutterstock.com



01





البطار 1.1

المصطلحات الرئيسية المستخدمة في هذا التقرير

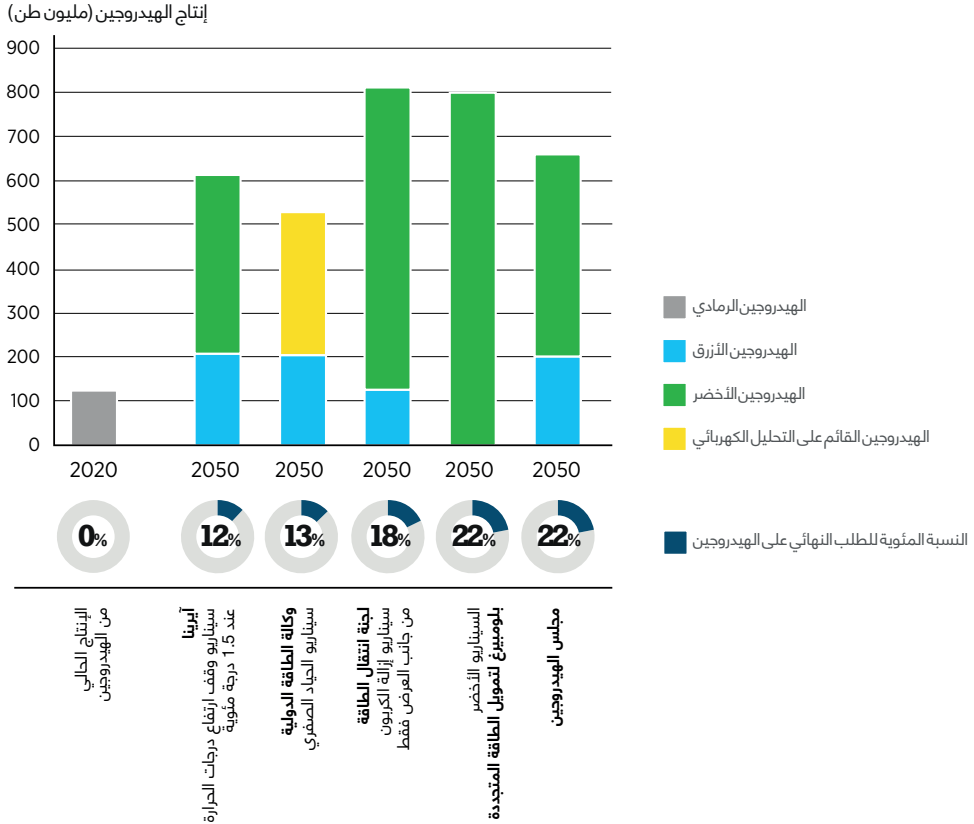
- **الهيدروجين النظيف:** يشير هذا المصطلح إلى كل من الهيدروجين الأخضر والهيدروجين الأزرق. ورغم أن النوعين قد يلعبان دوراً في عملية تحول الطاقة، لكن في هذا التقرير، تم اعتبار الهيدروجين الأزرق على أنه "نظيف"، حيث تكون انبعاثات الميثان منخفضة للغاية ومعدلات التقاط الكربون مرتفعة جداً.
- **الهيدروجين منخفض الكربون:** يشير المصطلح إلى الهيدروجين الأزرق الذي لا يفي بمعايير الانبعاثات سابقة الذكر، وكذلك الهيدروجين المُنتج عبر التحليل الكهربائي المعتمد على الشبكة، حيث لا يتم إزالة الكربون من الشبكة.
- **مشتقات الهيدروجين:** تشير إلى الجزيئات التي يمكن تحويل الهيدروجين إليها (مثل الأمونيا، والميثانول، والوقود الصناعي). وعند إنتاج هذه المنتجات من الهيدروجين باستخدام التحليل الكهربائي، فإنها تعرف باسم منتجات "باور تو إكس".
- **الوقود الصناعي:** يشير إلى مجموعة متنوعة من أنواع الوقود الغازي والسائل المنتج من الهيدروجين والكربون، بما في ذلك الكيروسين والديزل الصناعي وغيرهما. وعندما يتم إنتاج الهيدروجين عن طريق التحليل الكهربائي، يشار إلى هذه الأنواع من الوقود أيضًا باسم "باورفيول" أو "الوقود الإلكتروني". ويمكن استخدامها كوقود من نوع "دروب-إن"، حيث يمكنها تشغيل المحركات التقليدية والبنية التحتية لإمداد الوقود.

حظي الهيدروجين بموجات اهتمام عديدة في الماضي لكن دون أثر يذكر. لكن هذه المرة الأمر مختلف لوجود عاملين اثنين. الأول، التفاف الحكومات حول تحقيق هدف الحياد الصفري للانبعاثات بحلول منتصف هذا القرن (بلاك وآخرون، 2021). فوجود فرصة معقولة لوقف ارتفاع درجة الحرارة العالمية عند 1.5 درجة مئوية، وهو الهدف المنصوص عليه في اتفاقية باريس لعام 2015، يتطلب الوصول إلى الحياد الصفري للانبعاثات بحلول عام 2050 (الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ، 2021، IPCC). ولتحقيق ذلك، يتحتم على جميع قطاعات الاقتصاد خفض انبعاثاتها، بما في ذلك الصناعات الثقيلة والنقل لمسافات طويلة، حيث الحلول محدودة. وهنا برز الهيدروجين كخيار رئيسي للحد من الانبعاثات في هذه القطاعات.

أما العامل الثاني، فيتمثل في تزايد الجاذبية الاقتصادية للهيدروجين الأخضر (المنتج من خلال التحليل الكهربائي للمياه باستخدام الكهرباء المولدة من الطاقة المتجددة) بفعل انخفاض تكاليف مصادر الطاقة المتجددة وأجهزة التحليل الكهربائي. كما أن تزايد حصة مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة، كطاقة الرياح والطاقة الشمسية الكهروضوئية، تخلق طلباً على المرونة والتخزين، وهي جوانب بإمكان الهيدروجين توفيرها. وهكذا يمكن للهيدروجين الأخضر أن يكمل ويوسع الثورة الجارية في مجال الكهرباء المتجددة.

وإثر هذه العوامل، هناك توقعات حالية بأن يسد الهيدروجين وأنواع الوقود المعتمدة عليه حصة كبيرة من الطلب النهائي على الطاقة في عام 2050، مقارنة بلا شيء اليوم (الشكل 1.1). وتُجمع هذه التوقعات على أنه سيتم التخلص تدريجياً من إنتاج الهيدروجين "الرمادي" الحالي (القائم على الوقود الأحفوري) كلياً، وسيسيطر الهيدروجين الأخضر على مسار الإنتاج، مكملاً بالهيدروجين "الأزرق"، الذي يعتمد على الوقود الأحفوري مع احتجاز الكربون وتخزينه.

الشكل 1.1: توقعات الطلب العالمي على الهيدروجين بحلول عام 2050



المصادر: بلومبيرغ لتمويل الطاقة المتجددة (2021 أ)، لجنة انتقال الطاقة (2021)، مجلس الهيدروجين (2021)، آيرينا (2021 أ)، الوكالة الدولية للطاقة (2021 أ)

ملاحظات: تشير الوكالة الدولية للطاقة إلى الهيدروجين "القائم على الوقود الأحفوري والتقاط الكربون واستخدامه وتخزينه" و"القائم على التحليل الكهربائي". ويتوقع مجلس الهيدروجين أن يعتمد 60 - 80% من إنتاج الهيدروجين على مصادر الطاقة المتجددة، والباقي سيكون "منخفض الكربون"، والذي يعرف بأنه "الهيدروجين المنتج من مصادر طاقة غير متجددة ذات بصمة كربونية أقل من عتبة محددة". ويتضمن إنتاج الهيدروجين الحالي الهيدروجين الناتج كمنتج ثانوي عن عمليات أخرى.





1.2 الأهمية الجيوسياسية للهيدروجين النظيف

سيؤدي بناء سلاسل قيمة الهيدروجين النظيف إلى إحداث تحولات جغرافية واقتصادية وجيوسياسية. وتجدر الإشارة إلى بروز الهيدروجين الأخضر كمغير محتمل لقواعد اللعبة في خفض الانبعاثات وتحقيق الحياد المناخي دون إعاقة عمليات التنمية الاقتصادية والاجتماعية.

المخاطر الاقتصادية كبيرة. وتبلغ القيمة السوقية لمبيعات الهيدروجين السنوية الحالية ما يعادل 174 مليار دولار أمريكي، وهو ما يتجاوز بالفعل قيمة التجارة السنوية للغاز الطبيعي المسال²، فضلاً عن أن الإمكانات السوقية للهيدروجين هائلة حتى لو اقتصر استخدامه على العمليات الصناعية والنقل لمسافات طويلة. فإذا قام مصنع واحد للصلب بتوظيف الهيدروجين بدلاً من الوقود الأحفوري لتقليل كمية الحديد، فإنه سيحتاج لحوالي 300 ألف طن من الهيدروجين سنوياً، وبالتالي استهلاك ناتج 5 جيجاواط من أجهزة التحليل الكهربائي (ميشن بوسيبيل بارتنرشيب، 2021)، حيث تبلغ قدرة التحليل الكهربائي عالمياً اليوم فوق 0.3 جيجاواط بقليل. وبحسب كبرى المصارف الاستثمارية، فإنه قد تصل قيمة المبيعات العالمية للهيدروجين إلى 600 مليار دولار أمريكي بحلول عام 2050 (فاينانشيال تايمز، 2021)، ويمكن أن تصبح سلاسل القيمة الخاصة بالهيدروجين الأخضر فرصة استثمارية بقيمة 11.7 تريليون دولار أمريكي خلال الثلاثين عاماً المقبلة³؛ والتي تشمل كل شيء بدءاً من قدرة الطاقة المتجددة، ومروراً بأجهزة التحليل الكهربائي، وانتهاءً بالبنية التحتية للنقل (جولدمان ساكس، 2020).

ويتجاوز المدى التحويلي للهيدروجين قيمته السوقية المقدرة. ومن الأفضل التفكير فيه بوصفه ناقلاً للطاقة للأغراض العامة، والذي بوسعه تعزيز الابتكار عبر العديد من الصناعات والقطاعات المختلفة. وقد يكون تأثيره الجيوسياسي مشابهاً للتأثيرات التي أحدثتها الطاقة البخارية أو الكهرباء أو محركات الاحتراق الداخلي. فقد غيرت هذه التقنيات، كلٌ بطريقته الخاصة، التلات وأنواع الوقود التي يعتمد عليها جزء كبير من حضارتنا الحديثة. كما طال تأثيرها جوانب مختلفة من حياة الإنسان، وغيّرت أنماط التجارة العالمية، وشكلت ميزان القوى العالمي. وفي حين جلبت هذه التقنيات العديد من الفوائد على البشرية، لكن فوائدها لم تتوزع بشكل عادل، وإنما أرهقت المجتمعات بأعباء جديدة وفرضت تحديات عالمية.

2 بلغت قيمة التجارة العالمية للغاز الطبيعي المسال 143 مليار دولار أمريكي في عام 2019 (قاعدة بيانات الأمم المتحدة للاحصائية لتجارة السلع الأساسية، 2021).

3 تشمل الطاقة المتجددة، ومحطات الطاقة الهيدروجينية، وأجهزة التحليل الكهربائي، وإعادة تشكيل خطوط أنابيب الغاز.

ويُرجح أن يكون تأثير الهيدروجين النظيف أقل إذا ما قورن بالتقنيات السائدة في عصرنا هذا، ولكن لا ينبغي التسرع في تجاهل ذلك التأثير. ف وراء الصيغة الكيميائية البسيطة لغاز الهيدروجين (H₂)، يوجد نظام كامل من البنية التحتية لإنتاج الهيدروجين ونقله وتحويله واستخدامه. وبوسع هذا النظام أن يؤسس روابط جديدة بين قطاعات الطاقة المنفصلة سابقاً مثل الطاقة والحرارة والتنقل. كما يمكنه حفز شراكات تتخطى حدود القطاع التقليدي. والأهم من ذلك، من المرجح أن التوجه لتطوير الهيدروجين النظيف كناقل رئيسي للطاقة سيحدث اضطراباً في سلاسل القيمة الحالية للطاقة ويخلق فرصاً لمزيد من البلدان للعب دور مهم. وقد يؤدي ذلك في نهاية المطاف إلى جغرافيا اقتصادية جديدة بالكامل للنشاط الصناعي.

ومن المرجح أن تتضح معالم جيوسياسية الهيدروجين النظيف على مراحل متعاقبة. وقد يكون العقد الأول من القرن الحادي والعشرين عصر السباق الكبير على ريادة التكنولوجيا، مع انخفاض التكاليف بشكل كبير والتوسع السريع في تطوير البنية التحتية المطلوبة. وستشهد العديد من المواقع منافسة في التكلفة بين الهيدروجين الأخضر والأزرق بحلول عام 2030 (أيرينا، 2020). وتظهر العديد من سيناريوهات إزالة الكربون، أن الطلب على الهيدروجين سيبدأ اعتباراً من عام 2035 (مجلس الطاقة العالمي، 2021). ويتوقع خلال هذه الفترة أن تنمو التجارة الدولية للهيدروجين ومشتقاته بشكل كبير، رغم أن طرق تجارته الأولية قد تنشأ قبل ذلك (رام وآخرون، 2020).



© imagima/istockphoto.com

1.3 أهداف التقرير

يقدم هذا التقرير تحليلًا شاملاً للدوافع الجيوسياسية والتبعات المحتملة لتطوير سلاسل قيمة الهيدروجين النظيف. ويتناول التقرير موضوعاً رئيسياً وهو مفهوم "الاضطراب". فنحن نعاور تحولات في العديد من جوانب الاقتصادات والمجتمعات، والتي تتراوح بين نظم الطاقة، وتغير المناخ، والمسارات التكنولوجية، والعلاقات الجيوسياسية، والتجارة والاستثمار. وفي ظل اضطراب النظم السياسية والتقنية والبيئية والاقتصادية، فإن السؤال الرئيسي الذي يطرحه التقرير هو ما إذا كان الهيدروجين يساهم في تفاقم هذه الاضطرابات أو يخفف من وطأتها وإلى أي مدى، ومن الذي يستفيد من هذه التطورات أو يُحرَم منها. فهدف هذا التقرير لا يقتصر على وصف كيف يمكن للهيدروجين أن يحدث اضطراباً في أنظمة الطاقة المستقبلية، ولكنه أيضاً يقدم رؤى ثاقبة حول كيفية استعداد البلدان وأصحاب المصلحة للاضطرابات الإيجابية والسلبية التي قد يحدثها.

وما زال المسار المحتمل لتطور الهيدروجين النظيف محفوفاً بالعديد من الشكوك. ويحاول هذا التقرير سبر آفاق تطور الهيدروجين التي تعتبر استشكافية بطبيعتها. وتم اعتماد سيناريو وقف ارتفاع درجات الحرارة عند 1.5 درجة مئوية للوكالة الدولية للطاقة المتجددة كما هو موضح في تقريرها "نظرة مستقبلية لتحولات الطاقة حول العالم"، كخط أساس للتحليل (الإطار 1.2) (آيرينا، 2021 أ). ومع ذلك، لا يركز هذا التقرير على الآثار الجيوسياسية لمسار الهيدروجين المحدد فحسب، بل يسلط الضوء أيضاً على الطرق التي تحاول بها مختلف الجهات الفاعلة خلق مسارات محتملة ومتعددة لتطوير الهيدروجين.

وتم إجراء استطلاعين لإثراء التحليل في هذا التقرير (الإطار 2.2). شمل الأول أعضاء "آيرينا"⁴، بينما استقصى التخرآراء مجموعة من الخبراء المتخصصين. ويستند التقرير أيضاً إلى مجموعة كبيرة من الأعمال التي أنجزتها الوكالة بالفعل حول الهيدروجين والمواضيع ذات الصلة، من المنظور التقني والاقتصادي والسياسي. كما ارتكز التقرير إلى عمل الخبراء في جميع أنحاء العالم، بما في ذلك المشاركين في إطار العمل التعاوني للوكالة الدولية للطاقة المتجددة حول جيوسياسية تحول الطاقة.

ويتناول هذا التقرير العديد من الموضوعات الرئيسية التي يغطيها تقرير اللجنة العالمية لعام 2019 (آيرينا، 2019 أ)، بما في ذلك الريادة التكنولوجية، وأمن الطاقة، وتغير أنماط التجارة، وغيرها الكثير. ويحدد اعتبارات الحكومات والجهات الفاعلة الأخرى فيما يخص السياسات، من أجل المساعدة في التخفيف من المخاطر الجيوسياسية واستغلال الفرص المتاحة.

الإطار 1.2

التوقعات الرئيسية لاستخدام الهيدروجين بحلول عام 2050 في سيناريو آيرينا لوقف ارتفاع درجات الحرارة عند 1.5 درجة مئوية:

- سيمثل الهيدروجين ومشتقاته 12% من الاستخدام النهائي للطاقة و10% من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (CO₂). وسيكون لهم دور رئيسي في القطاعات التي يصعب فيها الاستغناء عن الكربون والتي تتطلب كميات طاقة كبيرة، مثل الصلب والكيماويات والنقل لمسافات طويلة والشحن والطيران. ويساعد الهيدروجين أيضاً في تحقيق التوازن بين العرض والطلب على الكهرباء المتجددة، ويعمل كمخزن موسمي طويل الأجل.
- الحاجة إلى حوالي 5000 جيجاواط من الهيدروجين المُنتج عبر التحليل الكهربائي، ارتفاعاً عن 0.3 جيجاواط اليوم.
- يصل الطلب على الكهرباء لإنتاج الهيدروجين إلى ما يقرب من 21000 تيراواط ساعي، وهو ما يقارب معدل الاستهلاك العالمي للكهرباء اليوم.
- سيلبي إنتاج الهيدروجين الأخضر ومشتقاته 30% من إجمالي الطلب على الكهرباء عام 2050.
- ما لا يقل عن ثلثي إجمالي الإنتاج سيكون من الهيدروجين الأخضر، والباقي من الهيدروجين الأزرق.



4 بلغ عدد الأعضاء في آيرينا 164 دولة والاتحاد الأوروبي عندما أجري الاستطلاع في يوليو 2021.

الفصل الثاني

دور الهيدروجين في عملية انتقال الطاقة

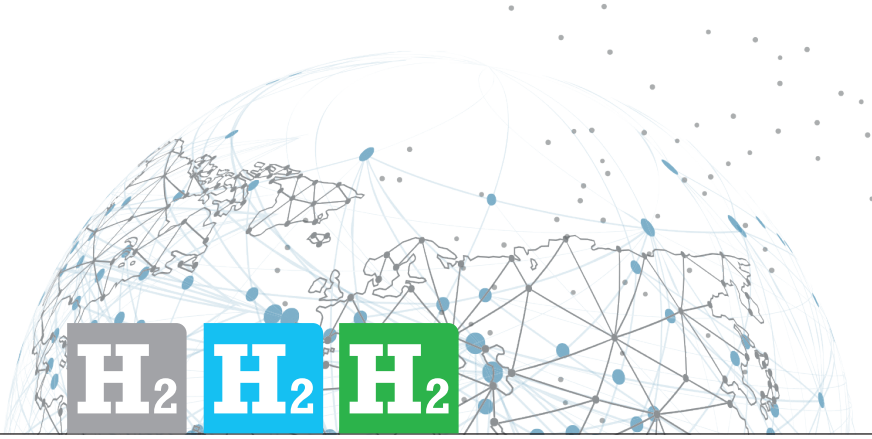
2.1 ما هو الهيدروجين؟

الهيدروجين هو العنصر الأقدم والأخف وزناً والأكثر وفرةً في الكون، ويوجد بشكل طبيعي في العديد من المركبات بما في ذلك الماء والوقود الأحفوري. ويُستخدم غاز الهيدروجين بشكل رئيسي كمادة أولية في قطاع الصناعات الكيماوية والبتروكيماوية ومنها: تكرير النفط الخام، وتركيب الأمونيا (بصورة خاصة لإنتاج الأسمدة) وإنتاج الميثانول اللازم لصناعة مجموعة متنوعة من المنتجات (بما فيها البلاستيك).

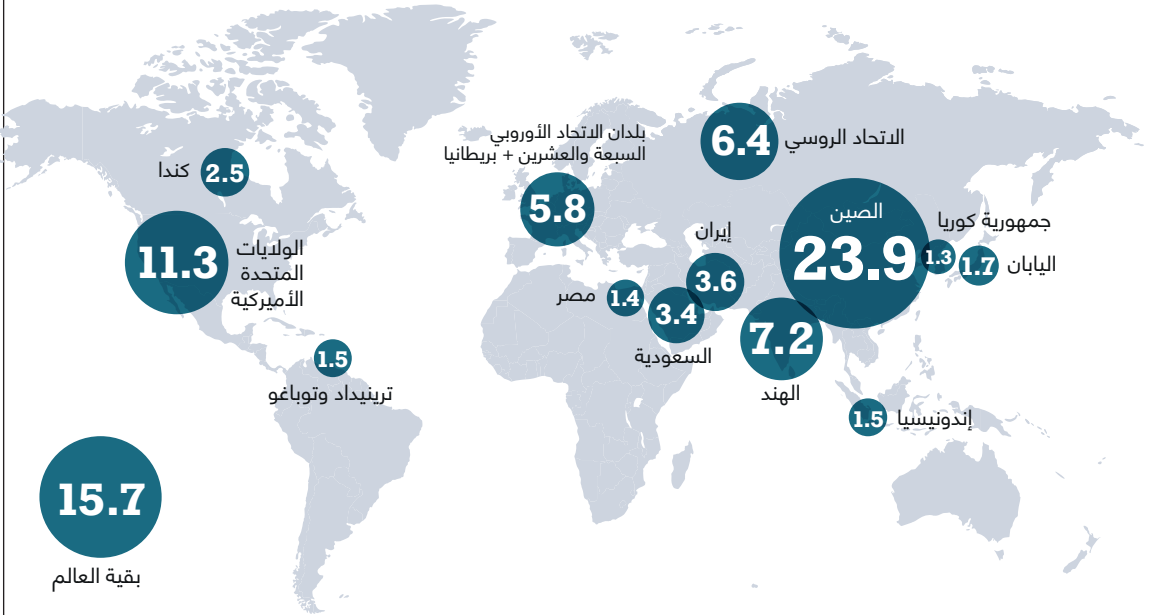
ينتج العالم نحو 120 مليون طن من الهيدروجين، تصل حصة الهيدروجين النقي منها إلى الثلثين، فيما يشكل الثلث المتبقي مزيجاً من الهيدروجين مع غازات أخرى (وكالة الطاقة الدولية، 2019). وتعتبر الصين أكبر منتج ومستهلك للهيدروجين على مستوى العالم (الشكل 1.2)، حيث تنتج حوالي 24 مليون طن من الهيدروجين النقي سنوياً، وهذا يعادل ثلث الإنتاج العالمي تقريباً.

ويمكن استخدام الهيدروجين أيضاً كوقود، حيث يمكن عند حرقه أن يولد حرارة تزيد على 1 000 م° دون إطلاق غاز ثاني أكسيد الكربون⁵. ويمكن للهيدروجين أيضاً أن يدخل في صناعة خلايا الوقود، حيث يتفاعل كيميائياً مع الأوكسجين لتوليد الكهرباء دون إطلاق أي ملوثات أو غازات دفيئة، ولينتج عن هذا التفاعل سوى بخار الماء.

5 مع أن حرق الهيدروجين لا يؤدي إلى إطلاق غاز ثاني أكسيد الكربون، ولكنه يؤدي إلى انبعاث أكسيد النيتروز الذي يعتبر من ملوثات الهواء الرئيسية.



الشكل 2.1 استهلاك الهيدروجين في عام 2020 (مليون طن سنوياً)



مصدر الخريطة: قاعدة بيانات ناتشورال إيرث، 2021
 ملاحظة: تم استخلاص هذه القيم من الإنتاج الحالي لكل من: الأمونيا، الميثانول، وأنشطة التكرير والاختزال المباشر للحديد الصلب.
 إخلاء مسؤولية: تم إدراج الخريطة لأغراض توضيحية فقط. الحدود الموضحة في الشكل لا تقر أو تدل ضمناً على قبول أو موافقة الوكالة.

2.2 مسارات الإنتاج الرئيسية

على الرغم من وفرة الهيدروجين على الأرض، إلا أنه لا يوجد بكميات كبيرة كغاز نقي ولا تتوفر مخزونات كبيرة منه في الأرض لاستخراجها.⁶ وينحصر وجود الهيدروجين تقريباً في المركبات، ولا سيما جزيئات الماء (مع الأوكسجين) والوقود الأحفوري (مع الكربون). ويتطلب إطلاقه من هذه المركبات الكثير من الطاقة.

ويشيع استخدام نظام ترميز لوني للإشارة إلى الطرق المختلفة لإنتاج الهيدروجين (الشكل 2.2). ويندرج معظم الهيدروجين اليوم ضمن فئة الهيدروجين "الرمادي" الذي يتم إنتاجه باستخدام الوقود الأحفوري، ولا سيما من خلال إعادة تشكيل غاز الميثان بالبخار أو من خلال تغويز الفحم.⁷ وتؤدي طرق الإنتاج المعتمدة على الوقود الأحفوري، والتي تمثل 95% من موارد الهيدروجين الحالية، إلى انبعاثات كبيرة من غاز ثاني أكسيد الكربون، الأمر الذي يتعارض مع مسار الانتقال إلى الحياد الكربوني.

الشكل 2.2 التصنيف اللوني لإنتاج الهيدروجين

الهيدروجين الأخضر	الهيدروجين الأزرق	الهيدروجين الرمادي	
التحليل الكهربائي	إعادة التشكيل أو التغويز مع التقاط الكربون	إعادة التشكيل أو التغويز	العملية
مصادر الطاقة المتجددة	الوقود الأحفوري	الوقود الأحفوري	مصدر الطاقة
0	0.4 - 4.5 €	إعادة التشكيل: 9-11 € التغويز: 18-20 €	الانبعاثات المقدرة من عملية الإنتاج ^أ

ملاحظة: أ) مكافئ ثاني أكسيد الكربون/كغ = كمية مكافئ ثاني أكسيد الكربون لكل كيلوغرام؛ ب) بالنسبة للهيدروجين الرمادي، على افتراض انبعاث 2 كغ من مكافئ ثاني أكسيد الكربون/كغ لتسرب الميثان من عملية إعادة تشكيل الميثان بالبخار. ج) بالنسبة لانبعاثات الهيدروجين الأزرق، على افتراض التقاط الكربون بنسبة تتراوح بين 98% و68%، وتسرب الميثان بنسبة تتراوح بين 0.2% و1.5%.

6 يمكن العثور على بعض جيوب غاز الهيدروجين في قشرة الأرض. ويمكن من الناحية النظرية استخراج غاز الهيدروجين النقي، المعروف باسم الهيدروجين الطبيعي أو الذهبي، بطريقة مماثلة لاستخراج النفط والغاز. وتقوم الشركات بالتنقيب عن مثل هذه الموارد في أماكن مثل فرنسا ومالي والولايات المتحدة الأمريكية. ومع ذلك، يبقى هذا النوع من الهيدروجين فضولاً جيولوجياً، ولا يشكل مصدراً متجدداً للطاقة (برينزوفر، سيسبي وديالو، 2018؛ زغونيك، 2020).

7 تنقسم هذه الفئة أحياناً إلى "رمادي" للغاز الطبيعي، و"بنّي" لفحم الليغيت، و"أسود" لفحم البتومين. ويشير اللون "الرمادي" المذكور في هذا التقرير إلى الهيدروجين الذي يتم إنتاجه باستخدام الوقود الأحفوري عموماً.

هناك طريقتان رئيسيتان قيد الدراسة لاستبدال الهيدروجين الرمادي بأسلوب إنتاج نظيف: الهيدروجين الأخضر والأزرق. ويتوافق إنتاج الهيدروجين الأخضر تماماً مع مسار الحياد الصفري؛ حيث تستخدم تقنيات معروفة تعتمد على التحليل الكهربائي للماء (الإطار 2.1) بواسطة الطاقة الكهربائية المتجددة. ومع أن إنتاج الهيدروجين من مصادر متجددة لا يزال محدوداً، إلا أنه من المتوقع أن يتغير هذا الأمر مع ازدياد التركيز العالمي على إمكانياته.

ويتم إنتاج الهيدروجين الأزرق من الوقود الأحفوري باستخدام تقنية احتجاز الكربون وتخزينه. ويساهم تعديل هذه التقنية بما يلائم منشآت إنتاج الهيدروجين الرمادي في مواصلة استخدام هذه الأصول وخفض انبعاثات غازات الدفيئة. ومع ذلك، فإن ارتباط إنتاج الهيدروجين الأزرق بالغاز الأحفوري قد يؤدي إلى مخاطر تسرب الميثان خلال عمليات المنبع (الاستكشاف والإنتاج) والمرحلة الوسيطة (النقل والتخزين)، وهو غاز دفيء أقوى من ثاني أكسيد الكربون. ويمكن إنتاج الهيدروجين الأزرق منخفض الانبعاثات فقط في حال لم تتجاوز نسبة تسرب الميثان 0.2%⁸ مع احتجاز الكربون بنسبة تقارب 100%. ولا يزال يتعين إثبات صحة هذه المعدلات على نطاق واسع (باور وآخرون، 2021؛ هاورث وجاكوبسون، 2021؛ وكالة الطاقة الدولية، 2021ب؛ آيرينا، 2020ب؛ سونويس وآخرون، 2016).

وهناك العديد من القيود الأخرى التي حدث من انتشار الهيدروجين الأزرق؛ فاعتماده على الوقود الأحفوري يجعله عرضة لتقلبات أسعار النفط كما حدث عندما ارتفعت هذه الأسعار بشكل حاد في نهاية عام 2021 عبر أجزاء واسعة من العالم، وخاصة في آسيا وأوروبا (كولينز، 2021)، عدا عن كونه لا يدعم أهداف المرونة المناخية أو أمن الطاقة. ويترتب على إنتاج الهيدروجين الأزرق أيضاً تكاليف نقل وتخزين ثاني أكسيد الكربون ومراقبة هذا المخزون.

مع ذلك، وفي حال امثاله لمعايير الانبعاثات الصارمة، يمكن للهيدروجين الأزرق أن يلعب دوراً مهماً في زيادة إنتاج الهيدروجين على المدى القصير إلى المتوسط، وحفز تطوير البنية التحتية والتقنيات ذات الصلة على امتداد سلسلة القيمة. علاوةً على ذلك، يمكن للهيدروجين الأزرق أن يوفر مزيداً من المرونة في سوق الهيدروجين، وقد يصبح على المدى الطويل حلاً خالياً من الانبعاثات.

وثمة مسارات أخرى منخفضة الكربون لإنتاج الهيدروجين؛ ومنها الهيدروجين "الفيرزي" الذي يعتمد إنتاجه على التحلل الحراري لغاز الميثان الطبيعي، وهي عملية لا ينتج عنها أي انبعاثات كربونية وإنما يتمثل منتجها الثانوي الوحيد في "أسود الكربون" الذي يحظى بسوق خاصة به وإن كان محدوداً نسبياً. وهناك أيضاً الهيدروجين "الوردي" المشتق من الطاقة النووية. والخيار الثالث هو تغويز الكتلة الحيوية باستخدام تقنيات احتجاز الكربون وتخزينه، وقد ينتج عن هذه العملية انبعاثات كربونية سالبة. ولم يتضمن هذا التقرير أيّاً من الأنواع الثلاثة هذه، وإنما يعطي الأولوية لطرق الإنتاج الأكثر تقدماً.



8 تتماشى هذه النسبة مع أهداف مبادرة مناخ النفط والغاز (أغورا، 2021).

2.1 الإطار
ما هو التحليل الكهربائي؟

التحليل الكهربائي هو عملية كيميائية يتم إجراؤها لإنتاج الهيدروجين من الماء والكهرباء. وتم اختراع أجهزة التحليل الكهربائي اللازمة لفصل الماء إلى أكسجين وهيدروجين قبل أكثر من 200 عام.

ويوجد اليوم العديد من تقنيات التحليل الكهربائي للماء يتمتع أربع منها بآفاق واعدة، هي: المحلل الكهربائي القلوي، وغشاء تبادل البروتون (PEM)، وخلايا التحليل الكهربائي للأكسيد الصلب (SOEC)، وغشاء التبادل الأنيوني. وتستخدم تقنيات التحليل الكهربائي المنتشرة حالياً إما المحاليل القلوية أو غشاء تبادل البروتون. وتعتبر تقنية غشاء التبادل الأنيوني حديثة نسبياً ومحدودة الانتشار؛ وتكمن ميزاتها المحتملة في عدم حاجتها إلى أي معادن نفيصة واستخدامها غشاء أقل تكلفةً من ذلك المستخدم في تقنية غشاء تبادل البروتون.

الجدول 2.1 مقارنة بين تقنيات التحليل الكهربائي الأساسية

التقنية	الحالة التجارية	الاعتبارات
المحلل الكهربائي القلوي	سائد الانتشار	• تصميم بسيط للنظام • يُستخدم في تطبيقات أخرى مع إمكانية توسيع سلسلة التوريد الحالية • استجابة ديناميكية أبطأ، أقل ملاءمةً لمصادر الطاقة المتجددة المتغيرة.
غشاء تبادل البروتون	تقنية تجارية سريعة النمو	• يحتاج إلى البلاتينوم والإيريديوم. ويمكن للإنتاج العالمي الحالي من الإيريديوم أن يدعم إنتاج 3 - 7.5 جيجاواط سنوياً. • استجابة ديناميكية أسرع، مناسبة تماماً لمصادر الطاقة المتجددة المتغيرة وتنظيم الجهد.
خلايا التحليل الكهربائي للأكسيد الصلب	محطات تجريبية	• غير دورية (الزيادة أو خفض الحمل)، مناسبة تماماً لإنتاج الهيدروجين بحمل أساسي ثابت.
غشاء التبادل الأنيوني	محدود الانتشار	• لا يستخدم أي معادن ثمينة. • الغشاء أقل تكلفةً من الغشاء المستخدم في تقنية غشاء تبادل البروتون

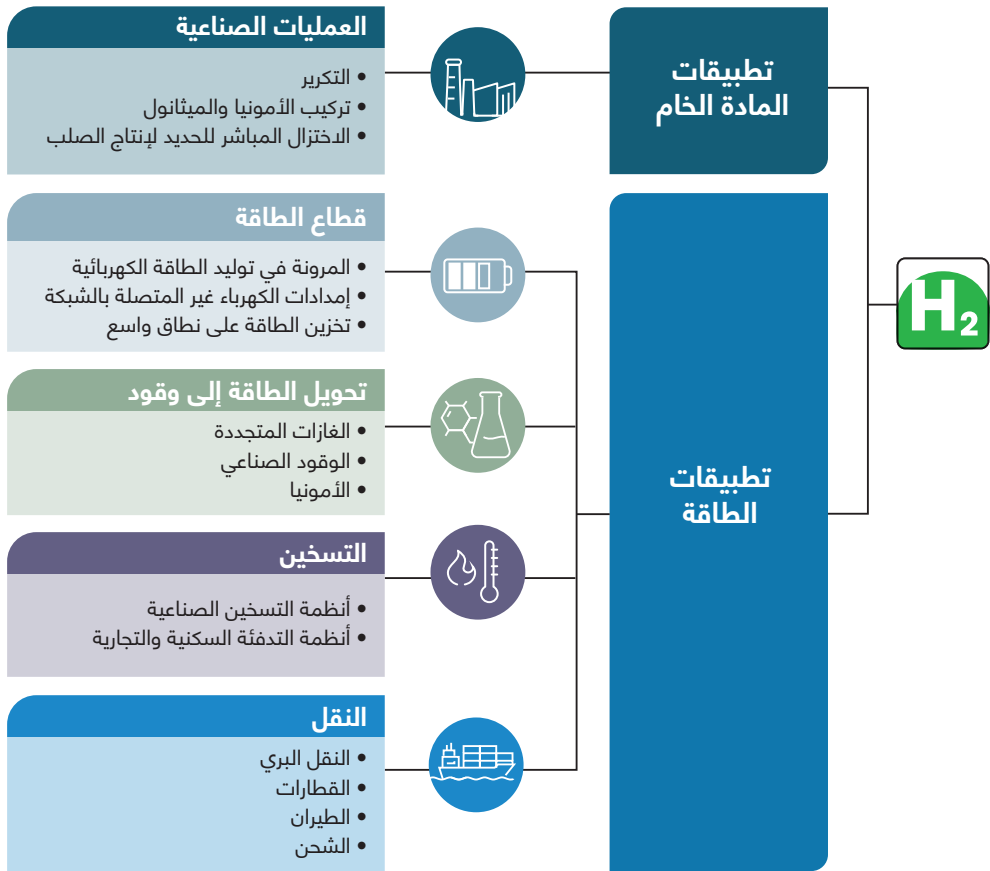
المصدر: إيرينا (2020، 2020ب).

2.3 تطبيقات الهيدروجين وتحديد الأولويات

يعتبر الهيدروجين ناقل طاقة متعدد الاستخدامات. ويوضح الشكل 2.3 الاستخدامات المقترحة للهيدروجين، إذ قد يغطي قسم منها الطلب المبكر على الهيدروجين ويحفز انطلاقة الصناعة.



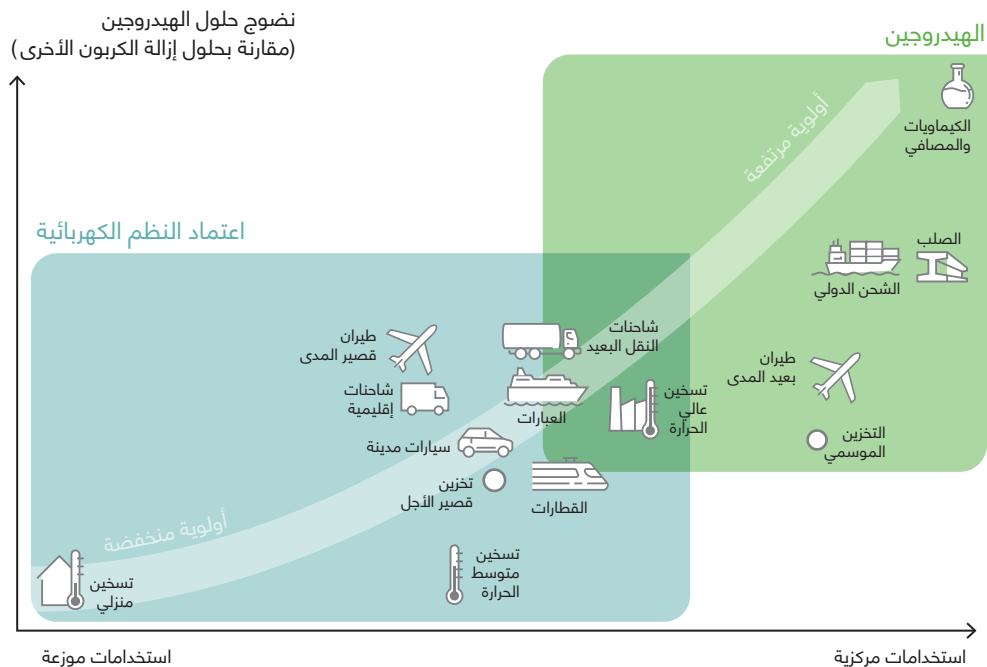
الشكل 2.3 الاستخدامات المحتملة للهيدروجين النظيف



تتطلب استراتيجيات إزالة الكربون إدارة دقيقة لضمان أعلى مستويات الكفاءة في نشر التقنيات والحلول المختارة. وبالتالي فإن تنوع الخيارات يستوجب تحديد الاستخدامات التي يحقق فيها الهيدروجين أكبر قيمة ممكنة؛ حيث أن إنتاج ونقل وتحويل الهيدروجين يحتاج إلى طاقة يؤدي بذلك إلى ارتفاع حجم الطلب عليها. وقد يؤدي الاستخدام العشوائي أيضاً إلى إبطاء وتيرة انتقال الطاقة، وبالتالي إضعاف جهود إزالة الكربون في قطاع إنتاج الطاقة. ولهذا من الأفضل الاحتفاظ بالهيدروجين للاستخدامات التي لا يوجد لها حالياً بدائل قابلة للتطبيق. ويقارن الشكل 2.4 الاستخدامات النهائية المحتملة بناءً على حجم التطبيق ونضج طول الهيدروجين مقارنةً بتلك القائمة على الكهرباء. ويجب تركيز السياسات على حلول الهيدروجين المركزية الأكثر نضجاً؛ ويشمل ذلك الأبحاث المخصصة، والتخطيط، والسياسات الداعمة (آيرينا، قيد الإصدار-ب).

وللتحول إلى اقتصاد مستدام حقاً، لا يكفي استبدال مصادر الطاقة مع الحفاظ على منظومة الطاقة الحالية، وإنما ينبغي إيجاد طرق أكثر كفاءة وإضافة لاستخدام الطاقة. ويتطلب هذا بطبيعة الحال خفض الاستهلاك غير الضروري للطاقة في العديد من الاستخدامات النهائية، وتغيير المنظومة الاقتصادية الحالية القائمة على زيادة الاستهلاك. وفي الصناعات الثقيلة على سبيل المثال، يمكن تفادي 40% من الانبعاثات الكربونية من خلال إعادة استخدام الصلب والألمنيوم والبلاستيك بشكل أكثر فعالية (لوفينز، 2021). وفي مثال آخر، يمكن أيضاً التحول من رحلات الطيران القصيرة إلى استخدام القطارات الكهربائية لتقليل الطلب على الطاقة قدر الإمكان.

الشكل 2.4 أولويات سياسة الهيدروجين النظيف



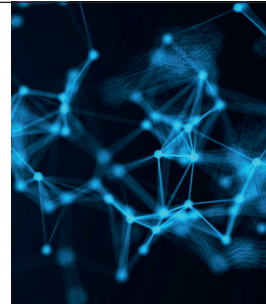
المصدر: آيرينا (قيد الإصدار - ب)

2.4 معوقات نشر استخدام الهيدروجين

تُحول المعوقات التالية دون زيادة مساهمة الهيدروجين النظيف بشكل أكبر في مسار تحول الطاقة:

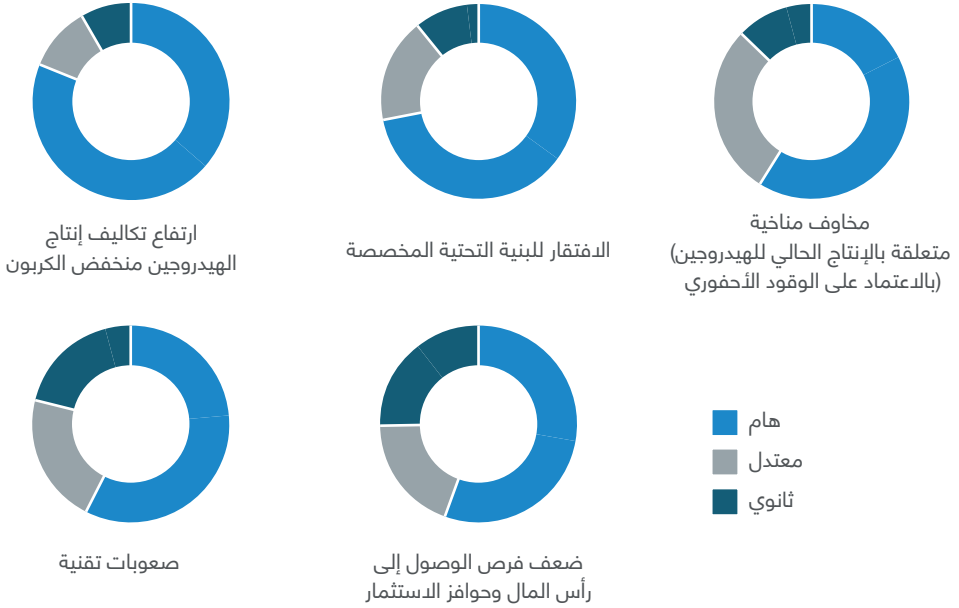
- **التكلفة:** لا تزال تكاليف إنتاج الهيدروجين النظيف، ولا سيّما الهيدروجين الأخضر، مرتفعة بالمقارنة مع الوقود عالي الكربون. ولا يقتصر هذا الارتفاع على تكلفة الإنتاج فحسب، وإنما يتعداه إلى ارتفاع تكاليف النقل والتحويل والتخزين أيضاً. وقد يكون اعتماد تقنيات الهيدروجين النظيف للاستخدامات النهائية أمراً مكلفاً مع استمرار الحاجة إلى نشر تقنيات احتجاز الكربون وتخزينه على نطاق واسع.
- **النضج التقني:** لا تزال بعض التقنيات المطلوبة لإزالة الكربون ضمن سلسلة القيمة للهيدروجين تفتقر إلى مستوى الجاهزية التكنولوجية الكافية ويتعين إثبات جدوى استخدامها على نطاق واسع. وعلى سبيل المثال: لا تتوفر حالياً توربينات غازية تعمل باستخدام الهيدروجين حصراً. وفي قطاع التجارة البحرية، لا يوجد سوى نموذج أولي واحد فقط لسفن نقل الهيدروجين السائل.
- **الكفاءة:** يتسبب إنتاج الهيدروجين وتحويله باستهلاك كميات كبيرة من الطاقة عبر جميع مراحل سلسلة القيمة، بما في ذلك الإنتاج والنقل والتحويل والاستخدام. علاوةً على ذلك، يعتبر إنتاج الهيدروجين الأزرق كذلك من العمليات كثيفة الاستهلاك للطاقة، ويؤدي بالتالي إلى زيادة الطلب الإجمالي عليها.
- **كمية كافية من الطاقة المتجددة:** بحلول عام 2050، قد يستهلك إنتاج الهيدروجين باستخدام تقنيات التحليل الكهربائي ما يقارب 21 000 تيراواط/ساعة - وهذا يعادل كمية الطاقة الكهربائية المُنتجة عالمياً اليوم (آيرينا، 2021). ومع اعتماد المزيد من قطاعات الاستخدام النهائي على النظم الكهربائية، قد تصبح قلة الكهرباء المتجددة عقبة في وجه انتشار الهيدروجين الأخضر.
- **عدم يقين السياسات واللوائح التنظيمية:** على الرغم من تعهد أكثر من 140 دولة بتحقيق الحياد الكربوني خلال العقود القليلة المقبلة، إلا أن سرعة بلوغ هذه الأهداف لا تزال غير مؤكدة. وبالتالي فهناك حاجة ماسة إلى وضع سياسات مستقرة طويلة الأجل لدعم تطوير ونشر تقنيات إنتاج الهيدروجين على نطاق واسع.
- **المعايير والاعتماد:** تفتقر البلدان عموماً إلى التلبيات المؤسسية اللازمة لتتبع إنتاج واستهلاك أنواع الهيدروجين المختلفة وتحديد خصائصها (مثل: انبعاثات المنشأ ودورة الحياة) (آيرينا، 2020ب؛ آيرينا، وكالة الطاقة الدولية، وشبكة سياسة الطاقة المتجددة للقرن الحادي والعشرين، 2020).⁹ علاوةً على ذلك، لا يتم احتساب الهيدروجين في الإحصائيات الرسمية لإجمالي الاستهلاك النهائي للطاقة، ولا يتم كذلك احتساب القيمة الاقتصادية لمساهمة الهيدروجين النظيف في خفض الانبعاثات.
- **معضلة الدجاجة والبيضة:** هناك معضلة الدجاجة والبيضة في جهود بناء البنية التحتية اللازمة لإنتاج الهيدروجين؛ فمن دون الطلب، سيكون من المخاطرة الاستثمار في إنتاج الهيدروجين على نطاق واسع والذي يشكل بدوره شرطاً أساسياً لخفض التكاليف؛ ومن دون وفورات الحجم، يبقى إنتاج التقنيات باهظ التكلفة.

© King Ropes Access/Shutterstock.com



⁹ غالباً ما يشار إلى آلية تتبع انبعاثات المنشأ ودورة الحياة باسم نظام "ضمان المنشأ"، ويعتبر هذا النظام أحد ركائز صنع سياسات الهيدروجين الأخضر (آيرينا 2020ب).

الشكل 2.5 المعوقات الأساسية أمام تطوير سياسات واستراتيجيات إنتاج الهيدروجين



المصدر: استطلاع أعضاء الوكالة الدولية للطاقة المتجددة، 2021.



الإطار 2.2

إستطلاعات العوامل الجيوسياسية لإنتاج الهيدروجين
تم إجراء مسحين طوعيين لاستطلاع آراء ضُاع السياسات وخبراء القطاع، وذلك بهدف توفير خط
أساس لمراقبة تطورات قطاع الهيدروجين.

ركز المسح الأول على جمع المدخلات من الدول الأعضاء في الوكالة لفهم خططها الوطنية ودوافعها والمعوقات
التي تحول دون مساهمة الهيدروجين في انتقال الطاقة. دُعيت للمشاركة في ذلك المسح جميع الدول الأعضاء،
وكان عددها حينها 164 دولة بالإضافة إلى الاتحاد الأوروبي. وتم استلام 48 إجابة من 37 عضواً.

واستهدف المسح الثاني الخبراء المتخصصين (عينة هادفة) لجمع آراء فنية أكثر. دُعي للمشاركة في المسح الثاني
162 خبيراً وتم تلقي 78 إجابة، وجرى تحليل وتجميع المدخلات التي تم تلقيها. ويعرض هذا التقرير عينة مُنتقاة من
النتائج، فيما تتوفر النتائج كاملة ضمن ملحق رقمي.

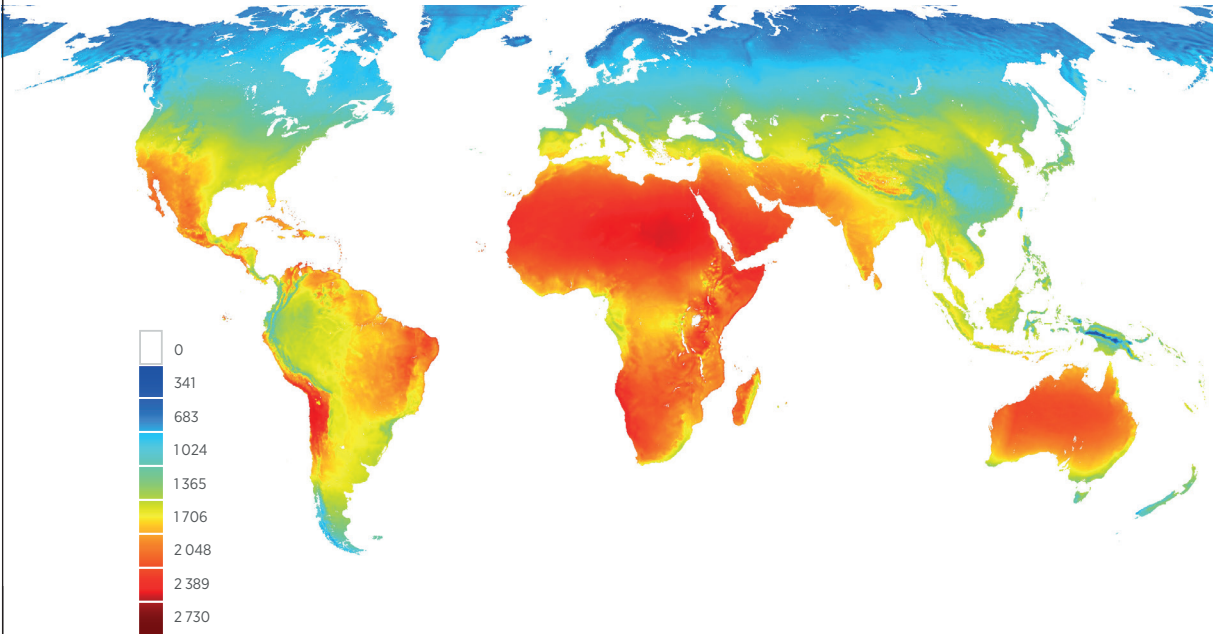
2.2 آفاق التجارة الدولية للهيدروجين

يجري تداول الهيدروجين اليوم على نطاق محلي ضيق. حيث يتم إنتاج ما يقارب 85% من غاز الهيدروجين واستهلاكه ضمن المنشآت نفسها بدلة من شرائه وبيعه في السوق الأوسع (وكالة الطاقة الدولية، 2019). وحتى في حال بيع الهيدروجين، لا يتم نقله عادةً لمسافات طويلة بسبب الصعوبات اللوجستية وارتفاع التكاليف.

وقد يصبح الهيدروجين بمرور الوقت سلعة متداولة عالمياً. ويوفر الهيدروجين الأخضر وسيلة إضافية لنقل "أشعة الشمس"، بمعنى نقل الطاقة الشمسية ومصادر الطاقة المتجددة الأخرى عبر الحدود. وتعتبر تكلفة الكهرباء عنصر التكلفة الأكبر لإنتاج الهيدروجين الأخضر (آيرينا، 2020). وتتفاوت سعر الهيدروجين¹⁰ بين المناطق تبعاً لاختلاف التكلفة المستوية لمصادر الطاقة المتجددة فيها. ويتم إنتاج الهيدروجين الأخضر بتكلفة مناسبة في المواقع التي تمتلك المزيج الأمثل من مصادر الطاقة المتجددة الوفيرة (الشكلين 2.6 و 2.7)، والأراضي المتاحة، ومصادر المياه، والقدرة على نقل وتصدير الطاقة إلى مراكز الطلب الكبيرة.

10 يعود اختلاف التكلفة المستوية بين المناطق بشكل رئيسي إلى: (1) جودة مصدر الطاقة؛ (2) التكلفة الرأسمالية لمصادر الطاقة المتجددة وتقنيات التحليل الكهربائي؛ (3) المتوسط المرجح لتكلفة رأس المال. وتتغير قيمة العاملين الآخرين بمرور الوقت مع تركيب المزيد من القدرة الإنتاجية وتطور الخبرات (الوكالة الدولية للطاقة المتجددة، قيد الإصدار).

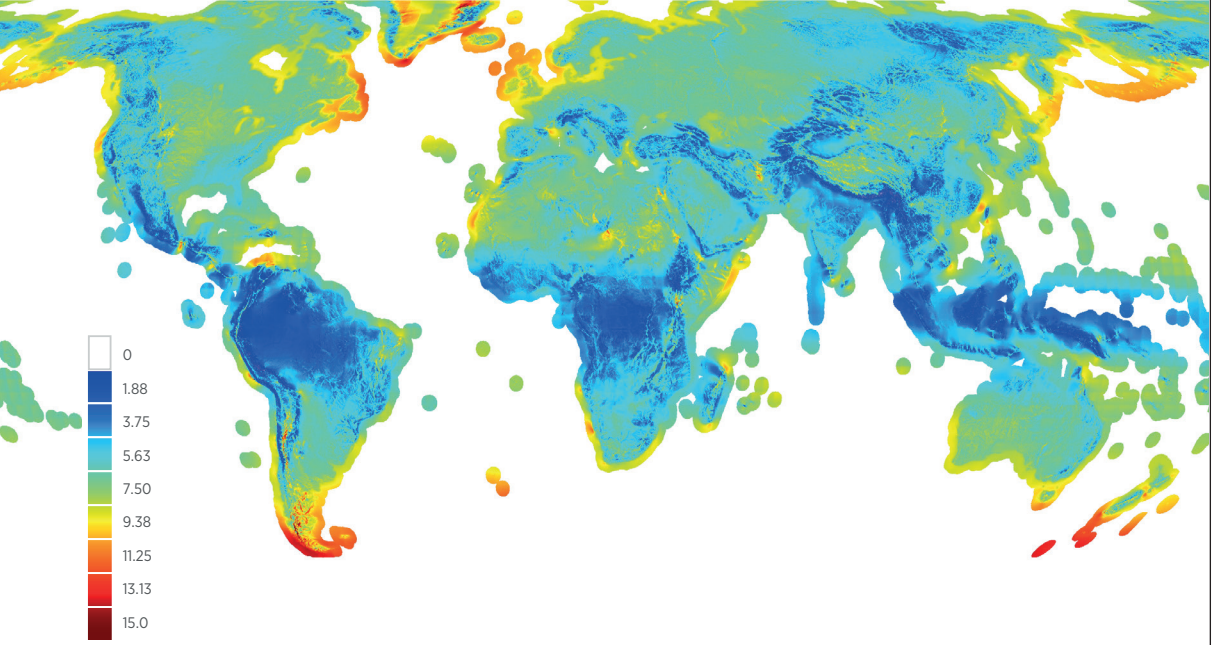
الشكل 2.6 الإمكانيات الفنية للطاقة الشمسية عالمياً



© آيرينا (2022)، المصدر: فورتكس (2021)

ملاحظة: المعدل السنوي للإشعاع الأفقي العالمي (كيلوواط/م²). المعلومات متوفرة أيضاً على المنصة الإلكترونية لاطلس آيرينا العالمي لموارد الطاقة المتجددة. إخلاء مسؤولية: تم إدراج الخريطة للأغراض توضيحية فقط، والحدود الموضحة في الشكل لا تعني أي تأييد أو قبول من قبل الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (آيرينا).

الشكل 2.7 الإمكانات الفنية لطاقة الرياح عالمياً



© آيرينا (2022)، المصدر: فورتكس (2021)

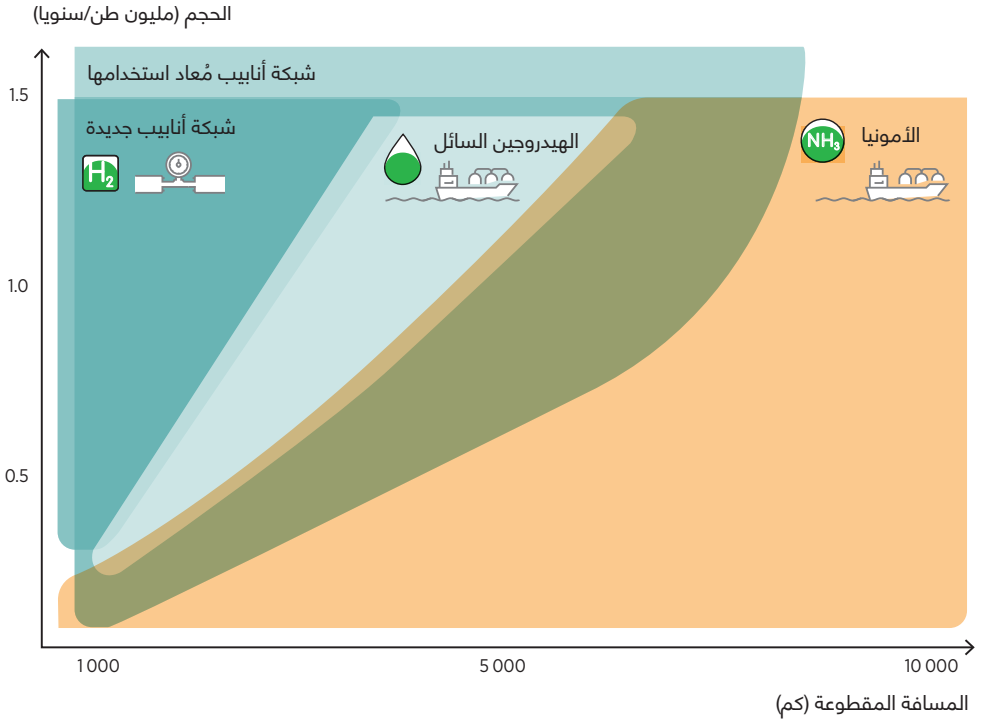
ملاحظة: المتوسط السنوي لسرعة الرياح (م/ثا). المعلومات متوفرة أيضاً على المنصة الإلكترونية لأطلس آيرينا العالمي للطاقة المتجددة. إخلاء مسؤولية: تم إدراج الخريطة للأغراض توضيحية فقط، والحدود الموضحة في الشكل لا تعني أي تأييد أو قبول من قبل الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (آيرينا).

هناك طريقتان رئيسيتان لنقل الهيدروجين عبر الحدود: خطوط الأنابيب والسفن،¹¹ وتتحدد طريقة النقل الأقل تكلفةً بينهما تبعاً للمسافة وحجم الشحنات المنقولة (الشكل 2.8). وعلى سبيل المثال، للشحنات الصغيرة (0.3 مليون طن من الهيدروجين سنوياً مثلاً)، قد تكون خطوط الأنابيب أقل تكلفةً من السفن عند نقل هذه الشحنات لمسافات لا تتجاوز 1 500 كم. أما بالنسبة للشحنات الكبيرة (1.5 مليون طن من الهيدروجين سنوياً مثلاً)، فتعد خطوط أنابيب نقل الهيدروجين المبنية حديثاً هي الخيار الأقل تكلفةً لمسافات تصل إلى 4 000 كم. وفي الحالات التي يمكن فيها استخدام أنابيب الغاز الطبيعي،¹² يمتد النطاق الفعال للتكلفة حتى 8 000 كم. ولوضع بعض هذه المسافات في منظورها الصحيح، يتطلب الربط بين العاصمة الناميبية ويندهوك وجوهانسبورغ في جنوب أفريقيا وجود شبكة أنابيب بطول 1 500 كم تقريباً. كما يستلزم ربط تورنتو الكندية بمدينة مكسيكو وجود شبكة بطول 4 000 كم. أما شحن الهيدروجين بين تشيلي واليابان، فيحتاج إلى حوالي 17 000 كم.

11 من الناحية النظرية، يعد النقل باستخدام الشاحنات أحد الخيارات المتاحة أيضاً. إلا أن هذه الطريقة مناسبة لنقل كميات قليلة فحسب - باستخدامها لتزويد محطات الوقود مثلاً. ومن الناحية العملية، تعد خطوط الأنابيب والسفن الواسيلتان الأنسب لنقل الشحنات الضخمة لمسافات طويلة.

12 كونها مادة متوافقة مع الهيدروجين، يمكن استخدام شبكة خطوط أنابيب الغاز الحالية لنقل الهيدروجين عند تراجع الطلب على الغاز بالتوازي مع زيادة الطلب على الهيدروجين. ويمكن لذلك أن يساهم في خفض التكاليف بنسبة 65 - 94% مقارنة بإنشاء شبكات جديدة.

الشكل 2.8 كفاءة التكلفة لخيارات نقل الهيدروجين بالاستناد إلى المسافة وحجم الشحنات



© Oxanasa/shutterstock.com



يوجد اليوم حوالي 4 600 كم من الأنابيب المخصصة لنقل الهيدروجين في مناطق شمال غرب أوروبا، وروسيا، والولايات المتحدة الأمريكية. ويتم التخطيط حالياً لإنشاء شبكات خطوط أنابيب رئيسية في أوروبا تحت مسمى "العمود الفقري للهيدروجين" (الغاز من أجل المناخ، 2021). ويمكن أيضاً نقل الكهرباء المتجددة عبر الكابلات وتحويلها إلى هيدروجين في نهاية الخط. ويتحدد الخيار الأنسب بين خطوط الأنابيب أو الكابلات بالاستناد إلى عوامل عدة، بما في ذلك المنتج النهائي المطلوب، والتضاريس الجغرافية، والمسافة المقطوعة.

ويمكن من الناحية الفنية نقل الهيدروجين باستخدام السفن لمسافات أكبر عند عدم القدرة على استخدام خطوط الأنابيب. ونظراً لانخفاض كثافة الطاقة لغاز الهيدروجين قياساً بحجمه،¹³ لذا من الأفضل تحويله إلى سائل ذي كثافة طاقة أعلى قبل تحميله على السفن. وهناك العديد من النواقل المتاحة لنقل الهيدروجين باستخدام السفن (الإطار 2.3)، ويأتي في مقدمتها الأمونيا الذي يشكل الأساس لسلعة متداولة عالمياً، حيث بلغت مبيعاته 18 مليون طن في عام 2020 (حوالي 10% من الإنتاج العالمي) (أتشيسون، 2021).

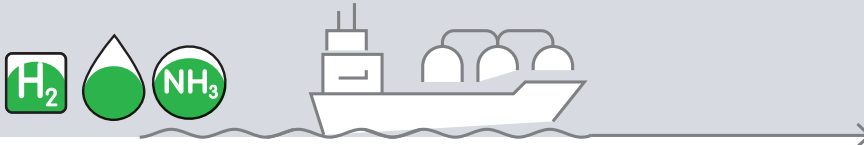
13 تبلغ كثافة الطاقة للهيدروجين 3 كيلواط/ساعة لكل متر مكعب بالمقارنة مع 10 كيلواط للمتر المكعب من غاز الميثان في الظروف الطبيعية.

2.3 الإطار الوسائل الرئيسية الثلاث لنقل الهيدروجين باستخدام السفن

الهيدروجين السائل: يجب تبريد جزيئات الهيدروجين إلى -253 درجة مئوية في محطات الموانئ قبل تحميلها على متن ناقلات شديدة العزل. ونتيجةً لذلك، تستهلك عملية التسييل 25 - 35% من الحجم الأولي للهيدروجين. ويوجد اليوم سفينة واحدة فقط لنقل الهيدروجين النقي عبر المحيطات، وهي الناقلة "سويسو فرونتير" التي بنتها شركة "كاواساكي" أواخر عام 2019 وانطلقت في رحلتها الأولى إلى أستراليا أواخر عام 2021 (هاردينج، 2019).

ناقلات الهيدروجين العضوية السائلة: يمكن لبعض المركبات العضوية امتصاص وإطلاق الهيدروجين من خلال تفاعلات كيميائية محددة. ويمكن استخدام ناقلات الهيدروجين العضوية السائلة كوسيلة لتخزين ونقل الهيدروجين على شكل سوائل دون الحاجة إلى تبريد. وتتشابه هذه الناقلات إلى حد كبير مع النفط الخام والمنتجات النفطية، وبالتالي يمكن تكييف البنية التحتية الحالية لنقل النفط لاستخدامها في نقل ناقلات الهيدروجين العضوية السائلة (نيرمان وآخرون، 2019).

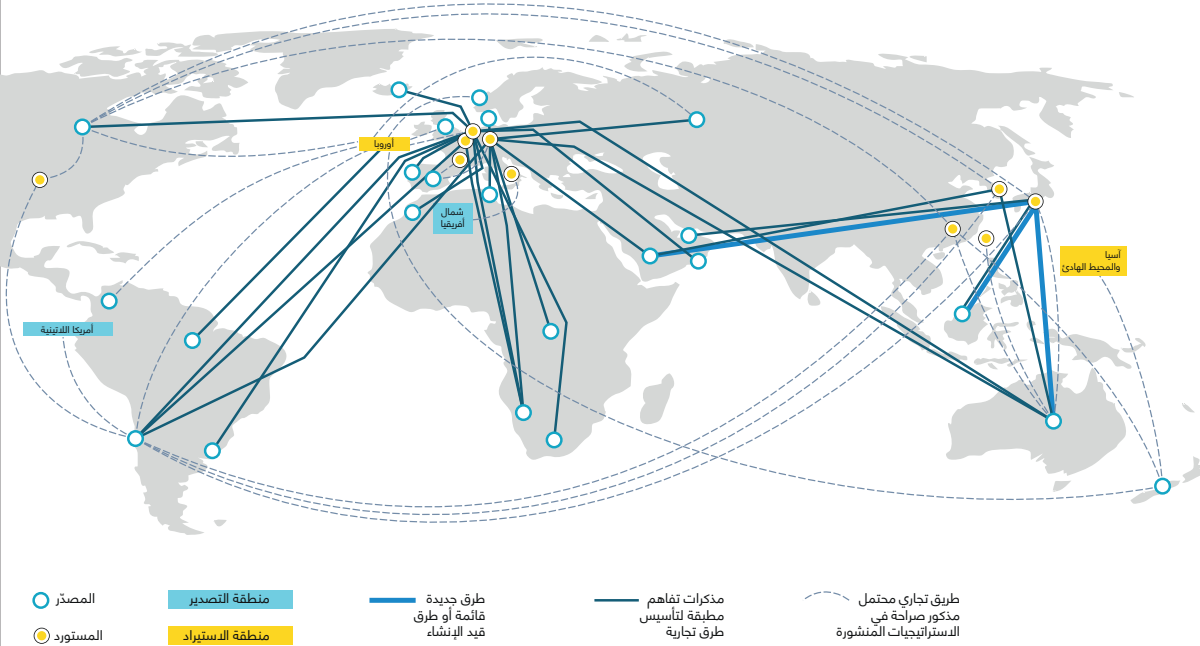
الأمونيا: يمكن تحويل الهيدروجين إلى أمونيا من خلال التفاعل مع النيتروجين الهوائي باستخدام الكهرباء والهواء. ويمتاز الأمونيا بكثافة طاقة أعلى بكثير من الهيدروجين، وبالتالي يمكن من خلاله نقل كمية أكبر من الطاقة مع العلم أن هناك تجارة دولية راسخة أصلاً للأمونيا يمكن الاستفادة منها. ويتم استخدام الأمونيا اليوم كمادة خام تدخل في العديد من الصناعات ولا سيما الأسمدة. ويمكن استخدامه أيضاً كوقود لإزالة الكربون كما في قطاع النقل البحري وتوليد الطاقة. ويتمثل الجانب السلبي للأمونيا في كونه مادة سامة في حال حدوث تسرب، وهو أيضاً مصدر محتمل لانبعاث أكسيد النيتروجين.



ومع أن تكاليف نقل الهيدروجين لا تزال مرتفعة للغاية، إلا أنه من المتوقع أن تنخفض مع تحسن وفورات الحجم، وانخفاض مخاطر المشاريع، وتطور التقنيات. ويمكن توسيع نطاق تجارة الهيدروجين للزرق بوتيرة أسرع من الهيدروجين الأخضر كونه يتمتع بتكلفة إنتاج أقل مع إمكانية الاستفادة من البنية التحتية الحالية للغاز. ومن المتوقع أن تنامي تجارة الهيدروجين الأخضر حتى عام 2030 بفضل تحسن وفورات الحجم وتبني سياسات داعمة، مما يؤدي بدوره إلى خفض تكاليف الإنتاج.

يشير تحليل الوكالة الدولية للطاقة المتجددة إلى أنه سيتم نقل ما يقارب ثلث إنتاج الهيدروجين الأخضر عبر الحدود بحلول عام 2050 (أيرينا، قيد الإصدار- أ)، وهذا أكثر قليلاً من حجم التجارة الدولية للغاز الطبيعي اليوم (24%). ومن المرجح أن تمر نحو نصف إمدادات الهيدروجين بحلول عام 2050 عبر خطوط الأنابيب، بما في ذلك خطوط أنابيب الغاز الطبيعي الحالية المعاد استخدامها. أما الكمية المتبقية، فمن المرجح أن يتم نقلها لمسافات بعيدة باستخدام السفن على شكل أمونيا. ويشبه ذلك إلى حد كبير تجارة الغاز الطبيعي، والتي تنقسم إلى تجارة إقليمية قائمة على خطوط الأنابيب (48% في عام 2020)، وأخرى عالمية للغاز الطبيعي المسال (52%) (بريتيش بتروليم، 2021). وتعمل الدول بالفعل على عقد صفقات ثنائية قد تمهد الطريق أمام علاقات جديدة لتجارة الهيدروجين (الشكل 2.9).

الشكل 2.9 الشبكة المتنامية لطرق وخطط واتفاقيات تجارة الهيدروجين

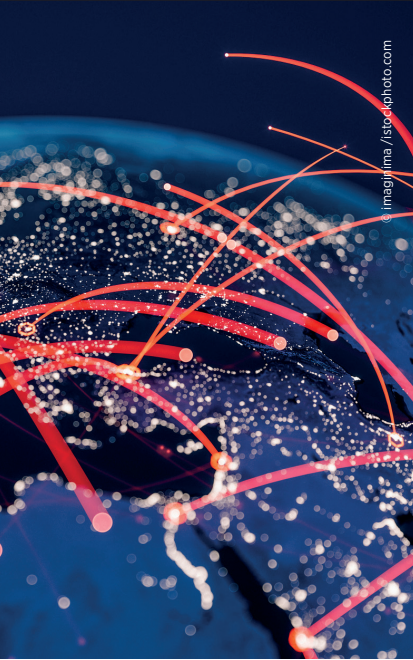


مصدر الخريطة: قاعدة بيانات ناتشورال إيرث، 2021

ملاحظة: تعتمد بيانات الشكل أعلاه على المعلومات الواردة في الوثائق الحكومية المتوفرة وقت إعداد هذا التقرير. إخلاء مسؤولية: تم إدراج الخريطة للأغراض توضيحية فقط، والحدود الموضحة في الشكل لا تعني أي تأييد أو قبول من قبل الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (أيرينا).

الفصل الثالث

إعادة رسم الخارطة الجيوسياسية



يمكن للهيدروجين تغيير ميزان القوى العالمي وإحداث تحولات في مراكز الدول والمناطق على خارطة النظام الدولي. ويحدد هذا الفصل الدول التي ستكون سباقاً في تبني السياسات، ومصدري الهيدروجين المستقبليين، وقادة التكنولوجيا الناشئين. كما يناقش مكانة الدول المنتجة للوقود الأحفوري، والتي يمكنها استخدام الهيدروجين للتحوط ضد بعض المخاطر التي تفرضها عملية انتقال الطاقة بينما يتجه العالم نحو بناء اقتصادات الحياد الصفري. كما يشرح هذا الفصل قدرة الهيدروجين على تحويل الصناعات عالية الاستهلاك للطاقة إلى مجالات قائمة على الطاقة المتجددة، والتي يمكن أن تصبح مراكز الأخضر. يمكن للهيدروجين تغيير ميزان القوى العالمي وإحداث تحولات في مراكز الدول والمناطق على خارطة النظام الدولي. ويحدد هذا الفصل الدول التي ستكون سباقاً في تبني السياسات، ومصدري الهيدروجين المستقبليين، وقادة التكنولوجيا الناشئين. كما يناقش مكانة الدول المنتجة للوقود الأحفوري، والتي يمكنها استخدام الهيدروجين للتحوط ضد بعض المخاطر التي تفرضها عملية انتقال الطاقة بينما يتجه العالم نحو بناء اقتصادات الحياد الصفري. كما يشرح هذا الفصل قدرة الهيدروجين على تحويل الصناعات عالية الاستهلاك للطاقة إلى مجالات قائمة على الطاقة المتجددة، والتي يمكن أن تصبح مراكز للتصنيع الأخضر.

وفي عام 2017، تفردت دولة واحدة فقط، وهي اليابان، بامتلاك استراتيجية وطنية للهيدروجين. أما اليوم، فقد قامت أكثر من 30 دولة بتطوير أو إعداد استراتيجيات للهيدروجين (الشكل 3.1)، وهو ما يعكس الاهتمام المتزايد بتطوير سلاسل قيمة الهيدروجين النظف.

الشكل 3.1 استراتيجيات الهيدروجين القائمة وقيد الإعداد، أكتوبر 2021



المصدر: بولومبرغ (2021 ب) ومجلس الطاقة العالمي (2021). مصدر الخريطة: ناتشارل إيرث، 2021. إخلاء مسؤولية: هذه الخريطة متاحة للأغراض توضيحية فقط. والحدود الموضحة في الشكل لا تعني أي تأييد أو قبول من الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (آيرينا)

هناك تباين كبير في نطاق وتفاصيل هذه الاستراتيجيات، ويصف الإطار 3.1 رؤية وتركيز بلدان ومناطق مختارة يمكن أن تكون من الأسواق الرائدة السبابة في مجال الهيدروجين بسبب حجمها و/ أو خطتها الطموحة في هذا المجال. وتمتلك هذه الأسواق الكبيرة المؤهلات اللازمة لوضع معايير وقواعد اللعبة إذا تم تفعيل خطتها واستراتيجياتها.

الإطار 3.1 السباقون؟ الرؤى الخاصة للبلدان والمناطق السبابة في تبني الهيدروجين

الصين: تعد الصين أكبر مستخدم ومنتج للهيدروجين في العالم، حيث تستهلك ما يزيد عن 24 مليون طن سنوياً. وغالباً ما تعتمد الصين في إنتاجها على الفحم، حيث يستحوذ على 3 - 5% من استهلاك الفحم فيها.¹⁴ ومنذ عام 2019، كان لدى الصين أكثر من 30 مشروعاً للهيدروجين الأخضر قيد الإعداد. كما ركزت أول خارطة طريق لإنتاج الهيدروجين، والتي صدرت في 2016، على استخدام الهيدروجين في النقل (اللجنة الاستشارية الاستراتيجية لخارطة طريق التكنولوجيا والجمعية الصينية لمهندسي السيارات)²⁰¹⁶، "SAE-China". وتمتلك الصين أكبر أسطول من السيارات الكهربائية العاملة بخلايا الوقود (FCEV) في العالم (بعد كوريا الجنوبية والولايات المتحدة)، حيث يبلغ عددها نحو 8 400 سيارة، كما أنها السبابة عالمياً في نشر الشاحنات والحافلات العاملة بخلايا الوقود (وكالة الطاقة الدولية، 2021ت). وفي خطتها الخمسية الحالية (2021-2025)، يشكل الهيدروجين أحد أهم ست صناعات مستقبلية في الصين (مؤشر تقييم الأمن السيبراني، 2021). وقد أطلقت 16 مقاطعة ومدينة في الصين خطاً خمسية تغطي الهيدروجين، رغم أن الدولة لا تمتلك استراتيجية وطنية للهيدروجين حتى الآن.

الاتحاد الأوروبي: أصدر الاتحاد الأوروبي استراتيجيته الخاصة بالهيدروجين في يوليو 2020. والتي تضع الهيدروجين في قائمة الأولويات الرئيسية التي تساهم في تحقيق الصفقة الخضراء الأوروبية. وتركز هذه الاستراتيجية على طاقة الهيدروجين المتجدد، وتشمل تركيب أجهزة تحليل كهربائي لإنتاج 40 جيجاواط من الهيدروجين المتجدد في الاتحاد الأوروبي بحلول عام 2030 (المفوضية الأوروبية، 2020). ويطمح الاتحاد الأوروبي إلى أن يصبح الرائد الصناعي في مجال الهيدروجين النظيف، وتحقيقاً لهذه الغاية، أطلق الاتحاد "التحالف الأوروبي للهيدروجين النظيف". وتتطلع بعض دول الاتحاد الأوروبي إلى أن تغدو من كبار المستوردين للهيدروجين، بينما يتطلع بعضها الآخر إلى أن يصبحوا مصدرين أو مراكز عبور للهيدروجين.

الهند: أطلقت الهند "مهمة الهيدروجين الوطنية" في أغسطس 2021، حيث تطمح إلى أن تغدو "مركزاً عالمياً لإنتاج وتصدير الهيدروجين الأخضر". ويؤمن رئيس الوزراء الهندي ناريندرا مودي بالدور الحيوي للهيدروجين الأخضر كدافع رئيسي نحو بلوغ استقلال الطاقة في الدولة بحلول عام 2047 (ريتشارج نيوز، 2021). كما تدرس الحكومة الهندية خطة إلزام المصافي ومصانع الأسمدة باستخدام كميات من الهيدروجين الأخضر. وتعد الهند أكبر مستورد للأومونيا في العالم، والتي تعتبر من المواد الرئيسية المستخدمة في إنتاج الأسمدة، حيث بلغت قيمة وارداتها في عام 2019 ما يصل إلى 1.27 مليار دولار أمريكي (قاعدة بيانات الأمم المتحدة للحصائية لتجارة السلع الأساسية، 2021).

14 تم حساب النسبة 3% كالتالي: تنتج الصين 24 مليون طن من الهيدروجين، 62% منها من الفحم، وتستخدم حوالي 8 كيلوجرامات من الفحم لإنتاج 1 كيلوجرام من الهيدروجين. وبالتالي يبلغ إجمالي الفحم المستخدم لإنتاج الهيدروجين 119.04 مليون طن، أي ما يمثل 3% من إجمالي استهلاك الفحم (3.8 مليار طن) في عام 2019. أما النسبة 5% فهي بحسب براسينجتون (2019).



اليابان: كانت اليابان أول دولة تتبنى استراتيجية وطنية للهيدروجين في عام 2017. وتهدف إلى أن تصبح أول "مجتمع للهيدروجين" في العالم، وذلك من خلال استخدام الهيدروجين على نطاق واسع في جميع قطاعاتها الاقتصادية (وزارة الاقتصاد والتجارة والصناعة، 2017). واتبعت الدولة خطة مدعومة باستثمارات حكومية كبيرة في تقنيات الهيدروجين وبنية التحتية. ففي عام 2020، تم استثمار حوالي 670 مليون دولار أمريكي في الهيدروجين وخلايا الوقود (وزارة البيئة اليابانية، 2020)، وتمثلت أهداف التنقل في نشر ما يقارب 800 ألف سيارة كهربائية تعمل بخلايا الوقود و900 محطة للتزود بوقود الهيدروجين بحلول عام 2030 (مركز الدراسات الاستراتيجية والدولية، 2021). كما تعمل على إبرام اتفاقيات توريد طويلة الأجل للهيدروجين، مشابهة للاتفاقية التي قادت تجارة الغاز الطبيعي المسال (وزارة الاقتصاد والتجارة والصناعة، 2017).

جمهورية كوريا: حددت جمهورية كوريا في خارطة طريق الهيدروجين الخاصة بها لعام 2019 الهيدروجين كمحرك للنمو الاقتصادي وخلق فرص العمل. وتسعى الدولة إلى أن تصبح رائدة عالمياً في إنتاج ونشر السيارات الكهربائية العاملة بخلايا الوقود واعتماد خلايا الوقود الثابتة واسعة النطاق لتوليد الطاقة (مركز الدراسات الاستراتيجية والدولية، 2021). وبحلول عام 2020، تم نشر ما يقارب 10 آلاف سيارة كهربائية عاملة بخلايا الوقود في الدولة، متفوقة بذلك على أي بلد آخر (E4Tech، 2021). وتهدف الحكومة الكورية إلى زيادة هذا العدد إلى 200 ألف سيارة بحلول عام 2025 كجزء من الصفقة الخضراء الجديدة (وزارة الاقتصاد والمالية، 2020). كما تخطط لاستخدام الهيدروجين لتغذية 10% من مناهل ومقاطعاتها وبلدياتها بالطاقة بحلول عام 2030، و30% بحلول عام 2040 (كوريا هيرالد، 2019). وتتوقع الحكومة أن يصبح الهيدروجين أكبر ناقل منفرد للطاقة في البلاد في عام 2050، أي ما يمثل ثلث إجمالي استهلاك الطاقة (ريتشارج نيوز، 2021ب)، كما تبحث في استيراد الهيدروجين مع مختلف البلدان الموردة له، بما في ذلك أستراليا والمملكة العربية السعودية.

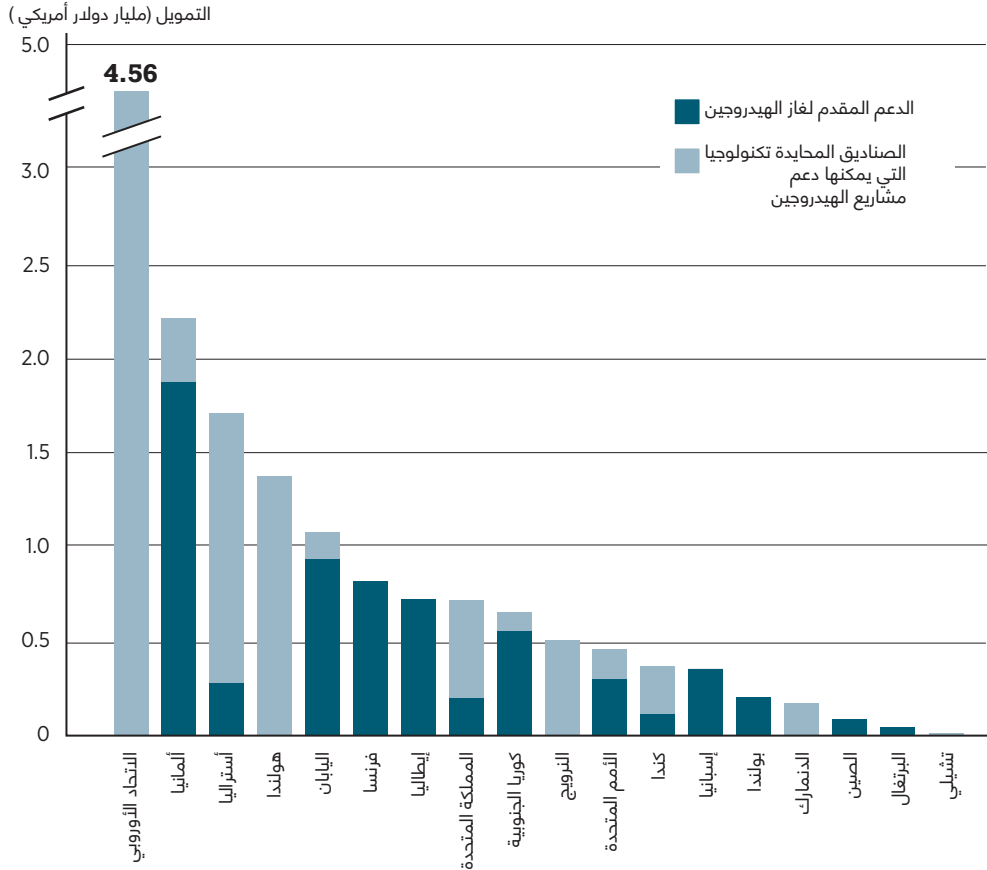
الولايات المتحدة الأمريكية: تحتل الولايات المتحدة المرتبة الثانية في استهلاك وإنتاج الهيدروجين في العالم، حيث تمثل 13% من الطلب العالمي. وشكلت الدولة حتى عام 2020 أكبر سوق للسيارات الكهربائية العاملة بخلايا الوقود في العالم، بقيادة ولاية كاليفورنيا التي دعمت قطاع الهيدروجين لما يقارب العقد من خلال برنامج الحسومات على السيارات النظيفة. وفي نوفمبر 2021، وقعت الولايات المتحدة على قانون الاستثمار والوظائف في البنية التحتية. وخصصت 9.5 مليار دولار أمريكي لتسريع وتيرة تطوير تكنولوجيا الهيدروجين النظيف. كما أطلقت الولايات المتحدة مبادرة "إيرث شوت هيدروجين" لحفز تطوير مشاريع الهيدروجين النظيف. وتتطلع الولايات المتحدة إلى تحقيق "هدف 111": أي تخفيض تكلفة الهيدروجين النظيف إلى دولار واحد لكل 1 كيلوجرام خلال عقد واحد.



أشعلت جائحة "كوفيد-19" السباق على الريادة في مجال الهيدروجين النظيف، حيث تدرك العديد من الدول أهمية الهيدروجين لمواجهة تحديي التغير المناخي واستعادة النشاط الاقتصادي بعد الجائحة. وتم تخصيص جزء كبير من أموال التحفيز الاقتصادي في بلدان عديدة لمشاريع الهيدروجين، مما أفضى إلى إدخال الهيدروجين إلى عالم المنافسة الجيواقتصادية.

وبحلول مطلع شهر أغسطس 2021، كانت الحكومات قد خصصت ما لا يقل عن 65 مليار دولار أمريكي لدعم قطاع الهيدروجين النظيف خلال العقد المقبل، واستحوذت فرنسا وألمانيا واليابان على حصة الأسد من هذه الالتزامات (الشكل 3.2). ورغم أن هذه المبالغ تعتبر كبيرة لكنها لا تقارن بحجم الدعم المقدم إلى قطاع الطاقة، البالغ 634 مليار دولار أمريكي في عام 2017، والذي تم تخصيص 70% منه لدعم الوقود الأحفوري (آيرينا 2020).

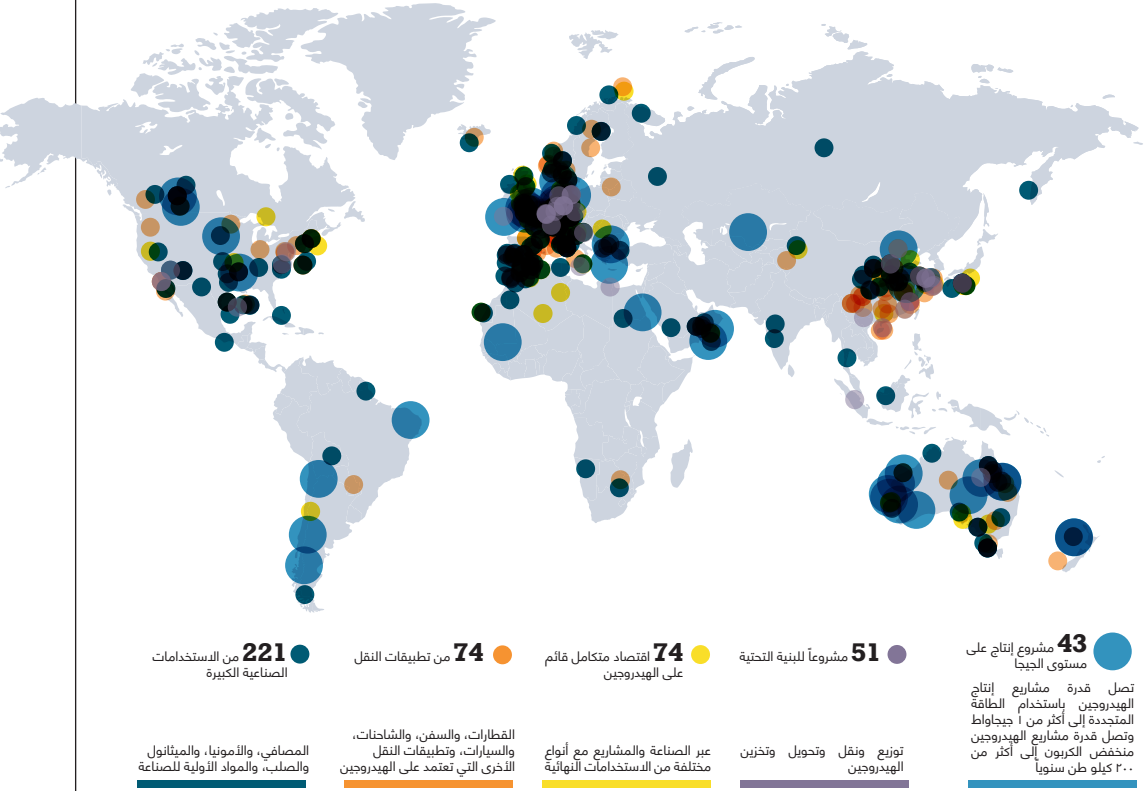
الشكل 3.2 متوسط التمويل السنوي المحتمل لمشاريع الهيدروجين، 2021 - 2030



ملاحظة: يقدم الشكل لمحة عن الدعم المتقدم للهيدروجين في مناطق مختارة اعتباراً من 5 أغسطس 2021. ولكن لا يظهر آليات الدعم التي سيتم الإعلان عنها أو تجري مناقشتها، مثل آلية الائتمان الضريبي لإنتاج الهيدروجين التي طرحتها الولايات المتحدة (الكونجرس الأمريكي، 2021).

وفي ضوء هذه الخطط وبرامج الدعم الوطنية، بدأت الاستثمارات في الهيدروجين النظيف في السنوات الأخيرة (الشكل 3.3). وفي شهر نوفمبر 2021، أضافت الإعلانات العالمية عن مشاريع الهيدروجين بحلول عام 2030 ما يصل إلى 160 مليار دولار أمريكي إلى حجم الاستثمار في هذا المجال، مع مخططات لاستخدام حوالي نصف هذه الاستثمارات لإنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام مصادر الطاقة المتجددة والتحليل الكهربائي (مجلس الهيدروجين، 2021).

الشكل 3.3 مشاريع واستثمارات الهيدروجين النظيف كما في شهر نوفمبر 2021



المصدر: مجلس الهيدروجين (2021). مصدر الخريطة: ناتشرال إيثر، 2021. ملاحظة: يصف الشكل المشاريع الكبيرة فقط، بما فيها المشاريع التي سيتم إنجازها بعد عام 2030. ولا يشمل أكثر من 1 000 مشروع صغير ومقترحات مشاريع. إخلاء مسؤولية: هذه الخريطة متاحة للأغراض التوضيحية فقط. والحدود الموضحة في الشكل لا تعني أي تأييد أو قبول من الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (إيرينا)

وصلت قدرة إنتاج مشاريع التحليل الكهربائي قيد الإعداد التي تم الإعلان عنها سابقاً إلى 260 جيجاواط عالمياً في أكتوبر 2021، وستوفر في حال تم تنفيذها 475 جيجاواط إضافية من طاقة الرياح والطاقة الشمسية الكهروضوئية بحلول عام 2030 (وكالة الطاقة الدولية 2021ث).¹⁵ وعلى الرغم من أن هذا يشكل زيادة تصل إلى 0.3 جيجاواط عن أجهزة التحليل الكهربائي التي تم تركيبها في عام 2020، إلا أنه ما زال بعيداً عن 160 جيجاواط التي ينبغي تركيبها وسطياً كل عام حتى 2050 لبلوغ هدف وقف ارتفاع درجات الحرارة عند 1.5 درجة مئوية (أيرينا، 2021).

وتتصدر أوروبا مكانة ريادية في هذا المضمار مع امتلاكها حوالي نصف المشاريع العالمية على مستوى الميجاواط التي تم الإعلان عنها، مدفوعة إلى حد كبير بالزخم القوي لسياسات عزل الكربون الطموحة، والاستراتيجيات الوطنية والدعم الحكومي. وتليها آسيا (23% من المشاريع المعلنة)، وأمريكا الشمالية (13%). ومن المتوقع أن يتم إنتاج أكبر كميات من الهيدروجين النظيف في أوروبا وأوقيانوسيا، والتي تشكل مجتمعة أكثر من نصف قدرة الهيدروجين حتى عام 2030، ومعظم هذه القدرة من مصادر الطاقة المتجددة. كما تم الإعلان عن مشاريع على مستوى الجيجا، والتي تركز على صادرات الهيدروجين في أفريقيا، وأمريكا اللاتينية، ومنطقة الشرق الأوسط وأوقيانوسيا (الإطار 3.2).

15 بعض المشاريع التي تم احتسابها ضمن 260 جيجاواط ما زالت في مرحلة التصور فقط.

الإطار 3.2

مشاريع الهيدروجين في أفريقيا

جذبت أفريقيا بإمكاناتها الهائلة من مصادر الطاقة المتجددة، وخبرتها مع الجيل السابق من أجهزة التحليل الكهربائي منذ مطلع القرن العشرين، انتباه المستثمرين الدوليين الذين أعلنوا عن العديد من مشاريع الهيدروجين الأخضر فيها.

وشهدت **مصر وزمبابوي** بالفعل تركيب أجهزة تحليل كهربائي بقدرة تتجاوز 100 ميجاواط. وأعلنت مصر في ديسمبر 2021، عن مشروعها الجديد بقدرة 100 ميجاواط لإنتاج الأمونيا الخضراء.

وفي مايو 2021، وقعت حكومة **موريتانيا** مذكرة تفاهم مع شركة "سي دبليو بي غلوبال"، مطور الطاقة المتجددة، لتطوير مشروع لإنتاج الهيدروجين بقدرة 16 جيجاواط من التحليل الكهربائي، و45 جيجاواط من الطاقة المتجددة. ومن المتوقع أن تبلغ تكلفة المشروع الإجمالية 40 مليار دولار أمريكي (إنرجي فويس، 2021). كما قدمت موريتانيا حقوق تطوير حصري لشركة "شاريوت" (شركة نفط وغاز نشطة في البرازيل، والمغرب، وناميبيا) لتطوير مشروع بقدرة تصل إلى 10 جيجاواط لإنتاج الهيدروجين الأخضر من طاقة الرياح البحرية والبرية، وقد يشكل هذا المشروع أول مزرعة رياح بحرية في أفريقيا (ريتشارج نيوز، 2021ت).

وأعلنت حكومة **ناميبيا**، في مؤتمر الأطراف في اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ (COP26)، عن اختيارها لشركة "هايفن هيدروجين إنرجي" كصاحبة أفضل عرض لمشروع للهيدروجين الأخضر. إذ ستوفر المرحلة الأولى من المشروع 2 جيجاواط من قدرة توليد الكهرباء المتجددة، بالإضافة إلى قدرة التحليل الكهربائي لإنتاج الهيدروجين الأخضر من أجل تحويله إلى أمونيا. كما ستزيد مراحل التوسيع الإضافية للمشروع في نهاية عقد 2020 إجمالي قيمته الاستثمارية إلى 9.4 مليار دولار أمريكي، والتي تتماشى مع الناتج الإجمالي المحلي الحالي لناميبيا. وبمجرد اكتمال المشروع، ستصبح قدرة توليد الكهرباء المتجددة 5 جيجاواط وقدرة التحليل الكهربائي لإنتاج الهيدروجين الأخضر 3 جيجاواط، بالإضافة إلى فائض من الكهرباء سيفي الشبكة في ناميبيا وربما شبكة الطاقة الإقليمية. وسيستخدم المشروع المياه المحلاة، التي سيتم توفير جزء منها للمجتمعات في مدينة لودريتز المجاورة (إنجينيرغ نيوز، 2021).

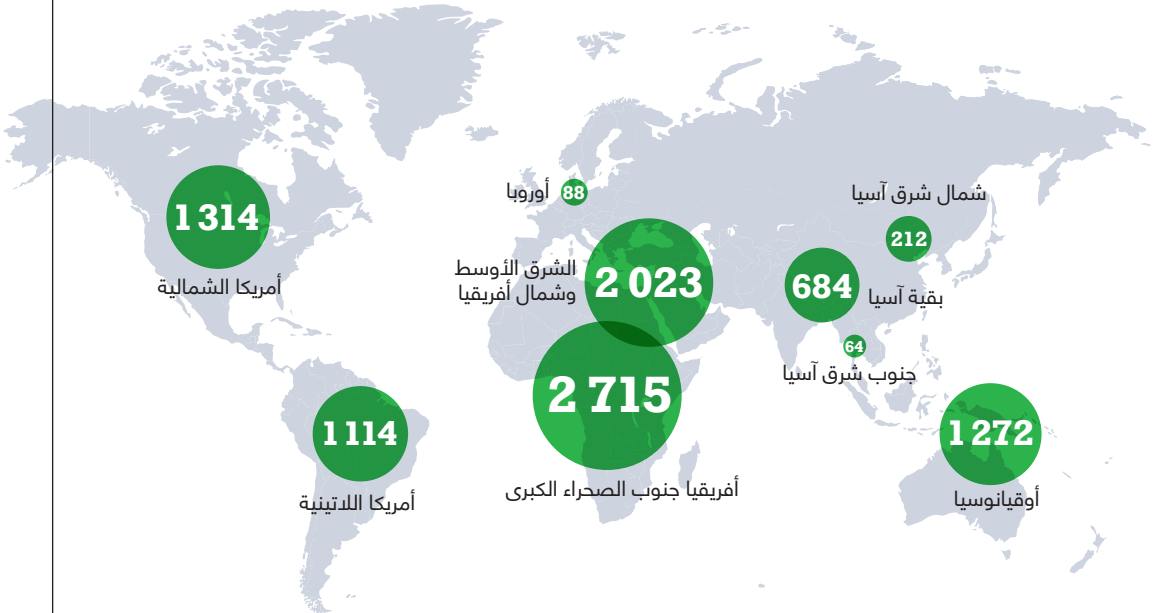


3.2 فئة جديدة من مصدري الطاقة

يمكن للبلدان والمناطق التي تتمتع بوفرة مصادر الطاقة المتجددة وانخفاض تكلفة الكهرباء استخدام مواردها لتغذو منتجة رئيسية للهيدروجين الأخضر. وتتفاوت قدرة المناطق المختلفة على إنتاج كميات كبيرة من الهيدروجين الأخضر منخفض التكلفة بشكل كبير. حيث تعد أفريقيا والأمريكيتين والشرق الأوسط وأوقيانوسيا من المناطق التي تتمتع بإمكانات تقنية عالية لإنتاج الهيدروجين؛ في حين تمتلك أوروبا وشمال شرق آسيا وجنوب شرق آسيا موارد أقل لإنتاج الهيدروجين الأخضر (الشكل 3.4). ولا تعد الإمكانيات التقنية المتجددة التي تملكها البلدان العامل الوحيد الذي يجعل منها منتجاً رئيسياً للهيدروجين الأخضر، حيث تلعب العديد من العوامل الأخرى دوراً في ذلك أيضاً، بما فيها البنية التحتية القائمة؛ و"العوامل غير المادية" (مثل الدعم الحكومي، وتوافر بيئة مواتية للشعاع، والاستقرار السياسي)؛ ومزيج الطاقة وصناعتها القائم (مثل خطط الطاقة المتجددة، والطلب المحتمل على الهيدروجين).



الشكل 3.4 الإمكانيات التقنية لإنتاج الهيدروجين الأخضر بأقل من 1.5 دولار أمريكي لكل كيلوجرام بحلول 2050، حسب مقياس إكساجول.



المصدر: آيرينا (يصدر قريباً)، مصدر الخريطة: ناتشرال إيرث، 2021. ملاحظة: توقعات النفقات الرأسمالية بحلول 2050 هي كالتالي: الطاقة الكهروضوئية: 225 - 455 دولار أمريكي/ كيلواط؛ طاقة الرياح البرية: 700 - 1070 دولار أمريكي/ كيلواط؛ طاقة الرياح البحرية: 1275 - 1745 دولار أمريكي/ كيلواط. ومتوسط التكلفة المرجحة لرأس المال: لقيم عام 2020 من دون المخاطر التكنولوجية في جميع المناطق. تم احتساب الإمكانيات التقنية بالاستناد إلى الأراضي المتاحة مع الأخذ بعين الاعتبار العديد من المناطق المستبعدة (المناطق المحمية، والغابات، والأراضي الرطبة الدائمة، والأراضي الزراعية، والمناطق الحضرية، والمنحدرات بنسبة 5% [طاقة كهروضوئية] و20% [طاقة الرياح البرية]، والكثافة السكانية). لا يتناول التحليل كميات المياه المتوفرة.

إخلاء مسؤولية: هذه الخريطة متاحة لأغراض توضيحية فقط، والحدود الموضحة في الشكل لا تعني أي تأييد أو قبول من الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (آيرينا)

وتعتبر مقارنة إمكانات الإنتاج المحلي مع حجم الطلب المتوقع على الهيدروجين بحلول عام 2050 وتكلفة الاستيراد، إحدى الطرق التي تتيح إمكانية التنبؤ بالمصدرين والمستوردين المستقبليين للهيدروجين الأخضر.¹⁶ وعليه، يمكن تقسيم دول العالم إلى 3 مجموعات، تضم الأولى البلدان المنتجة للهيدروجين الأخضر منخفض التكلفة، والتي يمكن أن تغدو دولاً مصدرة يمكنها الاستفادة من تحسن أسواق الطاقة المتجددة لديها من أجل استقطاب استثمارات الهيدروجين الأخضر، وتصنف كل من أستراليا وتشيلي والمغرب بين هذه الدول الأكثر ترجيحاً لتصدير الهيدروجين. بينما تضم المجموعة الثانية الدول القادرة على تحقيق الاكتفاء الذاتي في مجال الهيدروجين الأخضر، والتي تتمتع بإمكانات إنتاجية تلبي احتياجاتها الخاصة دون اللجوء لخيار الاستيراد، وتضم هذه المجموعة كلاً من الصين والولايات المتحدة. أما المجموعة الثالثة، فهي الدول التي ستلجأ إلى الاستيراد لسد احتياجاتها المحلية، ومنها اليابان وجمهورية كوريا وأجزاء من أوروبا وأمريكا اللاتينية.

ولا شك أن هذا المشهد قد يتغير جذرياً في ضوء الاستثمارات الواسعة لتطوير الموجة الجديدة من أسواق الطاقة المتجددة والبنية التحتية لقطاع الهيدروجين، حيث تترافق الإمكانيات الوفيرة مع افتقار الوصول إلى التكنولوجيا والمعارف والكفاءات المحلية للأسف.

وتعتبر تكلفة رأس المال إحدى العناصر الرئيسية المجهولة (المعدل المرجح لتكلفة رأس المال)، والذي يختلف بدرجة كبيرة من بلد لآخر حالياً (الإطار 3.3).

16 تشمل المقاييس الأساسية في النموذج إمكانات الإنتاج المحلي وسعر الهيدروجين الأزرق والأخضر، بالإضافة إلى تكلفة استيرادهما (والتي تمثل بحد ذاتها تكلفة الإنتاج والتحويل (إعادة التحويل) والشحن) أيرينا (سيصدر قريباً - أ).

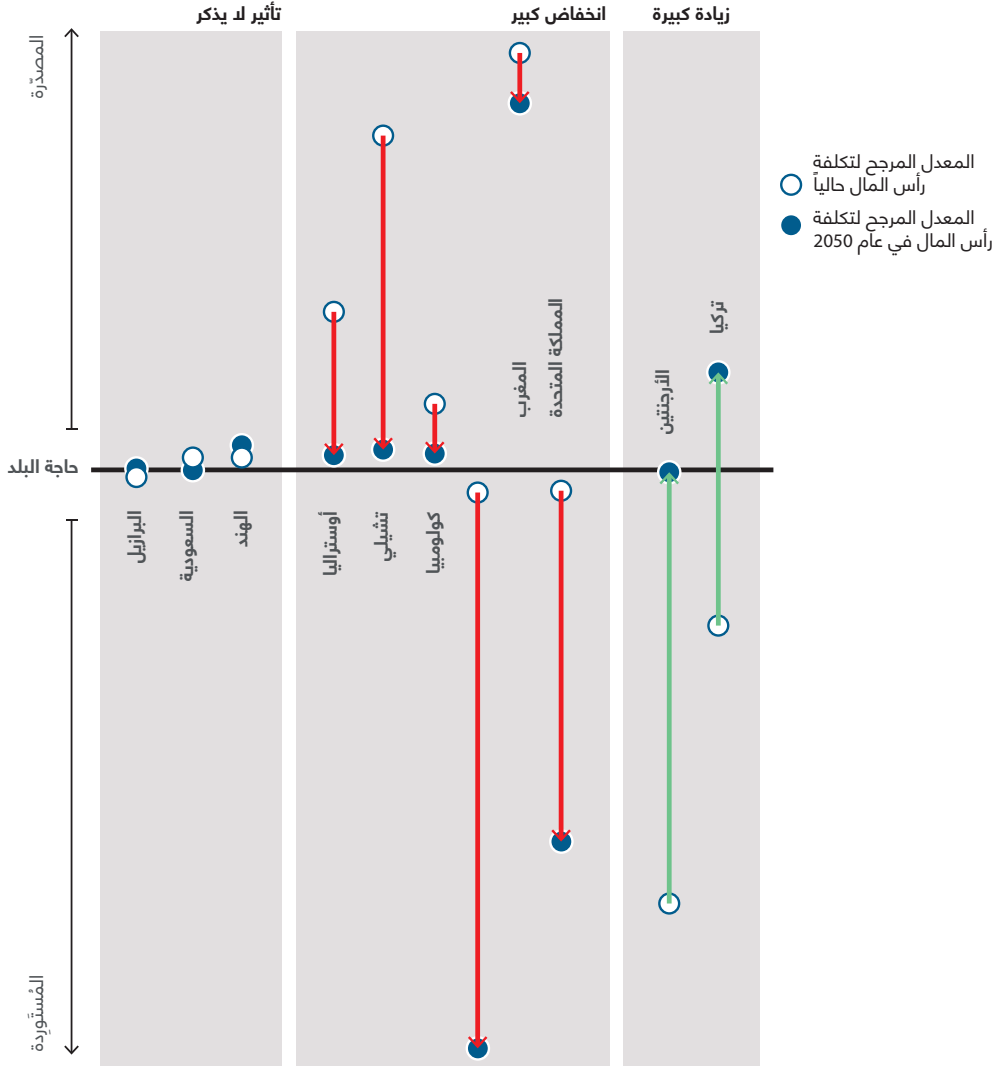
الإطار 3.3

أهمية فرضيات تكلفة رأس المال بالنسبة لتوقعات تجارة الهيدروجين

ستهيمن تكلفة رأس المال على تكاليف الطاقة في مستقبل قائم على مصادر الطاقة المتجددة. وكنهج احترازي، من الأفضل أن نفترض استمرار فروقات تكلفة رأس المال الملموسة حول العالم حتى عام 2050 (إيجلي، وستيفن، وشميدت، 2019). ولكن الصورة ستتغير كلياً (الشكل 3.5) فيما لو افترضنا تلاشي هذه الفروقات (بوغدانوف، 2019)، وسيتحول كل من أمريكا اللاتينية والشرق الأوسط وتركيا من بلدان مستوردة إلى مصدرة للهيدروجين الأخضر، بينما ستسير إسبانيا في الاتجاه المعاكس. وسيكون هناك تراجع حاد في الإمكانيات التصديرية لدول مثل أستراليا وتشيلي اللتين تعانيان أصلاً من انخفاض المعدل المرجح لتكلفة رأس المال، فيما سيشهد الاتحاد الأوروبي وألمانيا ارتفاعاً واضحاً في احتياجات الاستيراد.

WACC

الشكل 3.5 تأثير فرضيات التكلفة على إنتاج الهيدروجين في دول معينة



ملاحظة: يظهر الشكل معدلات الإنتاج والطلب على الهيدروجين الأخضر بحسب المنطقة أو البلد في عام 2050 وفق الفرضيات الإيجابية لتقنيات رأس المال في عام 2050: الطاقة الكهروضوئية: 225-455 دولار أمريكي/كيلوواط؛ طاقة الرياح البرية: 700-1070 دولار أمريكي/كيلوواط، وطاقة الرياح البحرية 1275-1745 دولار أمريكي/كيلوواط؛ وجهاز التحليل الكهربائي: 130 دولار أمريكي/كيلوواط دولار. ويعتمد إنتاج الهيدروجين الأخضر على تقييم توافر الأرض المناسبة لتوليد الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح. ويتوافق الطلب مع سيناريو وقف ارتفاع درجة الحرارة عند 1,5 درجة مئوية. وتستخدم معدلات الطلب والإنتاج دالة لوجاريتمية لوضع ترتيبات الحجم المختلفة على مقياس متشابه. وهذا ما يجعل المحور عديم الأبعاد: يمكن تفسيره كمؤشر وليس كتدفقات للطاقة. ويفترض "المعدل المرجح لتكلفة رأس المال في عام 2050" عالمياً تتساوى فيه جميع الأماكن مستقبلاً من حيث المخاطر. بينما يشير "المعدل المرجح لتكلفة رأس المال حالياً" إلى اختلاف المعدل المرجح لتكلفة رأس المال بين جميع المناطق كما هو الحال في الوقت الراهن.

يرى الخبراء أن أستراليا وتشيلي والمغرب والسعودية والولايات المتحدة هي الأكثر ترجيحاً لتصدير قائمة الدول المنتجة للهيدروجين النظيف بحلول عام 2050 (أنظر الشكل ب.3 في الملحق). وتعتبر بعض هذه الدول، خاصة أستراليا والسعودية والولايات المتحدة، مصدّرين حاليين للطاقة. ويمكن لهذه الدول أن تحافظ على مكانتها كمصدّر للطاقة رغم دخولها في سوق تنافسي أكثر مع إمكانية إنتاج الهيدروجين الأخضر في أي مكان تقريباً. أما الدول الأخرى، مثل تشيلي والمغرب وناميبيا، فهي تستورد اليوم كامل احتياجاتها من الطاقة.¹⁷ وبالنسبة لهذه البلدان، يعتبر إحداث نقلة نوعية بمجال الهيدروجين الأخضر تحولاً جذرياً بكل معنى الكلمة، حيث أن وفرة الإمكانات المتجددة تفتح آفاقاً جديدة. كما يتوقع أن يكون الحظ حليف البلدان التي تنجح في التحول إلى مصدّر رئيسي للهيدروجين الأخضر ومشتقات الوقود من حيث الأهمية الجيواستراتيجية. (الإطار 3.4).

17 تستورد تشيلي حالياً حوالي 65% من احتياجاتها من الطاقة، بينما تستورد المغرب 91% وناميبيا 74% (البنك الدولي، a-d.n).

الإطار 3.4

التحول من مستورد إلى مصدّر للطاقة؟

أنشطة الهيدروجين في بلدان مختارة مستوردة للوقود الأحفوري مع إمكانات تصدير الهيدروجين الأخضر

تشيلي: أطلقت تشيلي في عام 2020 استراتيجية للهيدروجين الأخضر تهدف للوصول إلى 5 جيجاواط من قدرة جهاز التحليل الكهربائي بحلول عام 2025، وإلى 25 جيجاواط بحلول عام 2030. كما تهدف إلى إنتاج الهيدروجين الأخضر على مستوى العالم في عام 2030، والتحول بحلول عام 2040 إلى واحدة من أكبر 3 مصدّرين لوقود الهيدروجين (حكومة تشيلي، 2020). ومن المتوقع أن تتمكن البلاد من تصدير ما يعادل 30 مليار دولار أمريكي من الهيدروجين الأخضر ومشتقاته بحلول عام 2030 (ماندر، 2020). ويستقطب الهيدروجين في الآونة الأخيرة اهتماماً متزايداً في أمريكا اللاتينية، ويعزى هذا بشكل رئيسي إلى الإمكانات العالية التي تتمتع بها المنطقة بمجال الطاقة المتجددة. كما أن العديد من بلدان المنطقة قامت بنشر أو تحضّر حالياً استراتيجيات وخرائط طريق وطنية بخصوص الهيدروجين (الشكل 3.1).

المغرب: أنشأت المغرب لجنة وطنية للهيدروجين في عام 2019، ونشرت خارطة طريق للهيدروجين الأخضر في يناير 2021. ويعتبر الهيدروجين قطاع نمو جوهري في الاقتصاد الوطني. وتطمح البلاد بحلول عام 2030 إلى بناء سوق هيدروجين محلي ينتج 4 تيراواط/الساعة، وسوق تصدير بقدرة 10 تيراواط/الساعة؛ مما يتطلب توفير 6 جيجاواط من الطاقة المتجددة الجديدة ودعم توفير أكثر من 15 000 وظيفة مباشرة وغير مباشرة (وزارة الطاقة والمعادن والبيئة، 2021).



3.3 تأثير مسار الانتقال على الدول المنتجة للوقود الأحفوري

من المتوقع أن يؤثر انتقال قطاع الطاقة على الدول المنتجة للوقود الأحفوري بشكل كبير، فمن المرجح جداً أن تتوقف عمليات استخراج وتسييل جزء كبير من احتياطيات النفط والغاز والفحم. وكان هناك ما ينذر بهذه التأثيرات خلال جائحة كوفيد-19 في عام 2020، عندما أدى انخفاض الأسعار وانحياز الطلب إلى القضاء على حوالي ربع قيمة احتياطيات النفط والغاز (وكالة الطاقة الدولية، 2020). وعلى الرغم من أن منتجي الطاقة منخفضة التكلفة قد يشهدون زيادة في حصتهم السوقية مع تقدم مسيرة انتقال قطاع الطاقة، إلا أنهم سيشهدون في المقابل انخفاضاً ملحوظاً في الإيرادات، لا سيما وأنه من المتوقع تقلص السوق عموماً (وكالة الطاقة الدولية، 2021 أ). وقد شهدت العديد من الدول المنتجة للنفط والغاز تراجعاً في تصنيفاتها الائتمانية السيادية مؤخراً. وقد عانت البلدان العشرون التي تتمتع بأعلى معدل من صافي صادرات الوقود الأحفوري إلى إجمالي الناتج المحلي (الشكل 3.6) من انخفاض صافي متوسط قدره 1.6 درجة في تصنيفاتها الائتمانية بين عامي 2015 و2020 (مؤسسة فيتش الدولية للتصنيف الائتماني، 2021). ومع تطور مراحل الحد من الانبعاثات الكربونية، سيتعين على الدول المنتجة أن توقف اعتماد اقتصادها على النفط والغاز.

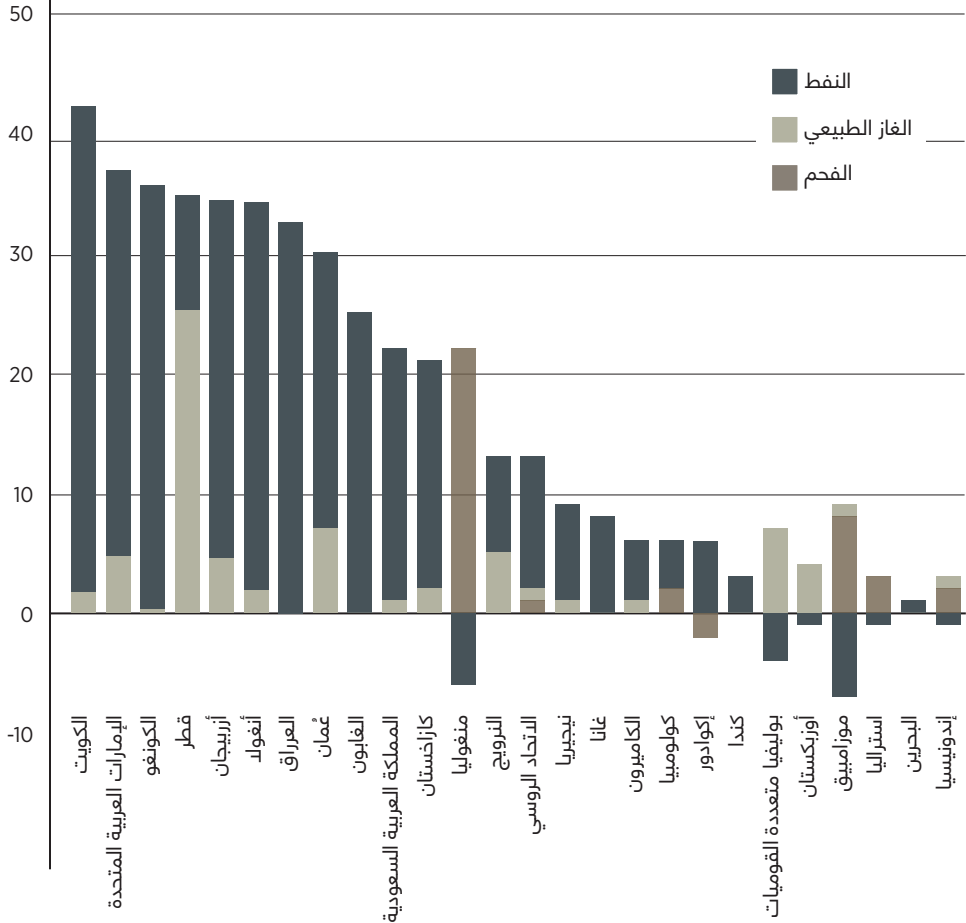


ناميبيا: استطاعت ناميبيا أن تلفت أنظار المستثمرين إلى مصادرها الوفيرة من طاقتي الشمس والرياح. وصنفت الحكومة كلًا من الهيدروجين الأخضر والأمونيا الخضراء بين فرص التصدير الناشئة (حكومة ناميبيا، 2021). كما شكلت الحكومة مجلساً خاصاً بالهيدروجين الأخضر وعينت له مستشاراً متخصصاً. وتبحث الحكومة أيضاً إمكانية إقامة مصنع لشفرات توربينات الرياح، ومصنع للفولاذ الأخضر، وخطاً لإنتاج سماء الأمونيا (واپدليك، 2021). وتعتبر هذه المشاريع المقترحة ضخمة بالمقارنة مع الاقتصاد الوطني لناميبيا، مما يشير إلى إمكانية إحداث الهيدروجين الأخضر نقلة نوعية في الاقتصاد الوطني (جينجوب، 2021).



الشكل 3.6 مخاطر الوصول العالقة بالنسبة لكبار مصدري الوقود الأحفوري الصافي، 2019

نسبة صافي إيرادات الصادرات من إجمالي الناتج المحلي (%)



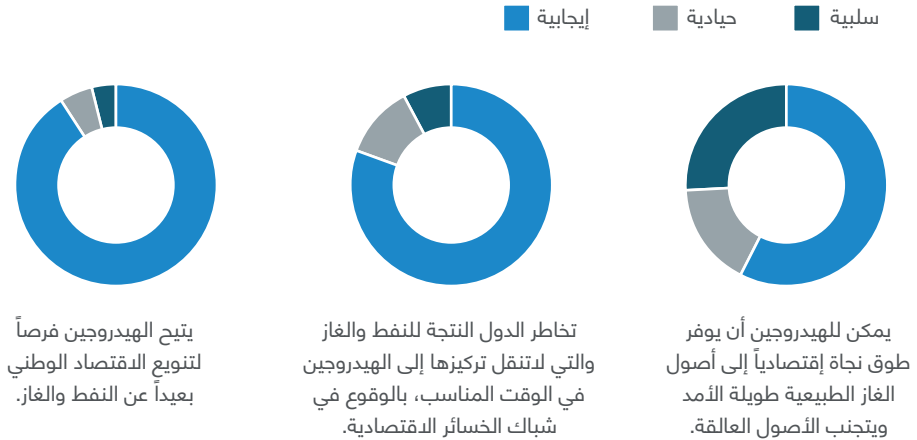
المصدر: قاعدة بيانات الأمم المتحدة الإحصائية لتجارة السلع الأساسية (2021) والبنك الدولي (n.d.-b). ملاحظة: وصل متوسط سعر برميل نفط برنت الخام (المعيار الدولي) إلى 64 دولار أمريكي للبرميل في عام 2019، بينما وصل متوسط سعره بين عامي 2010-2020 إلى 76.2 دولار للبرميل (إدارة معلومات الطاقة الأمريكية EIA، n.d.).

يوفر الهيدروجين النظيف مساراً انتقالياً جذاباً للدول المصدرة للنفط والغاز لتنويع اقتصادها فيما تحول أسواق التصدير الرئيسية إلى ناقلات الطاقة والوقود منخفض الكربون وخالي من الكربون (الشكل 3.7). وتعد الدول المصدرة للنفط والغاز مؤهلة بالشكل الأمثل للانتقال إلى الهيدروجين، لا سيما وأنها قادرة على الاستفادة من البنية التحتية القوية لقطاع تصدير الطاقة (الموانئ، وخطوط الأنابيب، ومرافق التخزين)؛ والقوة العاملة المتخصصة والمتمرسة بمجال إنتاج وتحويل وتداول النفط والغاز؛ وعلاقاتها الحالية بمجال تجارة الطاقة.

وقبيل انعقاد مؤتمر الأطراف في اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ (COP26)، تبنى العديد من المصدّرين نهج الحياد الصفري، مثل أستراليا وروسيا والمملكة السعودية ودولة الإمارات العربية المتحدة. ويعتبر الهيدروجين النظيف وسيلةً جوهرية لتحقيق هذه الأهداف. وقد تبنت بعض الدول المنتجة للوقود الأحفوري استراتيجيات الهيدروجين الوطنية (مثل أستراليا وكندا وكولومبيا والنرويج وروسيا والمملكة المتحدة) ومنها من يعمل على ذلك حالياً.

وغالباً ما تتطرق استراتيجيات مصدّري الوقود الأحفوري إلى الفرص التي يتيحها الهيدروجين لتطوير صناعات تصديرية جديدة (الإطار 3.5). ويتبنى العديد من هذه الاستراتيجيات نهج "الحياد التكنولوجي"، ويتضمن بشكل واضح احتمالية وجود الهيدروجين الأزرق (وهذا ينطبق على كل من أستراليا وكندا والنرويج على سبيل المثال). كما تقدم كل من أستراليا وكندا تفاصيل عن معدلات تقنية احتجاز الكربون المتوقعة والضرورية للهيدروجين الذي يتم إنتاجه من الوقود الأحفوري والذي يعتبر 'نظيفاً' والمحددة بواقع 90% أو أكثر (لونغدين وآخرون، 2022).

الشكل 3.7 آراء الخبراء حول استراتيجيات الهيدروجين وتأثيرها على منتجي الغاز والنفط



المصدر: آرينا، استطلاع الخبراء (أنظر الإطار 2.2)

الإطار 3.5

التمحور إلى الهيدروجين؟ استراتيجيات الهيدروجين لدى دول مختارة مصدرة للوقود الأحفوري

أستراليا: تتطلع أستراليا إلى لعب دور عالمي رئيسي في إنتاج الهيدروجين النظيف وتجارته بحلول عام 2030، حيث تعتبر الهيدروجين 'أهم صادراتها المستقبلية'. وبحلول عام 2030، تخطط أستراليا لتكون أحد أكبر 3 مصدري هيدروجين إلى الأسواق الآسيوية (الحكومة الأسترالية، 2019). وقد استثمرت أكثر من 1 مليار دولار أمريكي لإنعاش قطاع الهيدروجين المحلي، بما يتضمن المشاركة في رعاية 7 مراكز هيدروجين (الحكومة الأسترالية، 2021). ويوجد أيضاً 9 مشاريع للهيدروجين الأخضر بقدرة إنتاجية على مستوى الجيجاواط مخطط لها أو قيد التطوير، رغم أن الحكومة لا تستبعد فكرة إنتاج الهيدروجين الأزرق. كما أبرمت أستراليا صفقات مع أسواق التصدير المحتملة مثل ألمانيا واليابان وسنغافورة.

كندا: تحدد الاستراتيجية الكندية فرصاً تصديرية جديدة في قطاع الطاقة، وتؤكد أن البلاد مؤهلة بالشكل الأمثل لتصبح 'مصدراً عالمياً رائداً للوقود النظيف' (الحكومة الكندية، 2020). وتخطط كندا لتكون أحد أكبر 3 منتجي للهيدروجين النظيف بحلول عام 2050. وعلى الرغم من انفتاحها على العديد من مسارات الإنتاج، إلا أن استراتيجيتها تؤكد الحاجة الشديدة للانتقال في نهاية المطاف إلى المزيد من طرق الإنتاج المتجددة والخالية من الانبعاثات الكربونية، ولا سيما استغلال قدرة البلاد الكبيرة على توليد الطاقة الكهرومائية.

النرويج: تعد النرويج أحد أبرز مصدري الغاز إلى أوروبا، حيث تؤمن حوالي ربع احتياجات القارة من الغاز الذي ينقل معظمه عبر الأنابيب. وتدرس شركة الطاقة النرويجية "إكوينور" Equinor حالياً إمكانية إيصال الغاز الطبيعي إلى ألمانيا أو هولندا، حيث يمكن تحويله إلى هيدروجين أزرق، ومن ثم إرساله إلى مصنع للصلب في مدينة دويسبورج الألمانية، ليعاد شحن ثاني أكسيد الكربون من أجل تخزينه تحت قاع الجرف النرويجي في بحر الشمال ("إكوينور" و"أوبن غريد يوروب"، 2019).

سلطنة عمان: تعمل سلطنة عمان حالياً على تنفيذ استراتيجية تركز على إرساء مجتمع يعتمد على الهيدروجين بحلول عام 2040. وتخطط البلاد لتصبح مصدراً للهيدروجين الأخضر والأمونيا الخضراء على نطاق واسع. وقد أعلنت مؤخراً عن عدد من المشاريع بقدرة إنتاجية على مستوى الجيجاواط، جميعها يعتمد على طاقتي الشمس والرياح المتوفرين في محافظة الوسطى، ويشرف على ميناء الدقم للتصدير في بحر العرب. وسيتم تشغيل أكبر هذه المشاريع بقدرة 25 جيجاواط من الطاقة الشمسية والرياح (آرغوس، 2021).

روسيا: تسعى روسيا لئلا تصبح من أكبر مصدري الهيدروجين النظيف، خاصةً الهيدروجين الأزرق. وأشار رئيس الوزراء الروسي ميخائيل ميشوستين إلى أن "طاقة الهيدروجين ستقلل من مخاطر فقدان أسواق الطاقة" (الحكومة الروسية، 2021). وتسعى روسيا إلى الاستئثار بنسبة 20% من سوق الهيدروجين العالمي في عام 2030، والتي تعتبر أكبر من حصتها الحالية في سوق الغاز الطبيعي (وكالة الأنباء الروسية "ريا نوفوستي"، 2021). وتتوقع روسيا تصدير ما يصل إلى 50 مليون طن من الهيدروجين بحلول منتصف القرن الحالي، مما يضيف حوالي 23 - 100 مليار دولار إلى ميزانيتها السنوية (باتونيا، 2021).



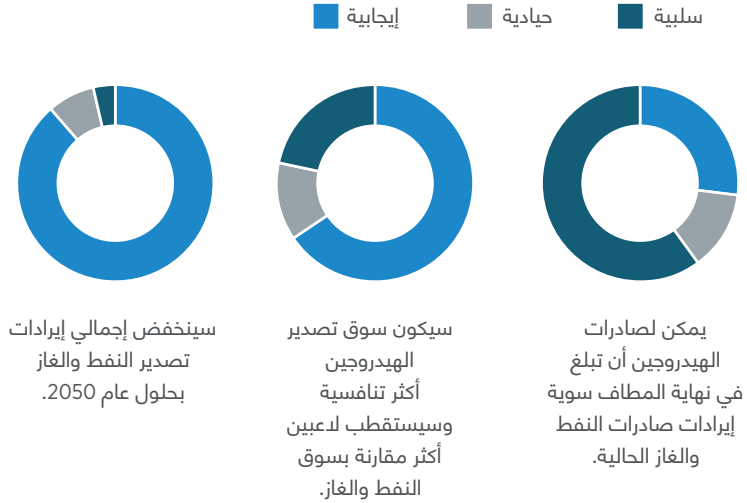
المملكة السعودية العربية: أعلنت المملكة العربية السعودية عن مشروع "هيلوس للوقود الأخضر" في يوليو 2020. وهو عبارة عن مصنع ضخم للهيدروجين الأخضر والأمونيا الخضراء بقيمة 5 مليارات دولار سيتم تشغيله بالكامل بالاعتماد على طاقتي الشمس والرياح. ومن المقرر أن تنطلق أعمال المصنع عام 2025 في مدينة نيوم الضخمة على ساحل البحر الأحمر بالقرب من حدود المملكة مع مصر والأردن (هيلوس، n.d.). واستحوذت "أرامكو السعودية"، شركة النفط الوطنية، على 70% من أسهم الشركة السعودية للصناعات الأساسية (سابك)، ثالث أكبر مصدر عالمي للأمونيا (أرامكو، 2020). وقد صدرت "أرامكو السعودية" أول شحنة من الأمونيا الزرقاء إلى اليابان في سبتمبر 2020 لاستخدامها في توليد الطاقة الكهربائية (أرامكو، 2020). وأشار وزير الطاقة السعودي، الأمير عبد العزيز بن سلمان، في بيان صحفي أواخر عام 2020 إلى أن بلاده "لن تواجه أي تحدٍ في ترسيخ مكانتها كأكبر مصدر للهيدروجين على سطح الكوكب" (راتكليف والورداني ومارتن، 2020).

الإمارات العربية المتحدة: تهدف خارطة طريق الهيدروجين التي أطلقتها دولة الإمارات في نوفمبر 2021 إلى ترسيخ مكانة البلاد الرائدة في مجال تصدير الهيدروجين الأزرق والأخضر. وتسعى البلاد إلى الاستئثار بحصة قدرها 25% من السوق العالمي للهيدروجين منخفض الكربون بحلول عام 2030. ويوجد حالياً أكثر من 7 مشاريع قيد العمل تحت إشراف أصحاب المصلحة الرئيسيين، ومن ضمنهم "تحالف أبوظبي للهيدروجين" الذي يضم كلاً من شركة بترول أبوظبي الوطنية (أدنوك)، وشركة مبادلة للاستثمار (مبادلة)، وشركة "القابضة" (ADQ). كما وقعت "أدنوك" اتفاقيات شراكة مع دول مثل اليابان (أدنوك، 2021)، وماليزيا (أدنوك، 2021)، وجمهورية كوريا (أدنوك، 2021) لاستكشاف خيارات تجارة الهيدروجين، وباعت حتى الآن 4 شحنات تجريبية من الأمونيا الزرقاء (وكالة أنباء الإمارات، 2021).



قد تميل البلدان التي تتمتع باحتياطيات غاز منخفض التكلفة إلى إنتاج الهيدروجين الأزرق. ويمكن للعديد من مصدري النفط والغاز - بما في ذلك أستراليا وبعض البلدان التي تشتهر بمصادرها الوفيرة من طاقتي الشمس والرياح في شمال أفريقيا ومنطقة الخليج الفارسي - أن تتحول إلى دول تنافسية منتجة للهيدروجين الأخضر. ومن المتوقع أن ينخفض إجمالي إيرادات تصدير النفط والغاز بشكل كبير بحلول عام 2050. ورغم احتمالية نمو تجارة الهيدروجين العابرة للحدود بشكل مذهل، يشك الخبراء بقدرة الهيدروجين على بلوغ مستوى صادرات النفط والغاز حالياً (الشكل 3.8). وبالتالي، لا يمكن اعتبار الهيدروجين نسخة جديدة من النفط خالي الكربون. وبخلاف النفط والغاز، فإن الهيدروجين عبارة عن عملية تحويل وليس استخراج، مما سيحد على الأرجح من احتمالات تحقيق الربح الاقتصادي (كلية لندن الجامعية، n.d.). وسيكون قطاع الهيدروجين أكثر تنافسية ويستقطب المزيد من اللاعبين مقارنة بقطاع النفط والغاز. كما ستستقطب أسواق الهيدروجين شريحة جديدة ومتنوعة من المشاركين مع تراجع تكاليف الهيدروجين الأخضر.

الشكل 3.8 آراء الخبراء حول إيرادات الهيدروجين المستقبلية وهيكلية السوق



المصدر: آيرينا، استطلاع الخبراء (أنظر الشكل 2.2).

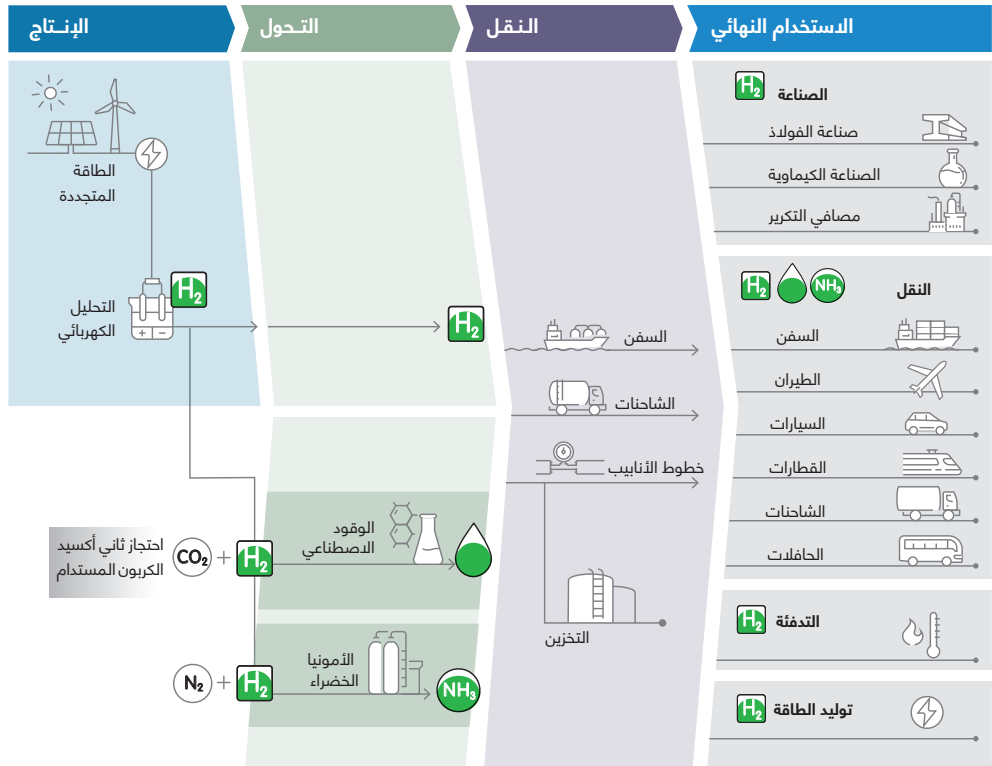


3.4 ظهور قادة جدد في عالم التكنولوجيا

خلال السنوات القليلة الماضية حققت الحلول الخالية من الكربون نمواً أسرع من المتوقع ، مما أتاح الفرصة لوجود مصادر جديدة لخلق الثروات وتدميرها (سيستمك، 2020). إن امتلاك حصة في سلاسل القيمة لتقنيات الطاقة الآمنة للمناخ، مثل الهيدروجين النظيف، أن يعزز القدرة الاقتصادية التنافسية للبلد والأمن القومي واستقلال الطاقة.

كما يمكن لعملية تطوير الريادة التكنولوجية أن تتمحور حول العديد من جوانب سلسلة قيمة الهيدروجين. ومن بين البلدان التي تطمح لتصدير الهيدروجين أو مشتقاته، ثمة تباين كبير من حيث ملكية التكنولوجيا، مما قد يحد من قدرة هذه البلدان على التأثير على معايير الإنتاج وأطر التشغيل. فعلى سبيل المثال، طوّرت كل من أستراليا وكندا والمملكة العربية السعودية مئات الاختراعات بين عامي 2010 و2020 (آيرينا، منصة "إنسباير" الإلكترونية، 2021). بينما شهدت كولومبيا ومصر والمغرب وسلطنة عُمان ودولة الإمارات العربية المتحدة نشاطاً أقل بكثير في هذا الشأن (مع تقديم كل من هذه الدول خلال هذه الفترة 3 براءات اختراع أو أقل تتعلق بالهيدروجين). ويمكن لهذه الدول أن تلعب دوراً ريادياً في كل أجزاء سلسلة القيمة بطرق متعددة (أنظر الشكل ب.8 في الملحق). يركز هذا القسم على الابتكار والتصنيع.

الشكل 3.9 فرص الريادة التكنولوجية في سلاسل قيمة الهيدروجين الأخضر



المصدر: آيرينا، (2020 ب).

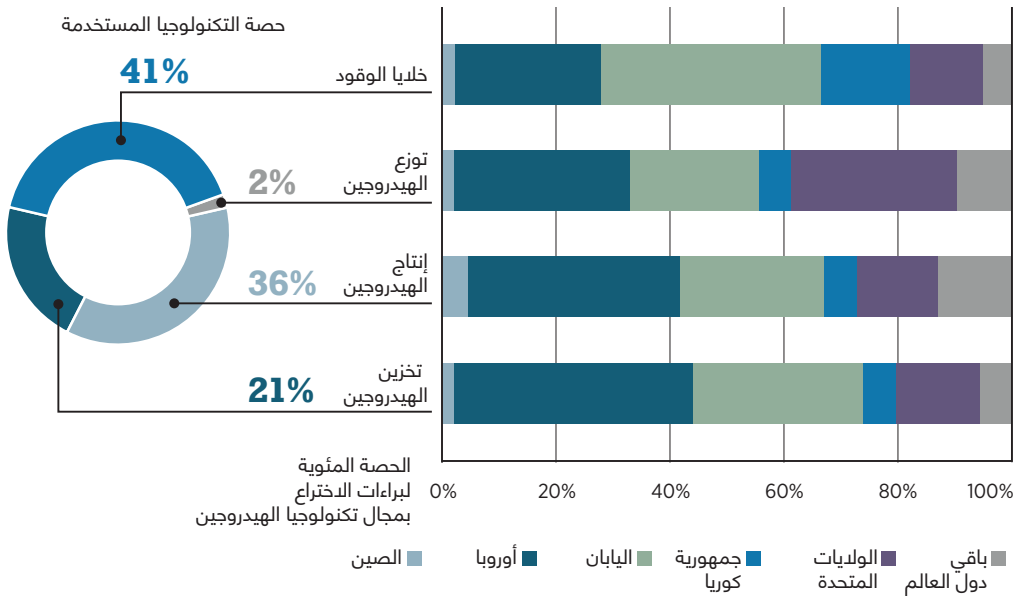
قادة الابتكار

لا يزال مشهد شركات وتقنيات الهيدروجين في حالة تخبط مستمر؛ حيث أدى تجديد تركيز السياسات إلى حفز الابتكار في مختلف مراحل سلسلة قيمة الهيدروجين. ولتقييم مكانة الدول في سباق ابتكارات الهيدروجين النظيف، ينبغي النظر إلى معيارين: البحث والتطوير من جهة، والإنفاق وبراءات الاختراع من الجهة الأخرى.

ولطالما ساهمت دول منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية بالجزء الأكبر من الإنفاق العالمي على أعمال البحث والتطوير في مجال الهيدروجين، رغم أن الصين تحرز بدورها تقدماً سريعاً بهذا المجال، وهو ما يتجلى من خلال زيادة الحكومة إنفاقها بمقدار 6 أضعاف على البحث والتطوير في قطاع الهيدروجين خلال عام 2019 (وكالة الطاقة الدولية، 2021). وتم تقسيم التمويل العام لقطاع الهيدروجين بالتساوي نسبياً بين خلايا الوقود والتطبيقات الأخرى (وكالة الطاقة الدولية، 2021). وفي حال استمرت موجة النمو الأخيرة لأعمال البحث والتطوير بمجال الهيدروجين، قد يعود الدعم الحكومي إلى مستويات لم نشهدها منذ أواخر عقد الـ 2000.

وتستأثر دول منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية بالغالبية العظمى من براءات الاختراع في قطاع الهيدروجين. وتهيمن اليابان على أبحاث خلايا الوقود، حيث تمتلك حوالي 40% من مجمل براءات الاختراع، بينما تنصهر أوروبا مكانة ريادية في مجال إنتاج الهيدروجين (لا سيما أجهزة التحليل الكهربائي) وتقنيات تخزينه (الشكل 3.10). وتستأثر خلايا الوقود بنحو 41% من مجمل براءات الاختراع المتعلقة بالهيدروجين، إلا أن نسبة النمو الأعلى التي تم تسجيلها خلال السنوات الأخيرة كانت في مجالات أخرى، مثل الإنتاج والتخزين. وستعتمد المكاسب المحققة، مثل القيمة المحلية المضافة، على المكان الذي تتركز فيه الملكية الفكرية.

الشكل 3.10 التوزع الجغرافي لمجموعات براءات الاختراع المتعلقة بالهيدروجين، 2010 - 2020.



المصدر: (أيرينا، منصة "إنسباير" الإلكترونية).

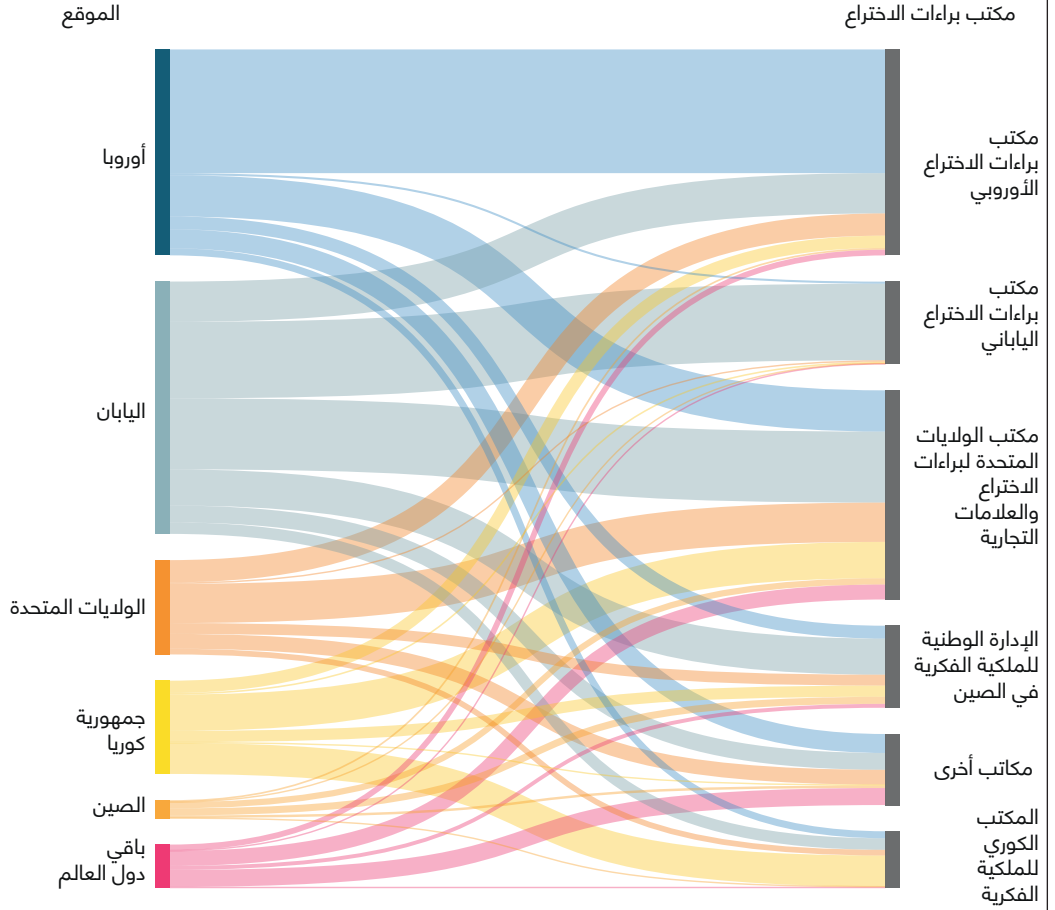
ملاحظة: بيانات براءات الاختراع لعام 2020 غير مكتملة، نظراً لسرية المرحلة الأولى من عملية منح براءات الاختراع. ويركز التحليل على أبرز 5 لاعبين ومكاتب براءات الاختراع الخاصة بهم. وتحال طلبات براءات الاختراع المقدمة لدى المنظمة العالمية للملكية الفكرية إلى مكتب التسليم المعني. ويتم تخصيص حصص متساوية لمقدمي الطلبات ومكاتب براءات الاختراع ضمن مجموعة براءات الاختراع. كما يتم تحديد تكنولوجيا الهيدروجين على أساس رموز التصنيف التعاوني لبراءات الاختراع في الفئات الفرعية والمتعلقة بتحسين التقنيات الداعمة لتقليل انبعاث غازات الدفيئة الناتجة عن توليد الطاقة أو نقلها أو توزيعها - طالما تم ذكر الهيدروجين على وجه التحديد (التوزيع Y02E60/34، خلايا الوقود Y02E60/50، الإنتاج Y02E60/36، التخزين Y02E60/32).

يمكن النظر إلى المناطق التي تتم فيها حماية الاختراعات المتعلقة بالهيدروجين، أن يقدم فكرة عن المكان الذي يسعى فيه قادة التكنولوجيا للتسويق (الشكل 3.11). وكانت أوروبا والولايات المتحدة بين عامي 2010 و2020 المنطقتان الأكثر حرصاً على حماية هذه الاختراعات. ولعل معظم الاختراعات الأوروبية (60% منها) محمية في السوق الأوروبي؛ والباقي محمي في مناطق أخرى ولا سيما الولايات المتحدة التي تشكل براءات الاختراع الأوروبية فيها حوالي 20% من إجمالي براءات الاختراع. ورغم أن اليابان طورت أكبر عدد من الاختراعات (36% من مجمل الاختراعات)، إلا أن عدداً قليلاً جداً منها محمي في اليابان من الخارج، مما يدل على وجود القدرات التكنولوجية العالية وتقلص الفرص السوقية بالمقابل. ويمكن للعدد المتنامي من شراكات التكنولوجيا الدولية أن ترسخ مكانة اليابان الرائدة في عالم التكنولوجيا، حتى ولو كانت الدولة الأكثر ترجيحاً لاستيراد الهيدروجين.

وتقف الصين في الطرف المقابل: حيث أن أكثر من 90% من الاختراعات التي تحميها الإدارة الوطنية للملكية الفكرية في الصين تأتي من الخارج. وحافظت الصين خلال العقد الماضي على مكانتها الجذابة في السوق كمرکز صناعات تحويلية، وهو توجه من المتوقع استمراره.



الشكل 3.11 تدفق الاختراعات بمجال تكنولوجيا الهيدروجين، 2010 – 2020



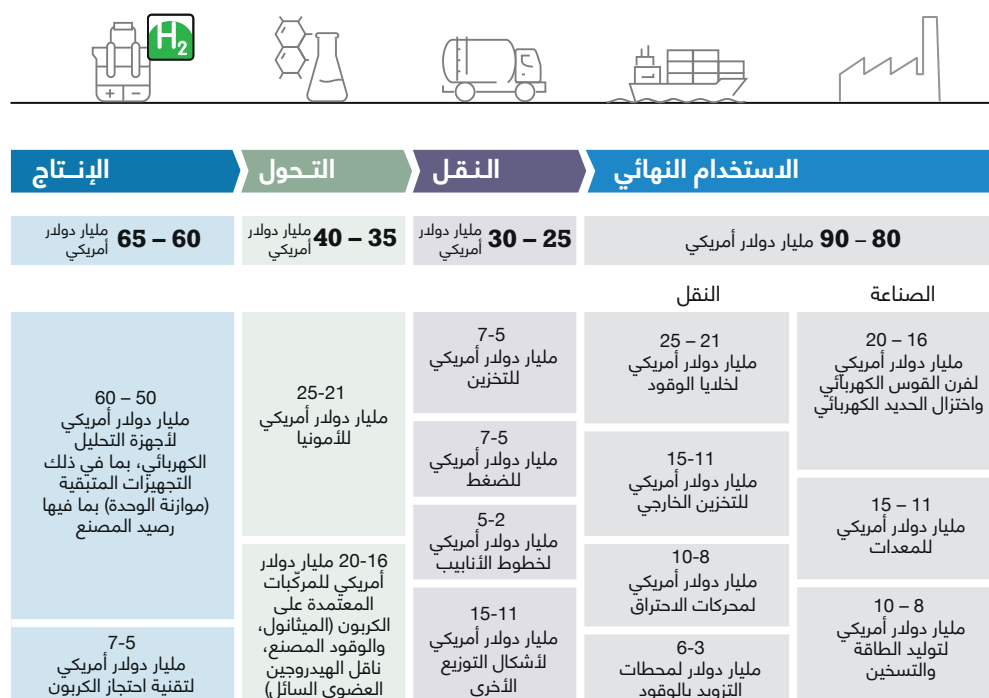
المصدر: آيرينا، منصة "إنسباير" الإلكترونية.
 ملاحظة: تدفق الاختراعات من الدولة التي تطور تقنيات الهيدروجين (على اليسار) إلى السوق الذي تتم فيه حماية هذه الاختراعات (على اليمين).
 يتاح المزيد من المعلومات عبر الرابط:

https://public.tableau.com/app/profile/irena.resource/viz/IRENA_INSPIRE_Hydrogen_Patents/HydrogenTech

تصنيع المعدات

يُعد السوق الناشئ للمعدات المتعلقة بإنتاج الهيدروجين معقداً ومجزأ للغاية. ويتوافر خارج نطاق هذا التقرير مناقشة كاملة لجميع التقنيات ذات الصلة. ويركز هذا القسم على جهاز التحليل الكهربائي وخلايا الوقود، الجهازان الرئيسيان المستخدمان في سلسلة قيمة الهيدروجين. ويوفر هذان الجهازان أهم الفرص للدول والشركات لتحقيق القيمة في السنوات والعقود القادمة، وترسيخ مكانتها الرائدة في القطاع. وتشير التقديرات إلى إمكانات سوقية تتراوح قيمتها بين 50 و60 مليار دولار أمريكي بالنسبة لأجهزة التحليل الكهربائي، وفرص بقيمة 21 – 25 مليار دولار أمريكي لخلايا الوقود بحلول عام 2050 (الشكل 3.12). وتعتبر هذه التقنيات أكثر تطوراً من تلك المستخدمة في أجزاء أخرى من سلسلة القيمة. ولم يُظهر استطلاع الخبراء الذي أجرته الوكالة الدولية للطاقة المتجددة خياراً استراتيجياً أفضل من جهاز التحليل الكهربائي كجزء من سلسلة قيمة الهيدروجين، بينما تم اعتبار خلايا الوقود ضرورية فيما يتعلق بالريادة التكنولوجية (أنظر الملحق).

الشكل 3.12 إمكانات السوق المقدرة لمعدات ومكونات الهيدروجين، 2050



المصدر: لودفيج وآخرون (2021).

أجهزة التحليل الكهربائي

تستخدم أجهزة التحليل الكهربائي منذ عقود طويلة؛ حيث تم تطوير العديد من أجهزة تحليل المياه القلوية بقدرة تزيد عن 100 ميغاواط خلال القرن العشرين (أنظر الجدول 3.1)، والتي على الأرجح تم بناؤها بالقرب من سدود الطاقة الكهرومائية القادرة على توفير كهرباء معقولة التكلفة. وتم استخدام الهيدروجين المتجدد بشكل رئيسي في إنتاج الأسمدة. وفي الواقع، كانت معظم الأسمدة المباعة في أوروبا، حتى ستينيات القرن الماضي، مصدرها أجهزة التحليل الكهربائي المعتمدة على الطاقة الكهرومائية وإنتاج الأمونيا في ريوكان وفيمورك في النرويج (فيليبيرت، 2017). وعليه، كان التحليل الكهربائي أمراً لا بد منه لإنتاج المواد الغذائية.¹⁸

18 حظيت أجهزة التحليل الكهربائي بأهمية عسكرية كبيرة حتى اندلاع الحرب العالمية الثانية. وكان مصنع ريوكان أول موقع ينتج الماء الثقيل (الديوتيريوم) بكميات ملائمة للأغراض الصناعية في ثلاثينيات القرن الماضي، كمنتج ثانوي لتحليل الماء الكهربائي. وأصبح هذا الموقع نقطة تحول استراتيجية خلال الحرب العالمية الثانية نظراً لإمكانية استخدام الديوتيريوم في تطوير الأسلحة النووية.

الجدول 3.1 أمثلة تاريخية لمصانع إنتاج الهيدروجين باستخدام التحليل الكهربائي واسع النطاق

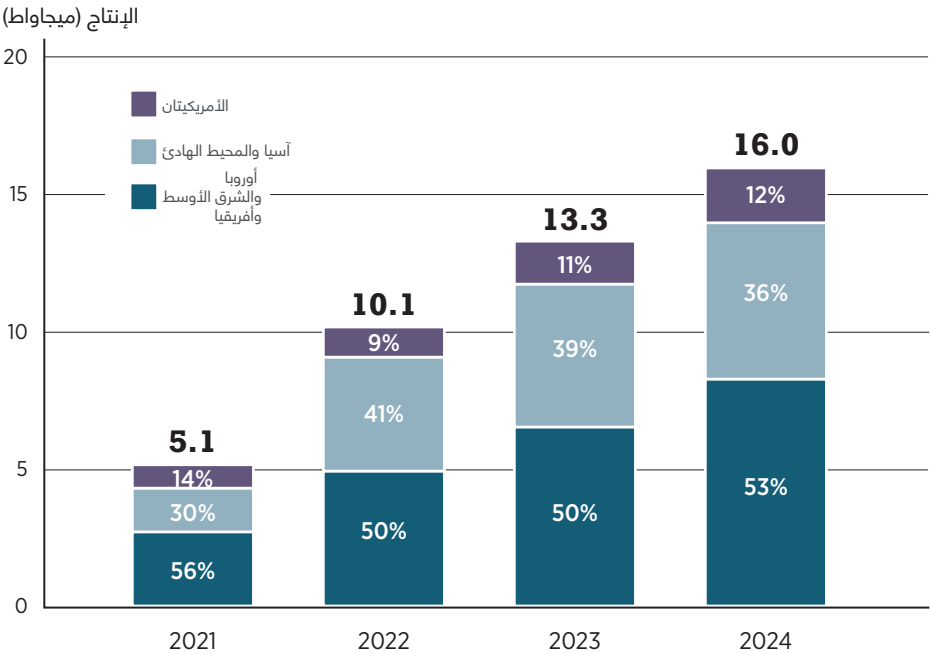
موقع المصنع (البلد،المدينة)	القدرة (بالميجاواط)	عام الانطلاق
 النرويج (ريوكان)	165	1929
 كندا (تريل)	90	1939
 النرويج (جلومفجورد)	160	1953
 الهند (نانجال)	125	1958
 بيرو (كوزكو)	25	1958
 مصر (أسوان)	160	1960
 زمبابوي (كيو كيو)	95	1974

المصدر: سمولينكا وجونتر وجارش (2011)؛ جودول جوبيك (2015). ملاحظة: تم إغلاق جميع هذه المصانع أو تحويلها إلى الوقود الأحفوري، باستثناء المصنع الموجود في بيرو.

رغم الخبرة العريقة التي تفوق 100 عام في أنظمة التحليل الكهربائي للمياه ووجود آلاف المحطات المركبة في جميع أنحاء العالم، فقد تم وصف هذه الصناعة في عام 2014 بكونها صغيرة ومجزأة (المشروع المشترك لخلايا الوقود الهيدروجينية، 2014). ورغم تطورها التكنولوجي، لم يكن بمقدور إنتاج الهيدروجين الإلكتروني منافسة الوقود الأحفوري (جودولا جوبيك، 2015).

ولعل الفرص التي يتيحها اليوم انخفاض تكلفة إنتاج الكهرباء المتجددة والحاجة إلى تقليل نسبة الانبعاثات العالمية إلى الصفر، يحفزان على النهوض بقطاع التحليل الكهربائي مجدداً. وفي عام 2018، بلغت القدرة السنوية العالمية لتصنيع أجهزة التحليل الكهربائي حوالي 135 ميغاواط (آيرينا، 2020 أ)، ومن المتوقع أن يرتفع هذا الرقم إلى 16 جيغاواط بحلول عام 2024 (الشكل 3.13). وتم الإعلان عن العديد من المصانع ذات القدرة الإنتاجية على مستوى الجيجاواط والتي ستقوم بإنتاج أجهزة التحليل الكهربائي على نطاق واسع، بما في ذلك تلك الموجودة في أستراليا وفرنسا والهند وإيطاليا والنرويج وإسبانيا والمملكة المتحدة (آيرينا، 2021 ب، بولارد 2021، بريسبان تايمز 2021، لاريبوبليكا 2021). ومن المتوقع أن تساهم مشاريع بهذا الحجم في التقليل إلى حد كبير من تكاليف إنتاج الهيدروجين الإلكتروني عبر تحقيق وفورات الحجم من خلال التصنيع الشامل وخطوط الإنتاج المؤتمتة بالكامل.

الشكل 3.13 القدرة العالمية المقدرة لتصنيع أجهزة التحليل الكهربائي 2021 – 2024، بناءً على خطط الاستثمار.

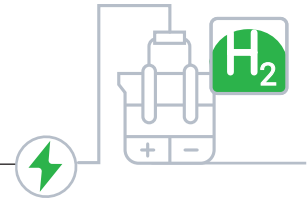


المصدر: بلومبرغ لتمويل الطاقة المتجددة (2021 ب).

لطالما احتلت أوروبا مكانة قوية في صناعة أجهزة التحليل الكهربائي. وحتى اليوم، يتركز نحو نصف إجمالي الشركات المصنّعة لهذه الأجهزة في أوروبا، كما أن غالبية موردي مكوناتها هم أوروبيون (معهد فراونهوفر لأنظمة الطاقة الشمسية، 2020). ومن المتوقع أن تستحوذ أوروبا والشرق الأوسط وأفريقيا على نصف القدرة التصنيعية لأجهزة التحليل الكهربائي في الأعوام القادمة، وذلك بناءً على الخطط الاستثمارية المعلنة (انظر الشكل 3.13).¹⁹ وتهدف استراتيجية الاتحاد الأوروبي للهيدروجين إلى الحفاظ على تنافسية المنطقة في مجال تصنيع أجهزة التحليل الكهربائي.²⁰ إذ تُثمة رغبة قوية في أوروبا للحيلولة دون اتباع صناعة الهيدروجين الناشئة ذات المسار الذي شهدته صناعة الطاقة الشمسية الكهروضوئية في القارة، حيث سبق أن تصدرت أوروبا، ولا سيما ألمانيا، هذه الصناعة لكنها سرعان ما انهارت في مواجهة وحدات الطاقة الشمسية الصينية الأرخص ثمناً (أمبلانج، 2020).

وبالرغم من امتلاك أوروبا لأكبر قدرة تصنيعية لأجهزة التحليل الكهربائي، إلا أن الصين تعتبر الرائدة في شحنات هذه الأجهزة (بلومبرغ لتمويل الطاقة المتجددة، 2021ب). كما أن أجهزة التحليل الكهربائي الصينية أرخص بكثير من نظيراتها الأوروبية. ويمكن للمصنّعين الصينيين إنتاج محلات كهربائية قلووية قياسية بتكلفة 300 دولار أمريكي/ كيلوواط؛ أي أرخص بنسبة 75% من التآلات غربية الصنع من نفس النوع (بلومبرغ لتمويل الطاقة المتجددة، 2021ب). وتستثمر العديد من الشركات، وأغلبها غربية، في تقنيات أكثر ابتكاراً، مثل غشاء تبادل البروتون؛ والأكسيد الصلب؛ وأجهزة التحليل الكهربائي القلووية المضغوطة. وبالرغم من أن هذه التقنيات باهظة الثمن، إلا أنها تتمتع بمزايا عديدة؛ فمثلاً، يعد جهاز التحليل الكهربائي بغشاء تبادل البروتون أكثر إككاماً وملاءمة لإنتاج الكهرباء المتجددة المتغيرة من الأجهزة القلووية القياسية.²¹

وسجّلت الشركات في كل من الصين وأوروبا واليابان انطلاقة قوية في إنتاج وبيع أجهزة التحليل الكهربائي، إلا أن السوق لا يزال ناشئاً وصغيراً نسبياً. ومع تحوّل محطات إنتاج الهيدروجين من مستوى الميجاواط إلى الجيجاواط لتلبية الطفرة المتوقعة في الطلب على الهيدروجين النظيف، فقد تشهد حصص السوق تغيراً سريعاً أيضاً. كما أن للابتكار والتقنيات الناشئة أيضاً القدرة على تغيير ملامح سوق أجهزة التحليل الكهربائي ومشهد تصنيعها الحالي.



19 تمتلك أوروبا أكبر قدرة تصنيعية في هذه الفئة، ويرى تقييم آخر أن أوروبا ستزيد قدرتها على تصنيع أجهزة التحليل الكهربائي إلى حوالي 18 جيجاواط بحلول عام 2025 ("الغاز من أجل المناخ"، 2021ب).

20 تشير استراتيجية الاتحاد الأوروبي للهيدروجين إلى أن تفضيل أوروبا للهيدروجين المتجدد "تتركز على قوة أوروبا الصناعية في إنتاج أجهزة التحليل الكهربائي"، و"تمتعها بقدرة تنافسية عالية في تقنيات تصنيع الهيدروجين النظيف، كما أنها في وضع جيد للاستفادة من التطور العالمي الحاصل في الهيدروجين النظيف كنافل للطاقة" (المفوضية الأوروبية، 2020).

21 من المرجح أن تكون هذه الفروقات بسيطة للغاية بالنسبة للمشاريع الكبيرة أو يمكن التغلب عليها عبر تبني الحلول الهندسية والبطاريات (وانج، 2021).

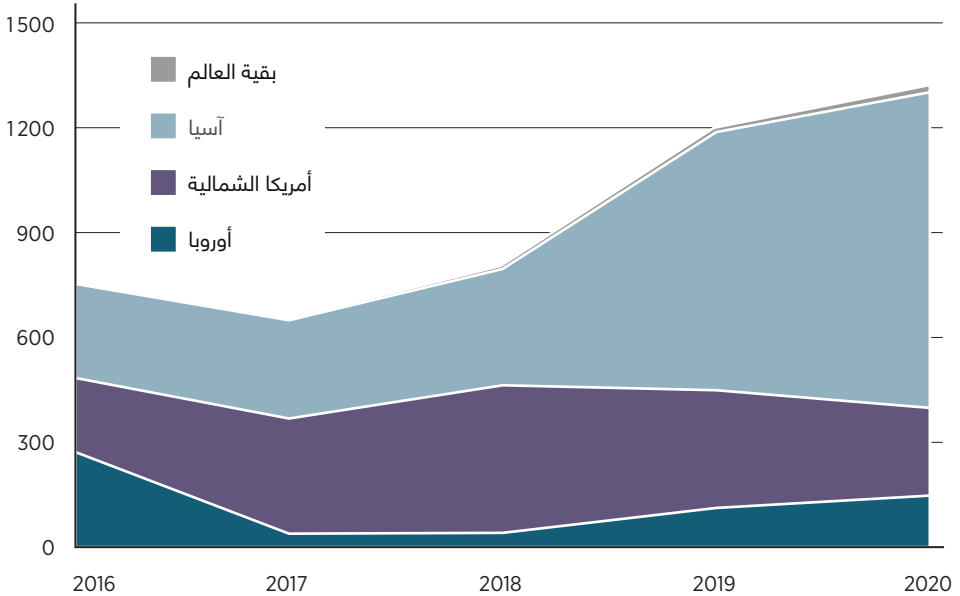
خلايا الوقود

خلايا الوقود عبارة عن أجهزة تحوّل الهيدروجين إلى كهرباء عبر تفاعل كيميائي كهربائي. وهي في الأساس أجهزة تحليل كهربائي تعمل بالعكس: حيث يستخدم الهيدروجين والهواء لتوليد الكهرباء والماء، عوضاً عن استخدام الماء والكهرباء لإنتاج الهيدروجين.²² ويمكن اعتماد خلايا الوقود في التطبيقات الثابتة (محطات توليد الطاقة الضخمة مثلاً)؛ كما يمكن استخدام هذه الخلايا أيضاً في تطبيقات النقل، مثل السيارات الكهربائية التي تعمل بخلايا الوقود، والشاحنات، والحافلات، والرافعات الشوكية، والعبّارات، والسفن، والطائرات.

وركزت معظم سياسات دعم الهيدروجين تاريخياً على السيارات الكهربائية التي تعمل بخلايا الوقود ومحطات التزود بوقود الهيدروجين (آيرينا، 2020ب). وانخفضت تكلفة خلايا وقود السيارات بنسبة 70% بين عامي 2008 و2020 (كلين وباجيت، 2021)، ويمكن توقع المزيد من الانخفاض في حال زيادة الإنتاج. وبرغم ذلك، فقد نمت الشحنات العالمية من خلايا الوقود بوتيرة خجولة نسبياً. وفي عام 2020، تم بيع 1.3 جيجاواط من خلايا الوقود عالمياً، وتم استخدام معظمها في السيارات والحافلات والشاحنات في آسيا (الشكل 3.14)؛ حيث تم بيع نحو 8 000 سيارة كهربائية تعمل على خلايا الوقود في عام 2020 (E4Tech، 2021). وعلى الرغم من أن 8 000 هو أعلى رقم مسجل لبيع سيارات كهربائية تعمل بخلايا الوقود، إلا أن هذا الرقم يعتبر ضئيلاً مقارنة بثلاثة ملايين سيارة كهربائية تم بيعها على مستوى العالم في نفس العام (وكالة الطاقة الدولية، 2021ج).

الشكل 3.14 مبيعات خلايا الوقود حسب المنطقة التي تتبناها، 2016-2020

مبيعات خلايا الوقود (ميجاواط)



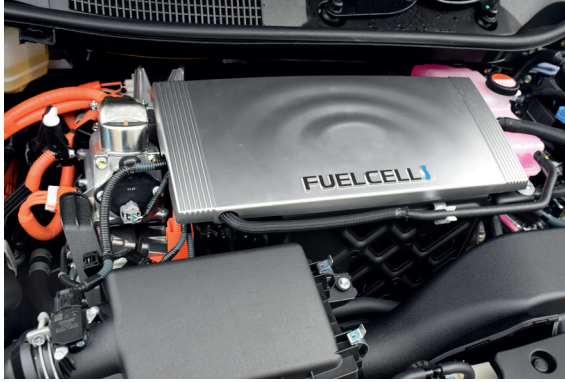
المصدر: E4Tech(2021).

22 من أنواع أجهزة التحليل الكهربائي، خلية التحليل الكهربائي للأكسيد الصلب، وهي أساساً خلية وقود الأكسيد الصلب المقابلة التي تعمل بالعكس.

ورغم ذلك، ما تزال العديد من البلدان تمضي قدماً في استخدام خلايا الوقود في الكثير من قطاعات الاستخدام النهائي. إذ تهدف الصين إلى امتلاك وتشغيل مليون سيارة كهربائية تعمل بخلايا الوقود بحلول عام 2030؛ بينما قامت اليابان بتركيب 400 ألف من أنظمة خلايا الوقود المعدّة للاستخدام في السكن، وتتطلع إلى تركيب 5.3 مليون نظام بحلول عام 2030؛ وتصبو جمهورية كوريا إلى تصنيع 15 جيجاواط من خلايا الوقود لتوليد الطاقة بحلول عام 2040 (7 جيجاواط منها معدّة للتصدير)؛ والتزم تحالف من الشركات في أوروبا بنشر ما يصل إلى 100 ألف شاحنة ثقيلة تعمل بخلايا وقود الهيدروجين بحلول عام 2030. ويتمثل هدف كاليفورنيا الرسمي بتوفير 200 محطة للتزود بوقود الهيدروجين بحلول عام 2025 (مجلس موارد الهواء في كاليفورنيا 2019، CARB)، مع توقعات بوصول عددها إلى 1000 محطة تخدم مليون سيارة كهربائية تعمل بخلايا الوقود بحلول عام 2030 (CACFP، 2018).

ولا يزال دور خلايا الوقود في انتقال الطاقة مقارنةً بأجهزة التحليل الكهربائي قيد التطور. ومن المتوقع أن يؤدي الابتكار في خلايا الوقود إلى تغير الأسواق والاهتمام بالطاقة في الأعوام المقبلة. وبكل الأحوال، من المرجح أن يكون الحجم الإجمالي لسوق خلايا الوقود أصغر من حجم سوق أجهزة التحليل الكهربائي.

© Tramino/istockphoto.com



H₂



3.5 التنمية الصناعية في البلدان الغنية بالطاقة المتجددة

شكّل الوصول إلى الطاقة لعدة قرون أحد العوامل الرئيسية التي تحدد مواقع النشاط الصناعي. فبدءاً من سلالة سونغ في القرن الثاني عشر في الصين، ووصولاً إلى إنجلترا خلال الثورة الصناعية، وانتهاءً بالغرب الأوسط العلوي للولايات المتحدة في القرن العشرين؛ ظهرت صناعات الصلب في مواقع تتمتع بإمكانية الوصول إلى الفحم وخام الحديد (لوفينز، 2021). ونظراً لضخامة الفحم وثقله وكلفة نقله الباهظة، كان إنتاج الصلب في مواقع رواسب الفحم ثم نقله يعتبر أكثر كفاءة من نقل الفحم إلى موقع إنتاج الصلب (ماكويلايمز وزاكمن، 2021).

ولطالما استقطبت المناطق الغنية بالفحم صناعات أوسع. ففي سبعينيات القرن الثامن عشر، رأى المؤلف آدم سميث في كتابه الاقتصادي "ثروة الأمم": "أن المصنعين في جميع أنحاء بريطانيا العظمى، اقتصرُوا بشكل أساسي على بلدان الفحم" (سميث، 1776). ولاحظ أحد المؤرخين للاقتصاديين أن "خريطة الثورة الصناعية البريطانية، كما هي معروفة، ما هي إلا خريطة لحقول الفحم" (بولارد، 1981). وكان الانخفاض الكبير في تكاليف نقل البضائع منذ القرن التاسع عشر هو السبب الذي جعل المواقع الصناعية تستقل عن أماكن توافر الموارد الطبيعية- وهي ظاهرة توصف بـ "قتل المسافة" (جلابسر وكولهايز، 2004).

وسيغير انتقال الطاقة العالمي مصادر الحصول على الطاقة وتحويلها وتوزيعها. وفي مستقبل الحيداء الصفري، سيتحدد الوصول إلى الطاقة بصورة عامة من خلال المصادر المتجددة للكهرباء والوقود المشتق من هذه المدخلات (الهيدروجين، والأمونيا، إلخ). ويتوقف هذا الانتقال في الطاقة إذا ما ترافق مع انتقال المراكز الصناعية إلى المناطق الغنية بمصادر الطاقة المتجددة، على ثلاثة عوامل أساسية هي: الاختلافات بين المواقع على صعيد تكلفة الطاقة المتجددة؛ وتكلفة نقل الطاقة؛ وثبات المنشآت والتكتلات الصناعية القائمة (ماكويلايمز وزاكمن، 2021).

وتؤثر العديد من العوامل في عملية اختيار موقع للإنتاج الصناعي، ومنها رأس المال البشري والبنية التحتية وتكاليف العمالة، إلا أن تكلفة الطاقة قد تلعب دوراً حاسماً في هذا الاختيار. أما بالنسبة للصناعات التي تستهلك كمية كبيرة من الطاقة مثل الحديد؛ والصلب؛ والكيمائيات؛ والبتروكيماويات؛ والمعادن غير الحديدية؛ ومواد السيراميك، فإن تكلفة مدخلات الطاقة والوقود الأحفوري تشكّل حصة كبيرة من إجمالي تكاليف الإنتاج (مويا ريفيرا وبولماتي، 2016). ومع التزام المزيد من البلدان باقتصادات الحيداء الصفري، وفرض سياسات لخفض الكربون مثل تسعير الكربون، فإن تكلفة مدخلات الوقود الأحفوري سترتفع أكثر حتماً. لذا يتعين على العديد من هذه الصناعات التفكير في الحصول على طاقة نظيفة منخفضة التكلفة للحفاظ على قدرتها التنافسية.

ورغم انخفاض تكلفة مصادر الطاقة المتجددة في جميع أنحاء العالم، لكن لا تزال هنالك فروق كبيرة في التكلفة بين البلدان والمناطق. فمثلاً، تتمتع العديد من البلدان النامية في المناطق الاستوائية بميزة تنافسية طبيعية في مجال الطاقة الشمسية.²³ ويمكن أن تتفاوت التكاليف الرأسمالية لتقنيات الطاقة الشمسية عبر المناطق بمعدل 3 أو حتى 6 أضعاف، وبالتالي تتمتع بعض البلدان بميزة تكلفة تنافسية بواقع ثلاثة إلى واحد في استخدام تقنيات الطاقة الشمسية، ويمكن أن تكون النسبة أعلى بكثير في المواقع الأفضل.²⁴ وتبقى تكلفة نقل الطاقة المتجددة، سواء على شكل كهرباء أو هيدروجين، مرتفعة نسبياً، وأرخص وسيلة لنقل الطاقة هي في المواد والمنتجات. وبالتالي، تخلق الإمكانات المتجددة ميزة تنافسية هامة بالنسبة للمناطق ذات الموارد المتجددة الفائضة، لتصبح بذلك مواقع رائدة في التصنيع الأخضر.

ويعتبر انتقال المواقع الصناعية أمراً منطقياً حين يتفوق انخفاض تكلفة الطاقة على تكلفة الشحن الإضافية. وقد يخدم هذا الانتقال سلعاً مثل الألمنيوم؛ والألمونيوم؛ والحديد؛ ووقود الطائرات؛ والميثانول. (الجدول 3.2).

23 لا يوجد تعريف متفق عليه عالمياً لمصطلح "البلدان النامية". لكن في هذا التقرير، وحسب تعريف البنك الدولي هي البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل.
24 يستند الحساب إلى التكلفة المستوية للكهرباء من الطاقة الشمسية الكهروضوئية للقطاع التجاري والتي تبلغ 0.055 دولاراً أمريكياً للكيلوواط ساعي في الهند، و0.190 دولاراً أمريكياً للكيلوواط ساعي في ولاية ماساتشوستس (الولايات المتحدة) في عام 2020 (أيرينا ، 2021).

الجدول 3.2 اقتصاديات اختيار الموقع الصناعي

الإنتاج العالمي 2021 مليون طن / سنوياً	سعر المنتج (دولار أمريكي / طن)	سعر المنتج 2030 (دولار أمريكي / طن)	تكلفة الشحن (إرشادية) (دولار أمريكي / طن)	فوائد تكلفة الطاقة من انتقال الموقع (دولار أمريكي / طن)
65	2500	2500	100-70	425
200	400-250	600	100	340
2900	20	100	50	20
1389	500-300	600-400	50-15	115
250	500-300	1000	50	600
100	520-410	600	100	375
120	800	1500	1500	1500

المصدر: جيلين وآخرون (2021)
ملاحظة: تم حساب فوائد تكلفة الطاقة بضرب كثافة الطاقة في وفورات التكاليف لكل وحدة طاقة. وتم أخذ بيانات تكلفة الشحن من استطلاعات السوق الأخيرة. الأرقام إرشادية؛ فهي تميل إلى التقلب بناءً على العرض والطلب. وتبلغ فائدة تكلفة الطاقة 0.03 دولاراً أمريكياً للكيلوواط ساعي للكهرباء، و5 دولارات أمريكية للجيولوجيا الحرارية، و1.5 دولار أمريكي للكيلوجرام الواحد من الهيدروجين.



توجد الكثير من الأمثلة على انتقال المراكز الصناعية المبني على الوصول إلى الطاقة الرخيصة؛ فبعد أزمات النفط التي شهدتها فترة سبعينيات القرن الماضي، تخلصت اليابان تدريجياً من مصاهر الألمنيوم وتحولت إلى الواردات. وتقع مصاهر الألمنيوم عادةً بالقرب من سدود الطاقة الكهرومائية التي توفر كميات كبيرة من الكهرباء بتكلفة منخفضة، وذلك في أماكن مختلفة من العالم مثل كندا، وآيسلندا، وموزمبيق، والنرويج، وروسيا، وسورينام، وطاجيكستان، وفنزويلا (الجمهورية البوليفارية). أما مصانع الألمنيوم فتقع بالقرب من مصادر الغاز الطبيعي منخفض التكلفة، كما في النرويج والشرق الأوسط وروسيا مثلاً. ويتم التخطيط لإقامة مصانع الألمنيوم المتجددة في أماكن إنتاج طاقة الرياح والطاقة الشمسية بتكلفة منخفضة جداً، في الأجزاء النائية من أستراليا؛ وتشيلي؛ وعمان؛ والمملكة العربية السعودية، على سبيل المثال. (جيلين وآخرون، 2021).

وبالطبع، لن تُرسم خريطة المواقع الصناعية المستقبلية على ورقة بيضاء، فتحديدها يتوقف على عوامل أخرى غير انخفاض تكلفة الطاقة. إذ من المحتمل أن تصمد التجمعات والتكتلات الصناعية الحالية بوجه التغيير. فمثلاً، تقع معظم مصانع الصلب منخفضة الكربون في أوروبا ضمن التجمعات الصناعية الحالية (ماكويلايمز وزاكمن، 2021). علاوةً على ذلك، سترغب البلدان في الاحتفاظ بقاعدتها الصناعية، فيما تبحث عن سبل لإزالة الكربون من الصناعات الملوثة.

فإنشاء مرافق إنتاج جديدة في البلدان الغنية بالطاقة المتجددة، لا يعني بالضرورة إغلاق المصانع في أماكن أخرى. وعلى النقيض من ذلك، ثقة مجالات واسعة للنمو في العديد من الصناعات. فمن غير الممكن تلبية الطلب العالمي المتوقع على الصلب بنحو 200 مليون طن سنوياً بحلول عام 2050 عن طريق تعديل مواقع الإنتاج الحالية (باتاي وآخرون، 2021). وستتاح فرص جديدة لإنشاء مرافق إضافية لإنتاج الطاقة النظيفة في البلدان الغنية بخام الحديد ومصادر الطاقة المتجددة الرخيصة.²⁵

بالإضافة إلى ذلك، ستمكن بعض البلدان التي لا تستطيع الوصول إلى مصادر الطاقة المتجددة الرخيصة من الحفاظ على الصناعات التحويلية، تماماً كما يمكن للدول التي ليس لديها نفط أن تمتلك صناعات بتروكيماوية ضخمة. لكن بعض الصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة قد تتحول إلى بلدان تمتلك فائضاً من المصادر المتجددة منخفضة التكلفة، أو مُصدرة للسلع أو المنتجات شبه المُصنعة (الحديد المختزل المباشر، وغيرها) لاستكمال تصنيعها في بلدان أخرى. على سبيل المثال، تصدر أستراليا حالياً خام الحديد إلى أفران الصهر التي تعمل بالفحم في الصين، والتي تنتج نصف إنتاج الصلب في العالم (لوفينز، 2021 ب). وبالنظر إلى إمكانات الطاقة المتجددة الهائلة في أستراليا، فيمكنها التحول من تصدير فحم الكوك وخام الحديد إلى تصدير الحديد المختزل المباشر القائم على الهيدروجين المتجدد. (جيلين وآخرون 2020).

²⁵ تتطلب صناعة الصلب القائمة على الهيدروجين حبيبات خام حديد عالية الجودة كمواد وسيطة. ويتم حالياً إنتاج كمية محدودة فقط من الخام عالي الجودة، ومعظمها في الأمريكتين وأوروبا والشرق الأوسط، على الرغم من امتلاك البرازيل والهند وروسيا وجنوب أفريقيا إجمالاً احتياطيات عالية الجودة. وتعتبر أستراليا، أكبر منتج لخام الحديد في العالم، لكنها حالياً تنتج خاماً منخفض الجودة. وسيحتاج منتجو خام الحديد الأستراليون إلى تحسين منتجاتهم لتناسب صناعة الصلب القائمة على الهيدروجين، لكن قد يتطلب ذلك زيادة تكاليف الإنتاج (بلومبرغ لتمويل الطاقة المتجددة، 2021 ت).

الفصل الرابع

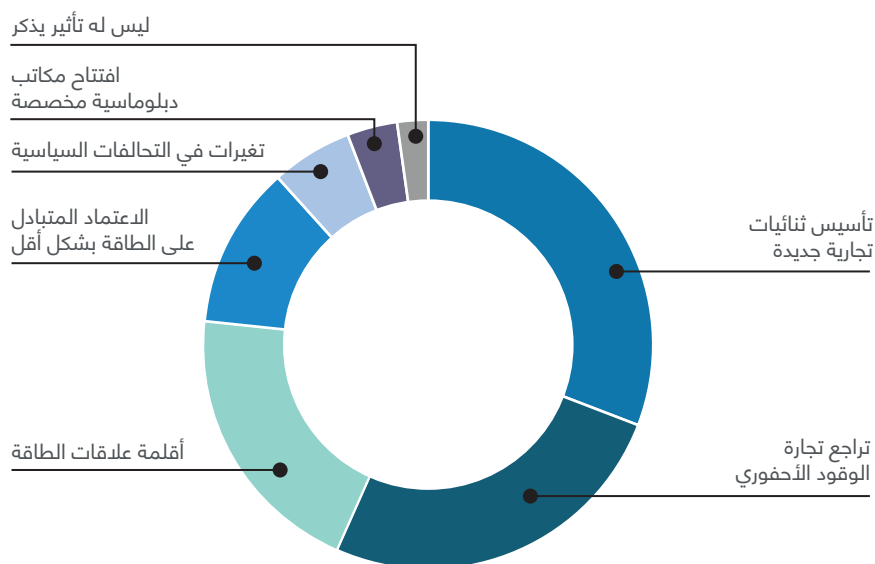
التجارة والأمن وعلاقات الاعتماد المتبادل



مع تحول الهيدروجين لسلعة متداولة دولياً، سيستقطب قطاعه استثمارات دولية أكبر. وإلى جانب هذه التدفقات التجارية والاستثمارية الجديدة، ستنشأ أنماط من علاقات الاعتماد المتبادل العالمية تختلف عن علاقات الطاقة القائمة على الهيدروكربون التي كانت سائدة في القرن العشرين. وسيغير هذا التحول جغرافية تجارة الطاقة. فقد تتمكن البلدان التي لم تربطها علاقات تجارية سابقاً في مجال الطاقة من تأسيس علاقات طاقة ثنائية تتمحور حول تقنيات وجزئيات الهيدروجين. ومع تغير العلاقات الاقتصادية بين الدول، تتغير علاقاتها السياسية حتماً. فظهور سوق هيدروجين دولي قد يؤدي إلى إعادة تشكيل السياسة الخارجية وإحداث تحولات في العلاقات الثنائية والتحالفات (الشكل 4.1).



الشكل 4.1 آراء أعضاء الوكالة الدولية للطاقة المتجددة حول آثار الهيدروجين على السياسة الخارجية بحلول عام 2030

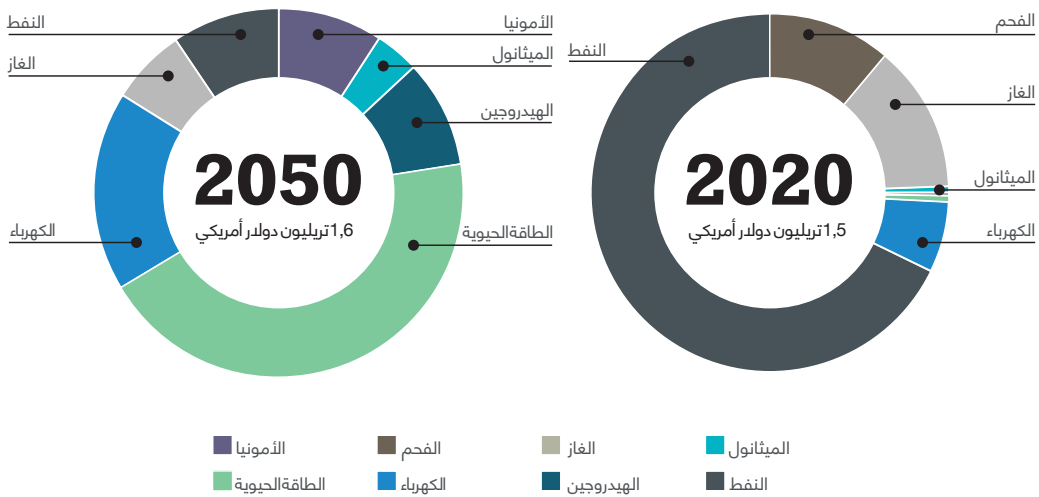


المصدر: استطلاع رأي أعضاء الوكالة الدولية للطاقة المتجددة، 2021، (انظر الإطار 2.2) يمكن للمشاركين في الاستطلاع اختيار عدة إجابات. يظهر الرسم البياني حصة الأصوات المدلى بها.

4.1 خريطة جديدة للتجارة

ينبغي تقييم تأثير الهيدروجين النظيف على تجارة الطاقة العالمية في سياق التحول الأوسع للطاقة. إذ سيحدث التحول من الوقود الأحفوري إلى مصادر الطاقة المتجددة تغييراً جذرياً في طبيعة تجارة الطاقة وجغرافيتها. وستتحول تجارة موارد الطاقة تدريجياً إلى التجارة في تقنيات الطاقة والمكونات ومواد الخام ذات الصلة (آيرينا، 2019). وعليه، ستنخفض قيمة تجارة الوقود الأحفوري،²⁶ بينما سترتفع تجارة الكهرباء والهيدروجين والوقود الغني بالهيدروجين (الشكل 4.2).

الشكل 4.2 التحولات في قيم تجارة سلع الطاقة بين عامي 2020-2050



26 تشمل هذه القيم أيضاً التأثيرات الاجتماعية والسياسية والجيواستراتيجية، وأمور أخرى.



من المرجح أن تغلب الصفة الإقليمية على علاقات الطاقة، وبالتالي ستطراً تحولات على الخريطة الجيوسياسية. إذ يمكن نشر الطاقة المتجددة في جميع الدول، فضلاً عن إمكانية تصدير الكهرباء المتجددة إلى البلدان المجاورة عبر كابلات النقل. كما يستطيع الهيدروجين تسهيل نقل الطاقة المتجددة المنتجة لمسافات أطول عبر خطوط الأنابيب والشحن، وبالتالي تمكين الاستفادة من الموارد المتجددة غير المستغلة في المواقع النائية. ومع ذلك، من المرجح أن يظهر سوق مزدوج للهيدروجين مدفوعاً بتكاليف النقل: سوق إقليمي لتجارة الهيدروجين عبر خطوط الأنابيب، وسوق عالمي للألمونيا والميثانول وأنواع الوقود السائل الأخرى. قد ينتهي الأمر بتداول الهيدروجين في سوق إقليمي أكثر تنوعاً من أسواق النفط والغاز.

يتركز استخدام الهيدروجين حالياً في المناطق الساحلية الصناعية حول العالم، حيث توجد العديد من المصافي والمرافق الكيميائية. وتشكل هذه المنافذ منصات انطلاق مثالية للاستفادة من توسيع نطاق الهيدروجين النظيف. ومع مرور الوقت، يمكن لهذه المنصات أن تتطور إلى مراكز استيراد أو تصدير وكذلك لمواقع تخزين تزود القطاع البحري بالوقود. كما يمكن لهذه المنافذ وغيرها من المناطق الأخرى ذات النشاط المركز على طول سلسلة قيمة الهيدروجين (يشار إليها أحياناً باسم "وديان الهيدروجين") أن تصبح مترابطة لاحقاً عبر روابط نقل الهيدروجين. عدا عن إمكانية تحولها إلى عقد تتفرع منها شبكة من محطات التزود بوقود الهيدروجين على طول طرق الشحن الرئيسية.

ويمكن إعادة استخدام بعض خطوط أنابيب نقل الغاز الطبيعي الحالية (بعد إجراء تعديلات تقنية عليها) لنقل الهيدروجين. وتشير خريطة خطوط أنابيب نقل الغاز الطبيعي الحالية، كما هو موضح في الشكل 4.3، إلى الأماكن التي يمكن أن تظل فيها الأنابيب العابرة للحدود موجودة، حتى مع الهيدروجين الأخضر. وكما هو واضح، فإن خطوط أنابيب الغاز الطبيعي لا تغطي جميع المناطق بشكل متكافئ. تقف الشبكات الكثيفة لخطوط الأنابيب في شرق آسيا وأوراسيا وأمريكا الشمالية في تناقض صارخ مع الشبكات المتناثرة نسبياً في القارات الأخرى، والغياب شبه الكامل لمثل البنية التحتية في أفريقيا جنوب الصحراء الكبرى. ومع ذلك، فإن الإمكانات المتجددة الهائلة التي تمتلكها أفريقيا تفتح أبواباً من الفرص الجديدة لتنمية القارة والانتقال بها إلى عالم خالٍ من الانبعاثات الكربونية (البطار 4.1).

4.1 البطار

فرص البنية التحتية المتاحة أمام أفريقيا في قطاع الشحن البحري

تمتلك أفريقيا إمكانات هائلة في مجال الطاقة المتجددة، والتي يمكن استخدامها لتلبية طلب قطاع التجارة البحرية المتنامي. فقد بلغ إجمالي حجم التجارة البحرية في عام 2019 في أفريقيا 762 مليون طن، أي حوالي 7% من الإجمالي العالمي (مؤتمر الأمم المتحدة للتجارة والتنمية، 2020). وتستحوذ نيجيريا على حوالي ثلث نشاط الشحن البحري، تليها المغرب وجنوب أفريقيا. وقد يؤدي الدخل المرتفع والنمو الاقتصادي وزيادة عدد السكان إلى ارتفاع قيمة الشحن البحري بأكثر من 11 ضعف قيمها حالياً بحلول عام 2050 (خليلي وآخرون، 2019). حتى مع الأخذ في الاعتبار كفاءة الطاقة والاندخاض المحتمل بنسبة 45% في استهلاك السفن للطاقة (آيرينا، 2021د)، يمكن أن يصل الطلب على الكهرباء للوقود الاصطناعي إلى 500 تيراواط ساعي. وبلغ الطلب الكلي في أفريقيا على الكهرباء في عام 2019 إلى حوالي 700 تيراواط ساعي (وكالة الطاقة الدولية، 2019ب). ويتطلب ارتفاع الاستهلاك ما بين 100 - 350 جيجاواط من التحليل الكهربائي (اعتماداً على نوع الكهرباء المتجددة المستخدمة) ويمكن أن يحفز استثماراً بقيمة 200 - 400 مليار دولار أمريكي.

تنسجم مرافق التزويد بالوقود الجديد في قطاع الشحن البحري مع تحويل الموانئ وبناء مرافق التصدير. وقد بدأت التحركات في هذا الاتجاه بالفعل، حيث وقعت سلطة الموانئ الناميبية مذكرة تفاهم مع ميناء روتردام في نوفمبر 2021 بهدف إنشاء طريق تجاري للهيدروجين الأخضر. ويهدف الميناء إلى استيراد 20 مليون طن متري في الساعة بحلول عام 2050، تزامناً مع خطط ناميبيا لتطوير مشروع بقدر 0.3 مليون طن متري في الساعة، لبدء الصادرات بحلول عام 2026. وقام برنامج شركاء من أجل النمو التابع للغرفة الأوروبية للتجارة والصناعة في جنوب أفريقيا بتقييم إمكانات صادرات الهيدروجين، بما في ذلك أحجامها وتكاليفها وأسواقها المحتملة (رايت وروس، 2021). ونتيجة لذلك، تم الإعلان عن دراسة جدوى لتقييم إمكانات بويجوباي كمرکز لتصدير الهيدروجين الأخضر والأمونيا في أكتوبر 2021. الأمر الذي من شأنه أن يكمل النشاط الصناعي في المنطقة ويبرر إنشاء الميناء الذي ما زال قيد التقييم حالياً.



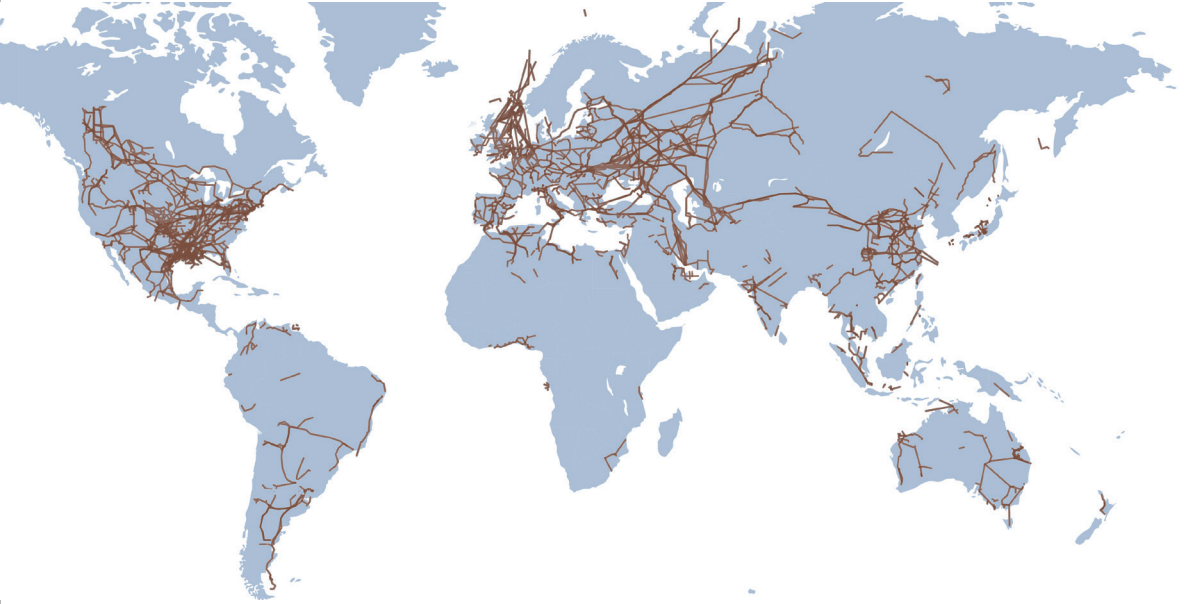
©fivepointsix/istockphoto.com



©AvigatorPhotographer/istockphoto.com

ينبغي لأي قرار يخص البنية التحتية للطاقة أن يأخذ بعين الاعتبار حقيقة أن جغرافية البنية التحتية في الاقتصاد الخالي من الكربون قد تكون مغايرة تماماً عما هي عليه اليوم. فبالنسبة للعرض، على سبيل المثال، من المحتمل أن يتم إنتاج الهيدروجين المتجدد في مواقع مختلفة عن حقول النفط والغاز الحالية (موتيت وآخرون، 2021). وعلى العكس من ذلك، فإن اعتماد النظم الكهربائية في الاستخدامات النهائية سيغير شكل الطلب من حيث الحجم والنطاق. وأي قرار استثماري جديد يُتخذ فهو طويل الأمد، لذا يجب تقييم البنية التحتية لخطوط الأنابيب الحالية بما يلائم احتياجات المستقبل. على سبيل المثال، يجب أن تكون أي بنية تحتية للأنابيب الغاز يتم بناؤها اليوم قابلة للاستخدام في أغراض أخرى كنقل الغازات النظيفة، مثل الهيدروجين والميثان الحيوي. وتترافق عملية إعادة التخصيص هذه مع تحديات تقنية وتكاليف اقتصادية يجب أخذها بعين الاعتبار عند التخطيط للاستثمارات.

الشكل 4.3 الخريطة العالمية للأنابيب نقل الغاز الطبيعي



المصدر: شبكة "غرين إنفو" و "غلوبال إنبرجي مونيتور" (2021)

المصدر: ناتشرال إيرث ، 2021

إخلاء مسؤولية: هذه الخريطة ماثحة للأغراض توضيحية فقط. والحدود الموضحة في الشكل لا تعني أي تأييد أو قبول من الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (إيرينا)

تقدم تجارة الهيدروجين فرصاً لبناء علاقات تعاون على الصعيدين الإقليمي والعالمي. ويمكن تعزيز تجارة الهيدروجين الإقليمية، على سبيل المثال، بين أوروبا وشمال أفريقيا (فان ويجيك ووترز، 2021)، وبين أستراليا ومنطقة المحيطين الهندي والهادئ (يوين، 2021) أو بين دول القارة الأفريقية (الشكل 4.4).

ويمكن للهيدروجين أيضاً أن يرسم ملامح الروابط التجارية البحرية في المستقبل. كما أن بعض الشركات والحكومات باشرت في التخطيط لبناء سلاسل قيمة دولية وطرق للشحن البحري. وجرّت أول شحنة هيدروجين عبر المحيطات في العالم في ديسمبر 2019، حيث أبحرت ناقلة هيدروجين تم إنتاجها في بروناي وتحويلها إلى حلقي الهكسان للميثيل إلى ميناء مدينة كاواساكي الياباني. وفي الشهر ذاته، أطلقت شركة كاواساكي اليابانية للصناعات الثقيلة ناقلة Suiso Frontier، وهي أول ناقلة للهيدروجين في العالم، لإجراء شحنات تجريبية من الهيدروجين المسال من أستراليا إلى اليابان. وفي سبتمبر 2020، شقت أول شحنة "أمونيا زرقاء" طريقها من السعودية إلى اليابان، حيث تم استخدامها في توليد الطاقة.²⁷ وتشير هذه التجارب والمشاريع إلى بداية عصر جديد في تجارة الطاقة.

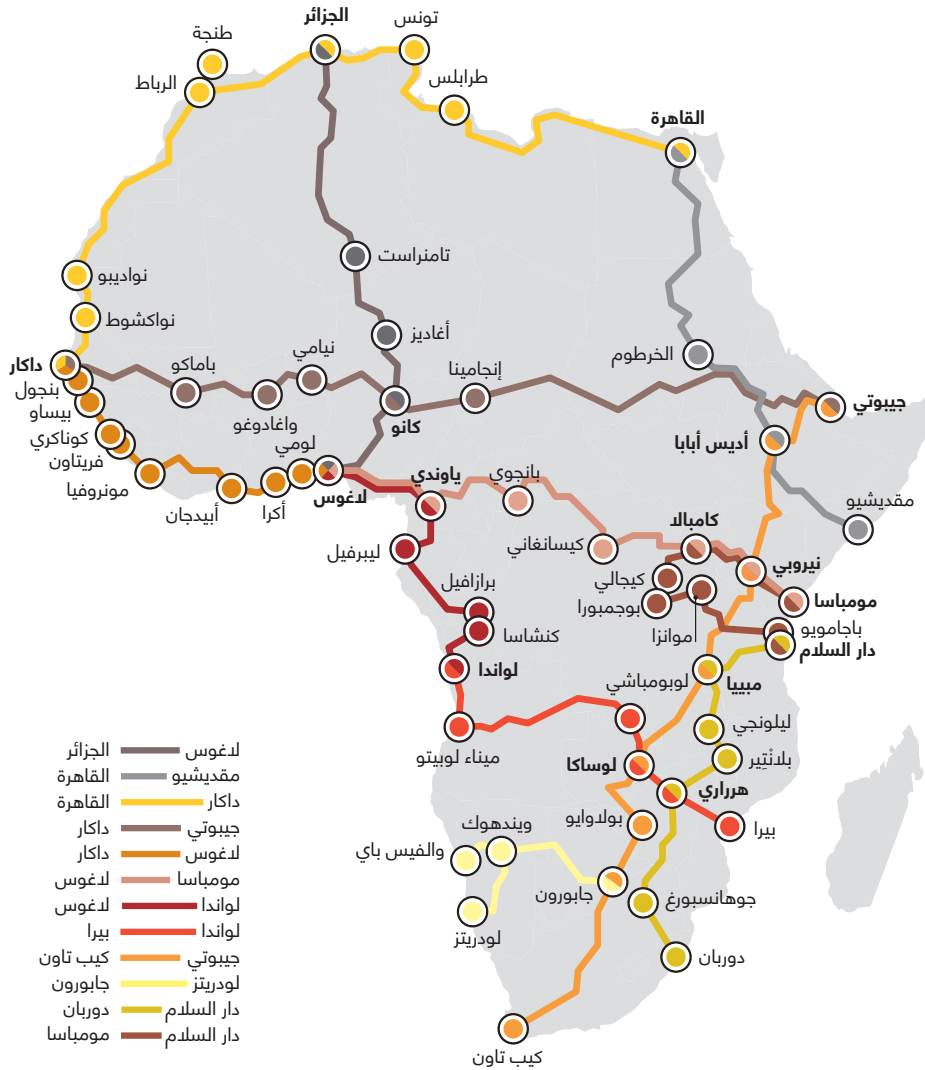
4.2 إرساء قواعد اللعبة

لن يغير الهيدروجين البنية التحتية للطاقة والتدفقات التجارية وحسب، وإنما سيتطلب قواعد ومعاييراً وحوكمة جديدةً (جرينشجل وبيبي وويستفال، 2021). ويمكن أن يشكل إعداد المعايير ساحةً للمنافسة الجيوسياسية أو التعاون الدولي. ورغم أن تحديد القواعد المشتركة يبدو نشاطاً تقنياً في الأساس، إلا أنه سوف يساعد في تحديد التقنيات التي تسيطر على السوق مستقبلاً، ويكافئ من يتقنها. وتهدف المعايير إلى تحسين جودة وسلامة وإمكانية التشغيل البيئي لمختلف السلع والخدمات. وقد يؤدي تبني المعايير إلى تجزئة السوق، وإثارة المنافسة على الصعيد التنظيمي، عدا عن نشوء حواجز تجارية (آيرينا 2020ب، آيرينا 2021ب).

وفي حال تضمين الهيدروجين ضمن أجندة العمل المناخي، فمن الضروري معرفة بصمته الكربونية وتأثيره على الاستدامة. ويحتاج الاعتماد تحقيق معايير مناسبة من الموثوقية والشفافية والتدقيق المستقل، ويمكن تحقيق ذلك عبر شهادات أو "ضمانات المنشأ". وفي حين ظهرت خطط متعددة في هذا الخصوص في مناطق مختلفة²⁸، لكن لم يتم بعد وضع معيار عالمي موحد. إضافةً إلى أن الخطط تختلف بشكل كبير من حيث تعريف الاستدامة وتحديد حدود الانبعاثات على طول سلسلة التوريد (آباد ودودز، 2020). لذا، سيكون التعاون الدولي أساسياً في هذا المجال لضمان الاتساق في المصطلحات والبيانات من أجل أن يكون التحويل بين خطط إصدار الشهادات شفافاً ومنسقاً.

27 نظراً لاستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون المحتجز لإنتاج الميثانول ولتحسين استخراج النفط، فإن البصمة الكربونية لشحنة الهيدروجين كانت كبيرة.
28 يشمل ذلك CertifHy في الاتحاد الأوروبي، والمشاريع التجريبية في أستراليا، والتطورات على صعيد المنهجيات دولياً؛ بدءاً من الشراكة الدولية للهيدروجين وخليها الوقود في الاقتصاد، وغيرها (آيرينا، 2020).

الشكل 4.4 طرق الهيدروجين المحتملة عبر أفريقيا على طول الطرق السريعة الحالية والمستقبلية العابرة للقارة.



المصدر: الشراكة الأفريقية للهيدروجين (2019).

مصدر الخريطة: ناتشرال إيثر، 2021

إخلاء مسؤولية: هذه الخريطة متاحة لأغراض توضيحية فقط. والحدود الموضحة في الشكل لا تعني أي تأييد أو قبول من الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (آيرينا)

وتظهر الدوافع الجيوسياسية بشكل واضح في هذه المناقشات. إذ تسعى البلدان إلى وضع معايير تحافظ على مزاياها التنافسية. على سبيل المثال، فإن خطط شهادات اعتماد الهيدروجين التي لا تغطي سوى الانبعاثات المتولدة أثناء الإنتاج ستستبعد الانبعاثات التي تنشأ أثناء النقل، ومن المرجح أن يفضلها المنتجون الموجودون في مواقع بعيدة عن الأسواق الاستهلاكية (وايت وآخرون، 2021). وبالمثل، فإن البلدان التي تمتلك احتياطات كبيرة من الغاز الطبيعي وأنظمة نقل قد تكون أكثر تساهلاً تجاه عتبات انبعاثات غازات الدفيئة التي تفضل مسار الإنتاج الأزرق أو التي تركز على انبعاثات الكربون فقط دون الميثان. وحتى في حال تضمين انبعاثات الميثان، يمكن للبلدان أن تؤثر على المنهجية أو القيم المستخدمة في قياسها. على سبيل المثال، يمكن لمنتجي الغاز أن يبلغوا بأنفسهم عن انبعاثات الميثان الصادرة عن إنتاجهم، مما قد يؤدي إلى نقص أو عدم كفاءة التقارير المقدمة (بيريا وآخرون، 2021).

وتعتبر فئة العملة وآلية تسعير الهيدروجين المتداول دولياً من الجوانب المهمة أيضاً. فهناك العديد من إشارات الاستفهام التي تحيط بطبيعة تحديد الأسعار في تجارة الهيدروجين الدولية (مثل مراكز هذه التجارة، والمعايير، وآليات التسعير) ونوع العقود (طويلة الأجل، استلم أو ادفع، أو نموذج مختلف).²⁹ وتكمن أهمية العملة المستخدمة في المؤشرات العالمية في كونها قد ترجح كفة الطرف في التفاوض على صفقات تتجاوز الهيدروجين. وستشكل العملة المختارة معياراً عالمياً أثناء توسع السوق. كما أن اختيار العملة سيحد من التعرض إلى تكاليف الاستيراد بعيداً عن أزواج معينة من العملات. على سبيل المثال، يسعى الاتحاد الأوروبي، الذي سيصبح في الغالب من أبرز المستوردين، إلى دفع قيمة وارداته المستقبلية من الهيدروجين باليورو (المفوضية الأوروبية، 2020). وتؤمن المفوضية الأوروبية أن مثل هذه الخطوة ستجعل الاتحاد أقل عرضة لتأثر "تطبيق العقوبات أحادية الجانب من قبل دول ثالثة خارج أراضيها" (المفوضية الأوروبية، 2021).

علوّة على ذلك، قد يكون تحديد سعر للكربون أمراً مفيداً، أو حتى ضرورياً، ليتمكن الهيدروجين الأخضر من منافسة بديله الرمادي، والوقود الأحفوري لاحقاً. وعليه، قد يتورط الهيدروجين في حروب أوسع من تلك التي تشهدها تجارة الكربون. ومن الممكن أن تصبح اللوائح التنظيمية القوية التي تحكم تسرب الميثان في مناطق التنقيب والإنتاج مصدراً للخلاف بين منتجي الهيدروجين الأزرق والمناطق المستوردة التي تبحث عن الهيدروجين النظيف. كما أن آليات تعديل حدود الكربون، مثل التلية المقترحة من قبل الاتحاد الأوروبي، قد تسبب خلافات دولية، لأنها قد تضر بالصناعات كثيفة الكربون المرتبطة بالتجارة في الدول غير الأعضاء في الاتحاد الأوروبي.³⁰

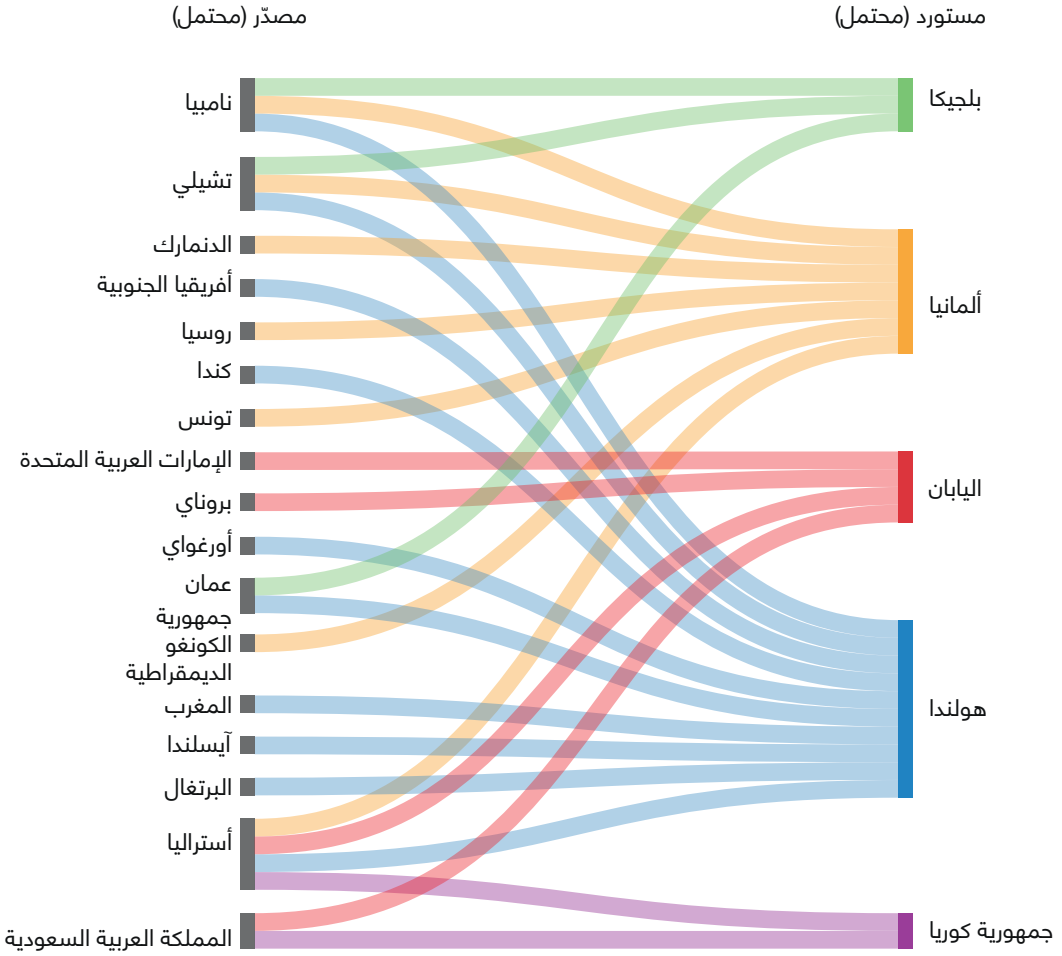
4.3 دبلوماسية الهيدروجين

على غرار ما حدث في بدايات صناعة الغاز الطبيعي المسال، تعمل العديد من الحكومات على إبرام صفقات واتفاقيات ثنائية لبناء وتشغيل البنية التحتية اللازمة لتسهيل تجارة الهيدروجين العابرة للحدود. وتتراوح هذه الصفقات بين دراسات الجدوى، وخطابات النوايا، إلى مذكرات التفاهم، وشراكات الطاقة، وحتى الشحنات التجريبية. وأشارت العديد من البلدان، منها كندا، وتشيلي، وألمانيا، وإيطاليا، واليابان، وإسبانيا إلى العلاقات الثنائية المحتملة في تجارة الهيدروجين ضمن استراتيجياتها الوطنية. وبمرور الوقت، يمكن لهذه الصفقات والرؤى أن تفسح الطريق لعلاقات تجارية وخطوط شحن بحري وطرق تجارية جديدة في مجال الطاقة (الشكل 4.5).

29 وضعت شركة ستاندر آند بورز لجوالب بلينتس أسعاراً معيارية للهيدروجين القائم على التحليل الكهربائي والغاز (بدون احتجاز وتخزين الكربون) في ستة بلدان مختلفة. وحتى الآن، سيطر اليورو والدولار الأمريكي على تلك الأسعار المعيارية (شركة ستاندر آند بورز، n.d.). وعادة ما تتبع الخطوة الأولى في تأسيس أي سوق بإبرام اتفاقيات ثنائية أو أسواق إقليمية قبل ظهور سوق أوسع يتمتع ببسولة أكبر (دن أودن، 2020). وكذلك، تخطط بورصة الطاقة الأوروبية لإطلاق مؤشر أسعار لتداول الغاز والطاقة في 2022، والذي سيعكس السوق خارج البورصة والتجارة الثنائية التي تحكمها اتفاقيات الاستيراد والتصدير (رويتزر، 2021). وسيكون هذا المؤشر مقوفاً باليورو.

30 يغطي الاقتراح المبدئي من الاتحاد الأوروبي واردات الألومينا والكهرباء، لكن ليس الهيدروجين <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0564>

الشكل 4.5 اتفاقيات التجارة الثنائية ومذكرات التفاهم لعدد من الدول، والتي أُعلن عنها اعتباراً من نوفمبر 2021



ملاحظة: يغطي الشكل الاتفاقيات المتعلقة بتجارة الهيدروجين فقط، وهو مبني على الإعلانات العامة وليس شاملاً. الاتفاقيات الخاصة وتلك التي تركز على التعاون التكنولوجي غير مشمولة.

تشمل بعض صفقات الهيدروجين الثنائية الناشئة هذه بلداناً لديها بالفعل علاقات تجارية قائمة في مجال الطاقة. فمثلاً، تستورد اليابان النفط الخام من المملكة العربية السعودية، ويبحث البلدان حالياً توسيع علاقتهما التجارية إلى الأُمونيا الزرقاء. ومع ذلك، فإن الصفقات الثنائية الأخرى لا تتوافق مع التدفقات الحالية لتجارة الطاقة. وهذا هو الحال في الصفقات والمبادرات الثنائية، على سبيل المثال، بين ألمانيا والمغرب، ونامبيا وهولندا، ونيوزيلندا وجمهورية كوريا، ودول أخرى. ويبقى أن نرى إن كانت كل طرق تجارة الهيدروجين هذه ستتحقق على أرض الواقع، أم سترتسم خرائط جديدة كلياً لجيوسياسية الطاقة.

وقد بدأت بعض البلدان التي تتوقع استيراد الهيدروجين وكل ما يتعلق به من وقود خالي من الكربون بالفعل في بناء علاقات دبلوماسية في مجال الهيدروجين (البطار 4.2). وتعتبر كل من ألمانيا واليابان من رواد إقامة علاقات تجارية جديدة في هذا المجال، مع وجود دول أخرى تسير على خطاهما. وقد تصبح دبلوماسية الهيدروجين عنصراً أساسياً في العلاقات الدبلوماسية الاقتصادية بين بعض البلدان.

4.4 التحولات في العلاقات السياسية

تشابك العلاقات التجارية والاستثمارية بين الدول مع اعتبارات سياسية أوسع. وبحكم أن التغيرات في العلاقات الاقتصادية قد تؤثر على الروابط السياسية (والعكس صحيح)، فإن ظهور أسواق للهيدروجين وغيره من أنواع الوقود النظيف يمكن أن يحدث تحولات في العلاقات السياسية والتحالفات بين البلدان.

وكان للجيولوجيا دور كبير في تشكيل العلاقات التجارية في أسواق الغاز والنفط: إذ تتركز احتياطات الكربون في عدد محدود من البلدان، بينما يعيش 80% من سكان العالم في بلدان تعتمد كلياً على استيراد الوقود الأحفوري (آيرينا، 2019). وعلى النقيض من ذلك، يمتلك كل بلد موارد طاقة متجددة، على الرغم من اختلاف قوة الرياح ونوعية الإشعاع الشمسي في جميع أنحاء العالم، كما تعتبر موارد الطاقة المتجددة الأخرى مثل الطاقة الكهرومائية أو الطاقة الحرارية الأرضية أكثر انتشاراً في بعض المواقع. ونظراً لانتشار الطاقة المتجددة في كل مكان، فقد تتمكن البلدان مستقبلاً من اختيار الشركاء التجاريين الأنسب لها في أسواق الوقود النظيف (غريم وويست فال، 2021). ومع ذلك، تتوقف قدرة البلدان على استغلال إمكاناتها من الطاقة المتجددة لإنتاج الطاقة على قدراتها الصناعية وعلى الملكية الفكرية التي يقوم عليها الابتكار في قطاع الطاقة المتجددة.



©nd3000/istockphoto.com



©ake1150sb/istockphoto.com

البطار 4.2 ظهور دبلوماسية الهيدروجين

تسعى العديد من الدول إلى اتباع السبل الدبلوماسية لتحسين استراتيجياتها الخاصة بالهيدروجين.

فقد أبرمت **ألمانيا** صفقات هيدروجين ثنائية مع مجموعة واسعة من البلدان الموردة المحتملة، مثل أستراليا، وتشيلي، والمغرب، ونامبيا، وتونس، وأوكرانيا. كما تأسس وزارة الخارجية الألمانية الاتحادية مكاتباً مخصصة لدبلوماسية الهيدروجين ترتبط بسفاراتها في لواندا (أنغولا)، وأبوجا (نيجيريا)، وموسكو (روسيا)، والرياض (السعودية)، وكيف (أوكرانيا). وتهدف ألمانيا عبر هذه المكاتب الجديدة إلى دعم الحوار الدولي حول الآثار الجيوسياسية لسوق الهيدروجين العالمي. كما خصصت ألمانيا نحو 1 مليار يورو لمؤسسة H2Global، وهي هيئة أسسها 16 لاعباً رئيسياً في الصناعة الألمانية لتحقيق قفزة سريعة في سوق الهيدروجين الأخضر ومشتقاته. وتم تكليف H2Global بشراء الهيدروجين الأخضر أو مشتقات الهيدروجين في الخارج وإعادة بيع هذه المنتجات في مزادات سنوية. وسيتم استخدام عوائد هذه المزادات لتعويض الفرق بين سعر شراء مشتقات الهيدروجين وسعر بيعها المحلي.³¹

ويبحث الدبلوماسيون وأصحاب المصلحة الصناعية في **اليابان** مع كل من أستراليا، وبروناي، والنرويج، والسعودية ودول أخرى إمكانية إنشاء سلاسل قيمة لتجارة الهيدروجين. وتهدف استراتيجية اليابان الخاصة بالهيدروجين إلى تأمين تدفقات جديدة من واردات الوقود الأخضر لتنافس الغاز الطبيعي المسال في توليد الطاقة والبنزين في النقل. كما تهدف اليابان أيضاً إلى بيع تقنياتها ومعارفها حول العالم (ناغاشيما، 2018).

وتتبع بلدان أخرى خطى اليابان، حيث كانت **هولندا** أول دولة تعين مبعوثاً خاصاً للهيدروجين (2019-2021). وتركز الحكومة الهولندية على تشيلي، ونامبيا، والبرتغال، والأوروغواي، وغيرها، كموردين محتملين. كما أبرمت **جمهورية كوريا** اتفاقيتين مع السعودية ونيوزيلندا في هذا المجال. ويتطاع للاعبين الصناعيين في **بلجيكا** إلى تشيلي ونامبيا وعمان للحصول على واردات ضخمة من الهيدروجين، بينما تدرس **سنغافورة** جدوى استيراد الهيدروجين من أمريكا اللاتينية. وتعتبر هذه الصفقات الثنائية الناشئة جزءاً من سباق عالمي على أفضل المواقع لإنتاج الهيدروجين (رادويتز، 2021).

وتنطوي دبلوماسية الهيدروجين على اتجاه آخر أيضاً، حيث يبحث المصدرون عن عملاء محتملين. وتشير استراتيجية **تشيلي** الوطنية للهيدروجين، على سبيل المثال، إلى أنها ستنتشر "دبلوماسية الهيدروجين الأخضر" لتصبح مصدراً دولياً للوقود النظيف وناقلة للطاقة. كما تنوّه إلى أنها ستستفيد من حضورها في المنابر الدولية و "علاقاتها الدبلوماسية مع 171 دولة" لإطلاق إمكاناتها في تصدير الهيدروجين وجذب الاستثمار الأجنبي (وزارة الطاقة التشيلية، 2020)، (التشيلية، 2020). واستضافت الدولة قمة الهيدروجين الأخضر في عام 2020 (وزارة الطاقة التشيلية، 2020)، وقد اتبعت عمان نفس النهج في عام 2021، وهي مُصدّر محتمل آخر.³²

31 تتطابق الآلية القائمة على المزايا مع العرض والطلب من خلال توفير وسيط، وهو شركة الهيدروجين الوسيطة التي تبرم عقود شراء طويلة الأجل على جانب العرض وعقود شراء قصيرة الأجل على جانب الطلب. وستقدم الحكومة الاتحادية تمويلاً لسد فجوة التكلفة. وتوفر H2Global للمشغلين والمستثمرين التخطيط والأمن الاستثماري اللازمين لتطوير قدرات كبيرة في مجال التحليل الكهربائي، حيث يمكنهم بناء نموذجهم التجاري والتمويلي على أساس اتفاقيات شراء طويلة الأجل مع شريك تعاقد قادر على تأمين السيولة بأسعار تعكس التكلفة. (الوزارة الاتحادية للاقتصاد والتكنولوجيا، 2021) www.greenhydrogensummitoman.com/index.php 32

وتتركز هذه القدرات نسبياً في عدد قليل من الدول. وتعتمد معظم الدول على واردات الألواح الكهروضوئية وتوربينات الرياح والمعدات الأخرى المستوردة من مجموعة بلدان صغيرة نسبياً. وهذا ما يفسر تشكل نسبة كبيرة من العلاقات التجارية بمجال الطاقة المتجددة في ضوء السياسات الصناعية الوطنية. علاوة على ذلك، تقوم الاستراتيجيات المؤسسية على اختيار دول محددة لجعلها مراكز توريد إقليمية أو عالمية.

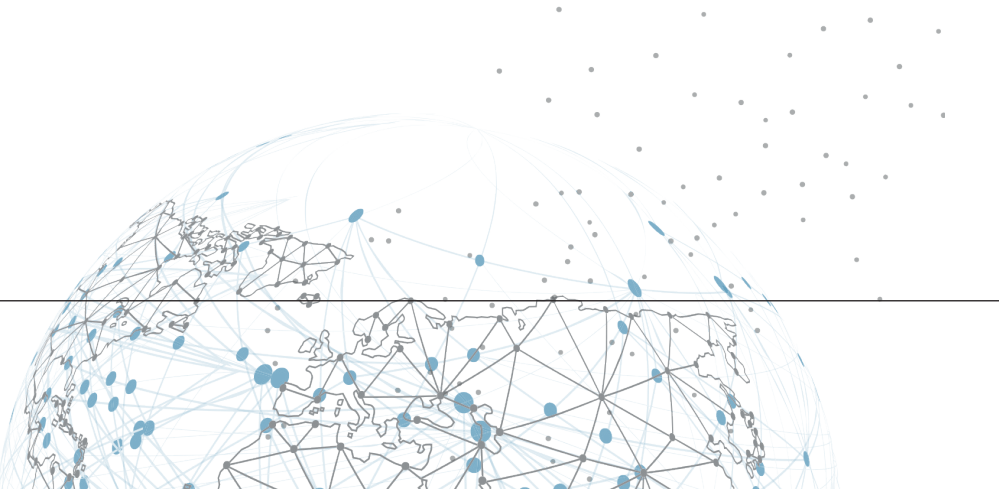
كما أنه من المحتمل أن تتمخض تدفقات تجارة الهيدروجين عن اعتبارات استراتيجية جديدة. وستزداد الأهمية الاستراتيجية للدول المصدرة مع توجه العديد من الدول والمناطق إلى استيراد الهيدروجين بكميات كبيرة. كما ستساهم مراكز إنتاج الهيدروجين ومسارات الشحن البحري في دعم التخطيط الاستراتيجي للمؤسسات الأمنية والدفاعية.

وستبرز مجموعة من الفرص لصياغة سوق الهيدروجين الناشئ من أجل دفع عجلة التنمية المستدامة. فعلى سبيل المثال، تعاونت ألمانيا مؤخراً مع العديد من الدول الأفريقية لاستشكاف وتطوير اقتصاد قائم على الهيدروجين يستفيد من إمكانات موارد القارة لدعم مسيرة التنمية الاقتصادية المستدامة (H2Atlas، 2021).

ومن بين بلدان العالم العديدة التي تتمتع بالشروط المناسبة لإنتاج الهيدروجين النظيف والرخيص، يمكن للمستوردين المحتملين أن يختاروا الدول التي تربطهم بها علاقات قوية أصلاً. كما يمكنهم أن يختاروا استغلال حاجتهم للهيدروجين النظيف من أجل بناء تحالفات جديدة. وستواصل الجغرافيا لعب دور مهم في تصدير الهيدروجين، نظراً لعدم قدرة بعض الدول على إنتاج الهيدروجين منخفض التكلفة المعد للتصدير؛ ولاحتمال بقاء تكاليف النقل لمسافات طويلة باهظة. وفي حين أن بعض الدول تفتقر ببساطة لتوافر الموارد اللازمة (إمكانات الطاقة المتجددة، والمساحة، والأرض، وتوافر المياه، وما إلى ذلك)، تعاني دول أخرى من بعدها الجغرافي عن مراكز الطلب الرئيسية.

وفي هذا السياق، يمكن أن يؤدي دعم تطوير صناعات الهيدروجين في البلدان النامية ذات الإمكانات الوفيرة إلى تحقيق عدة أهداف. ونظراً لتفاوت قدرة الدول على تحسين إمكانات الطاقة المتجددة لديها على نطاق واسع وتنافسي، والوصول إلى التكنولوجيا التي تبقى مركزة في أماكن محددة، فإن إرساء علاقات تجارية في مجال الهيدروجين يمكن أن يساهم في تعزيز فرص التعاون للوصول إلى التكنولوجيا والمعرفة ورأس المال. ويمكن لهذا أن يفتح آفاق شراكة جديدة لإنشاء سلاسل القيمة المحلية، وحفز الصناعات، وتوفير فرص العمل في الدول الغنية بالطاقة المتجددة. وبالتالي، يمكن للهيدروجين النظيف أن يكون أيضاً سبيلاً لتحقيق قدر أكبر من المساواة.

ولعل الاهتمام المتزايد بالهيدروجين النظيف يعزز حالياً من فرصة إقامة شراكات وشبكات دولية. وبدأت التحالفات الجديدة تظهر مؤخراً في جميع أنحاء العالم على شكل شراكات متعددة الأطراف، وتحالفات صناعية (غوش وشبرا، 2021). وعلى المدى البعيد، ستتغير الشراكات الأمنية مع تغير تدفقات تجارة الطاقة. وقد تكون الطريقة التي سهّلت بها طفرة النفط الصخري في الولايات المتحدة فصل البلاد جزئياً عن منطقة الشرق الأوسط سبباً لبعض التغييرات التي ستعقب النهوض بقطاع إنتاج الهيدروجين النظيف. وعلى سبيل المثال، قد تتضاءل أهمية طرق نقل النفط الرئيسية مثل مضيق هرمز بالنسبة لأمن الطاقة العالمي، حتى ولو بقي ارتباطها بنقل الهيدروجين النظيف والأمنيا وأنواع الوقود الأخرى القادمة من منطقة الخليج الفارسي والشرق الأوسط عموماً.





4.5 تعزيز أمن الطاقة

لطالما اعتبر الهيدروجين علاجاً محتملاً للمخاوف المتعلقة بأمن الطاقة. وقد بدأ الاهتمام به عقب الصدمات المتعلقة بارتفاع أسعار النفط في سبعينيات القرن الماضي، وبلغها الذروة في بداية عقد الـ 2000. ونجح الهيدروجين النظيف في تعزيز أمن الطاقة بثلاث طرق رئيسية: (1) التقليل من الاعتماد على الواردات؛ و(2) الحد من تقلب الأسعار؛ و(3) تعزيز مرونة منظومة الطاقة. وترتبط معظم هذه المزايا بالهيدروجين الأخضر وليس الأزرق، علماً أن العديد منها مرتبط بتحسين السوق.

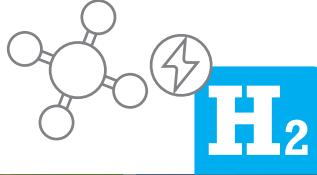
ولا يقتصر أمن الطاقة على الوفرة ومعقولية التكلفة لضمان مبدئي الاستدامة والإنصاف في آن معاً. فعلى سبيل المثال، قد تساهم خطط استيراد الهيدروجين المتجدد من الدول التي يفتقر جزء كبير من سكانها إلى إمدادات الكهرباء أو التي لا تزال شبكتها تعتمد بشكل كبير على الوقود الأحفوري، في تعزيز أمن الطاقة لدى المستوردين، ولكن مع ذلك لا يمكننا تسمية هذا النوع من الهيدروجين بـ "الأخضر" أو "المستدام". وسيناقش الفصل الخامس بشكل معمق الأبعاد المستدامة للهيدروجين.

كما يجب النظر إلى أمن الطاقة في سياق التأثيرات المادية لتغير المناخ. وهذه مسألة هامة بلا شك، حيث يتزايد تأثير البنية التحتية لقطاع الطاقة بتغير المناخ. وتشير التقديرات إلى أن نصف مصانع الغاز الطبيعي المسال، على سبيل المثال، معرضة لمخاطر الأعاصير المدمرة بنسبة عالية جداً، في حين أن حوالي 35% من معامل التكرير تقع في المناطق شديدة الخطورة، حيث يتوزع العديد من مصانع الغاز الطبيعي المسال ومعامل التكرير حول العالم على المناطق الساحلية، مما يجعلها معرضة بشدة لمخاطر العواصف العنيفة والفيضانات الساحلية (وكالة الطاقة الدولية، 2021 ح). وفي حين أن الهيدروجين قادر على تعزيز تنوع مصادر الوقود ومرونة منظومة الطاقة؛ فإن منشآت إنتاج الهيدروجين لا سيما تلك الموجودة في المناطق الساحلية المنخفضة، قد تتعرض بدورها لتأثيرات تغير المناخ بما في ذلك العواصف والفيضانات والجفاف.

تقليل الاعتماد على الواردات

يمكن أن يساهم الهيدروجين بتقليل الاعتماد على استيراد الطاقة عبر استبدال الموارد المستوردة بتلك المحلية. وفي حال إنتاج الهيدروجين عبر استثمار كل من المصادر المحلية لطاقة الرياح أو الشمس أو الماء أو الكتلة الحيوية أو الحرارة الجوفية، سيتم تعزيز أمن الطاقة إلى حد الاستغناء عن الوقود المستورد. وهذا قد يساعد في فصل استهلاك الطاقة المحلي عن تقلبات السوق العالمي وانخفاض فواتير استيراد الطاقة الوطنية (ستينبرجر - ويلكنس وآخرون، 2017). ويتوقع سيناريو الوكالة الدولية للطاقة المتجددة لوقف ارتفاع درجات الحرارة عند 1.5 درجة مئوية، استخدام ثلثي إنتاج الهيدروجين الأخضر في عام 2050 محلياً دون تصديره إلى الخارج (آيرينا، يصدر قريباً - أ).

ويساهم استخدام الغاز الطبيعي كمواد الخام لإنتاج الهيدروجين في تعزيز أو حتى زيادة واردات الغاز الطبيعي. وقد ينتهي الأمر بالدول غير المنتجة، التي تقرر إنتاج الهيدروجين من الغاز الطبيعي، باستيراد نفس الكمية التي كانت تستوردها سابقاً من الغاز الطبيعي عبر خطوط الأنابيب أو محطات الغاز الطبيعي المسال.³³ ويمكن لمصدري الغاز بلا شك التحول إلى تصدير الهيدروجين الأزرق مباشرةً. ومن وجهة نظر الدول المستوردة، لا يمكن لأي من هذه الطرق أن تحدث تغييرات جذرية في معادلة أمن الطاقة. ويمكن الدبقاء على تبعيات الاستيراد الحالية أو زيادتها، في حال مواصلة الاعتماد على السلع المعرضة للتقلبات الجيوسياسية وتقلبات السوق.



33 قد يساهم أيضاً استخدام الغاز الطبيعي المستورد لإنتاج الهيدروجين في تدفق التجارة العكسي بمجال ثاني أكسيد الكربون، والذي قد يتطلب إعادة شحنه لتخزينه في حقول الغاز (أو النفط) المستنفد، الأمر الذي يزيد من تعقيد سلسلة القيمة. انظر، على سبيل المثال، مشروع غاز البترول المسال مقابل ثاني أكسيد الكربون القائم بين المملكة العربية السعودية وجمهورية كوريا؛ أو مشروع "H2morrow" الذي تشارك فيه شركة الطاقة النرويجية "إكوينور" Equinor، وأكبر مشغل للأنابيب الغاز في ألمانيا "أوبن غريد يوروب"، ومجموعة "نيسكروب" الألمانية المنتجة للصلب (راتكليف، كيم وبارك، 2021؛ "أوبن غريد يوروب"، 2021).

الحد من تقلب الأسعار

يساعد الهيدروجين المتجدد في حماية كبرى الشركات الصناعية من مخاطر تقلب أسعار الوقود الأحفوري؛ حيث تتسم أسواق الوقود الأحفوري بتقلب ملحوظ، ويمكن للأسعار أن تشهد تأرجحاً حاداً بين الجين والتأخر. وقد تجلت هذه المخاطر بوضوح في خريف وشتاء 2021، عندما سجلت أسعار الغاز (والكهرباء بنسبة أقل) ارتفاعاً قياسيًّا في أسواق مختلفة عبر العالم، مما دفع الصناعات كثيفة استهلاك للطاقة، مثل تصنيع الأسمدة، لتقليص إنتاجها مؤقتاً (بولسون ودوريسين، 2021).

وبالعكس، تتزايد نسبة شراء الطاقة الكهربائية المتجددة عبر اتفاقيات شراء الطاقة طويلة الأمد مع تحديد الأسعار بشكل تنافسي من خلال المزادات. ويمكن أن يقرر مقدمو العطاءات، بناءً على استراتيجيتهم، تحمل مخاطر تقلبات أسواق السلع الأساسية من خلال تأخير توقيع اتفاقيات الشراء مع موردي العناصر والمعدات، أو نقل هذه المخاطر إلى الموردين عبر توقيع الاتفاقيات أثناء المزاد العلني. وحتى الآن، لطالما كانت نسبة تخفيض التكلفة بسبب تأثيرات منحى التعلم، وتحسين التكنولوجيا والعمليات، ووفورات الحجم، أعلى بكثير من نسبة تقلبات أسعار السلع الأساسية. وعليه، عادة ما يوفر مقدمو العطاءات عروضهم مع احتمال انخفاض التكاليف وارتفاع هوامش الربح، مما يشير أيضاً إلى قدرتهم على تحمل هذه المخاطر.³⁴ الأمر الذي يجعل من اتفاقيات شراء الطاقة خياراً مغرباً للحد من التأثير بتقلب أسعار الوقود ليس فقط نتيجة تقلب أسعار السلع وإنما أيضاً نتيجة الصراعات والحوادث وغيرها. وبالتالي، يمكن أن يؤدي تعزيز مزيج الوقود باستخدام الهيدروجين الأخضر إلى استقرار الأسعار بشكل أكبر في عدد من القطاعات، مثل الأسمدة والطيران والشحن البحري.

وعليه، فإن تقلب أسعار الوقود الأحفوري يعزى في جزء منه إلى دورات الاستثمار التي يشهدها القطاع، والتي تؤدي أحياناً إلى عدم التكافؤ بين العرض والطلب. وينطبق الأمر نفسه على إنتاج الهيدروجين الأخضر أو الأمونيا، مع أصولهما الثابتة وكثافة رأس المال العالية. وفي حال عدم كفاية معروض الهيدروجين الأخضر، سيكون هناك فارق زمني في الجهود المبذولة لزيادة الطاقة الإنتاجية.



34 تتميز المزايدات بمرونة التصميم، إذ يمكن تصميمها مع تخصيص المخاطر للاعبين مختلفين في السوق، وفقاً للظروف والأهداف الخاصة بكل بلد.

تعزيز مرونة منظومة الطاقة

يمكن للهيدروجين أيضاً أن يساهم في تعزيز مرونة منظومات الطاقة التي من المتوقع اعتمادها على الكهرباء إلى حد كبير خلال العقود القادمة. ويتعين إجراء تخطيط دقيق لتحديد الطرق المثلى لنشر الهيدروجين. فعلى سبيل المثال، يمكن نشر أجهزة التحليل الكهربائي في المناطق التي تشهد إنتاج كميات كبيرة من الطاقة بالاعتماد على مصادر متجددة متغيرة، وحيث لا يمكن نقل الطاقة الزائدة فيها عبر خطوط الطاقة أو تخزينها في بطاريات (مثل شمال تشيلي أو إنتاج الرياح البحرية في بحر الشمال) (آيرينا، 2021 ب). وفي حين أنّ أهداف التحليل الكهربائي المحلية قد تدعم أهداف أمن الطاقة أو السياسة الصناعية المتبعة، لا تريد الحكومات في الوقت ذاته أن تقلل من أهمية الحد من تغير المناخ، أو صرف التركيز عن الأولويات الأخرى مثل الوصول العالمي إلى الطاقة.

وتكمن الميزة التنافسية الحقيقية للهيدروجين في قدرته الفريدة على تخزين الطاقة لفترات طويلة وبكميات كبيرة. ونظراً لأن الهيدروجين النظيف يحل محل الوقود الأحفوري في بعض الاستخدامات النهائية، قد يصبح تخزين الهيدروجين أمراً بالغ الأهمية بالنسبة لأمن الطاقة، تماماً مثل تخزين الغاز الطبيعي حالياً في بعض المناطق. ومع ذلك، ثمة اختلافات بين آلية تخزين الغاز الطبيعي والهيدروجين، حيث يتم تخزين الغاز الطبيعي غالباً لتلبية التغيرات (الموسمية) في الطلب. أما الطلب على الهيدروجين، فيرجح أن يكون أكثر ثباتاً، على الأقل في السنوات الأولى من رحلة توسيع نطاق سوق الهيدروجين، إذ من المرجح أن يأتي الطلب الأكبر عليه من جانب العملاء الصناعيين (خاصة صناعة الصلب والألمونيوم والمواد الكيميائية عالية القيمة).³⁵

وسيتطلب اللجوء لتخزين الهيدروجين بشكل رئيسي من أجل تلبية عدم استقرار التوريد، وليس الطلب، كون الهيدروجين الأخضر مصنوع من مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة. وقد يكون هذا سبباً لتحديد موقع تخزين الهيدروجين بالقرب من مواقع الإنتاج بدلاً من مواقع الطلب. ولعل تركز كل من الإنتاج والتخزين في الدول المصدرة للهيدروجين قد يثير مخاوف تتعلق بأمن الطاقة في الدول المستوردة التي تفتقر إلى القدرة الاحتياطية لتعويض اضطرابات التوريد المحتملة. ولا شك أن توافر الهيكليات المناسبة تحت الأرض سيحدد بالضبط مكان مواقع التخزين.

وتعتبر كهوف الملح حالياً الخيار الأمثل والأفضل لتخزين الهيدروجين طويل الأمد.³⁶ ويمكن تحويل هذه الكهوف، التي يتم استخدامها اليوم لتخزين الغاز الطبيعي، إلى تخزين الهيدروجين النقي. ولكن باعتبار الهيدروجين يتسم بكثافة طاقة أقل من الغاز الطبيعي، فإنّ مواقع تخزين الغاز الطبيعي المعدلة يمكن أن تحتوي على حوالي 24% فقط من أحجام الطاقة الأصلية ("جمعية البنية التحتية للغاز في أوروبا" GIE و"جايدهاوس"، 2021). بمعنى آخر، نحتاج إلى 4 أضعاف المساحة اللازمة للحفاظ على قدرة تخزين الطاقة الحالية. وعلى الصعيد العالمي، تم تخزين الهيدروجين في 6 كهوف ملحية فقط حتى الآن؛ 3 منها في تيسايد بالمملكة المتحدة و3 في ولاية تكساس الأمريكية. ويتطلب تكثيف التخزين الجيولوجي للهيدروجين التخطيط الدقيق كونه من المحتمل استخدام بعض مواقع التخزين لتخزين الميثان أو الميثان الحيوي أو حتى ثاني أكسيد الكربون أثناء عملية التحول وربما على المدى الطويل.

كما يمكن أن يزيد الهيدروجين من مرونة المجتمعات النائية، بدءاً من القرى الواقعة في أعماق الجبال ووصولاً إلى الجزر البعيدة عن الشواطئ. وتواجه مثل هذه المجتمعات تحديات استثنائية فيما يتعلق بأمن الطاقة، وغالباً ما تعتمد إلى حد كبير على مصادر الوقود الأحفوري الخارجية، في حين أن شبكاتها الكهربائية صغيرة وكثيراً ما تعتمد على مولدات الديزل للحصول على طاقة احتياطية. ومع ذلك، تمتلك مجتمعات الجزر والمناطق النائية عدداً من أفضل موارد الطاقة المتجددة في العالم (آيرينا، 2016 أ)، وهنا أيضاً، يوفر الهيدروجين (المرتبط غالباً بالبطاريات) مصدراً داعماً لعامل المرونة. فعلى سبيل المثال، في الأورخيل الأسكتلندي الصغير لجزر أوركني، يتم تحويل طاقتي الرياح والمد والجزر إلى هيدروجين من خلال جهاز تحليل كهربائي للمياه. ومن ثم يستخدم الهيدروجين لتوفير التدفئة والطاقة للمدارس المحلية ومباني الموانئ والعديد من العبارات والمركبات العاملة بخلايا الوقود (المشروع المشترك لخلايا الوقود الهيدروجينية، n.d.).

35 يمكن أن يضيف استخدام الهيدروجين للتدفئة وتوليد الكهرباء في مواسم الذروة، مقدراً من الموسمية والتنوع لملف الطلب على الهيدروجين، مما يزيد الحاجة إلى التخزين.

36 يمكن تخزين الهيدروجين أيضاً في أشكال جوفية أخرى (مثل مستودعات المياه الجوفية والكهوف الصخرية والنفط المستنفد وحقول الغاز) وكذلك في صهاريج التخزين فوق الأرض أو في خطوط الأنابيب أو السفن (كاجالين وآخرون، 2020).

4.6 المخاطر التجارية ونقاط الضعف

يمكن لاستخدام الهيدروجين كناقل للطاقة أن يؤدي إلى زيادة مخاطر أمن الطاقة، خاصةً فيما يتعلق بالتجارة الدولية للهيدروجين ومشتقاته. ومن المتوقع أن يكون دور الهيدروجين في منظومات الطاقة الخالية من الكربون في عام 2050 أصغر من دور الوقود الأحفوري حالياً. ولذلك، فإن مستوى المخاطر التجارية سيقصر على عدد أقل من القطاعات. وبناقش هذا القسم 3 نقاط ضعف محتملة في سلاسل التوريد العالمية للهيدروجين (ألا وهي: 1) مخاطر الاستثمار في البلاد؛ و2) الخلل الفني والاضطرابات السياسية؛ و3) الوصول إلى مواد الخام الأساسية من أجل التقنيات المتعلقة بالهيدروجين.

مخاطر الاستثمار

إن تأسيس البنية التحتية اللازمة لتجارة الهيدروجين ينطوي على مخاطر تؤثر على جانبي سلسلة التوريد. ونظراً لارتفاع كثافة رأس المال في سلاسل قيمة تجارة الهيدروجين، من المرجح أن يتطلب الحد من مخاطر هذه الاستثمارات تحالفات كبيرة، ومستويات عالية من المشاركة على مستوى الدولة، وتنسيقاً دولياً، وقد يكون تاريخ سوق الغاز الطبيعي المسال مفيداً في هذا السياق، كما يوضح الإطار 4.3.

ويعتبر أمن الإيرادات أمراً بالغ الأهمية بحسب رأي المُصدِّرين. فبدون تدفق مضمون للإيرادات، لا يمكن تعويض النفقات الرأسمالية الأولية التي يتم تكبدها لإقامة مشاريع الهيدروجين. ويجب أن تكون الإيرادات كافية لتغطية تكاليف أجهزة التحليل الكهربائي (في حالة الهيدروجين الأخضر) وعمليات تشكيل الغاز الطبيعي (في حالة الهيدروجين الأزرق) ومجمعات طاقتي الشمس والرياح (في حالة الهيدروجين الأخضر) ومنشآت احتياطي الغاز (في حالة الهيدروجين الأزرق) والبنية التحتية للنقل والتخزين.

وانتشرت خطط مشاريع تصدير الهيدروجين في أستراليا والشرق الأوسط وشمال وجنوب أفريقيا وأمريكا الجنوبية. وتتنبأ خطط هذه المشاريع جميعها بإنتاج ملايين الأطنان من الهيدروجين النظيف ومشتقاته ليتم طرحها في الأسواق العالمية. ولا تتضمن هذه الخطط مستقبلاً زاهراً كون الطلب العالمي على الهيدروجين النظيف مازال في مراحله الأولى، وستواجه عمليات بيعه منافسة شرسة، حيث أن الدول الطامحة لتصدير الهيدروجين أكثر بكثير من تلك التي تخطط لاستيراده.

ويعتبر أمن التوريد أمراً بالغ الأهمية من منظور المشتريين الذين يستعدون للاعتماد على الواردات. فهم بحاجة للشعور بالثقة إزاء البلدان المُصدِّرة للهيدروجين أن لديها قدرات كافية من الطاقة الكهربائية المتجددة المتاحة للتحليل الكهربائي. ويواجه العديد من مُصدِّري الهيدروجين الطموحين حالياً زيادة في الطلب المحلي على الطاقة. إليكم مثلاً منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، وهي منطقة غالباً ما تعتبر مورداً محتملاً للهيدروجين ومشتقاته. ومن المتوقع أن يتضاعف عدد سكانها حتى عام 2050 (الأمم المتحدة، 2019)؛ مما يساهم في تعزيز الطلب على الكهرباء. وهذا يلقي أعباء كبيرة على مصادر الطاقة المتجددة التي من المتوقع أن تلبّي الطلب المتزايد على الكهرباء في الوقت ذاته، وتحل محل وحدات توليد الوقود الأحفوري الحالية وأجهزة التحليل الكهربائي لإنتاج الهيدروجين وطرحه في أسواق التصدير.



إن حالة عدم اليقين في الاستثمار يعرّض أمن الطاقة للخطر. ورغم الإعلان عن العديد من مشاريع تصدير الهيدروجين على مستوى الجيجاواط، لكن هذه المشاريع مهددة بالتأجيل نتيجة عدة عوامل منها عمليات الترخيص. فمثلاً في يونيو 2021، رفضت الحكومة الأسترالية، ولأسباب بيئية، خطة لبناء المحور الآسيوي للطاقة المتجددة، أكبر مشروع لتصدير الطاقة الخضراء في العالم (سميث، 2021).

وعندما ترتفع مخاطر الاستثمار يرتفع معها إجمالي تكاليف المشاريع، لكنها لا تشكل بالضرورة عائقاً في وجه الاستثمار. فإذا ما تبين أن الإيرادات جيدة خلال التنقيب عن النفط والغاز، سيستمر الاستثمار حتى في البلدان ذات المخاطر العالية. وفي مايو 2021، وقعت شركة أسترالية لتطوير أنظمة الطاقة المتجددة مذكرة تفاهم بقيمة 40 مليار دولار أمريكي مع حكومة موريتانيا لبناء أحد أكبر مشاريع إنتاج الهيدروجين الأخضر في العالم (الشكل 4.6). وتم توقيع هذه الاتفاقية رغم حصول موريتانيا على تصنيف "تحذير عالٍ" على "مؤشر الدول الهشة" (صندوق السلام، 2021).

البطار 4.3

تقليل الحجم ومخاطر السعر في تجارة الهيدروجين: دروس من تطوير سوق الغاز الطبيعي المسال.

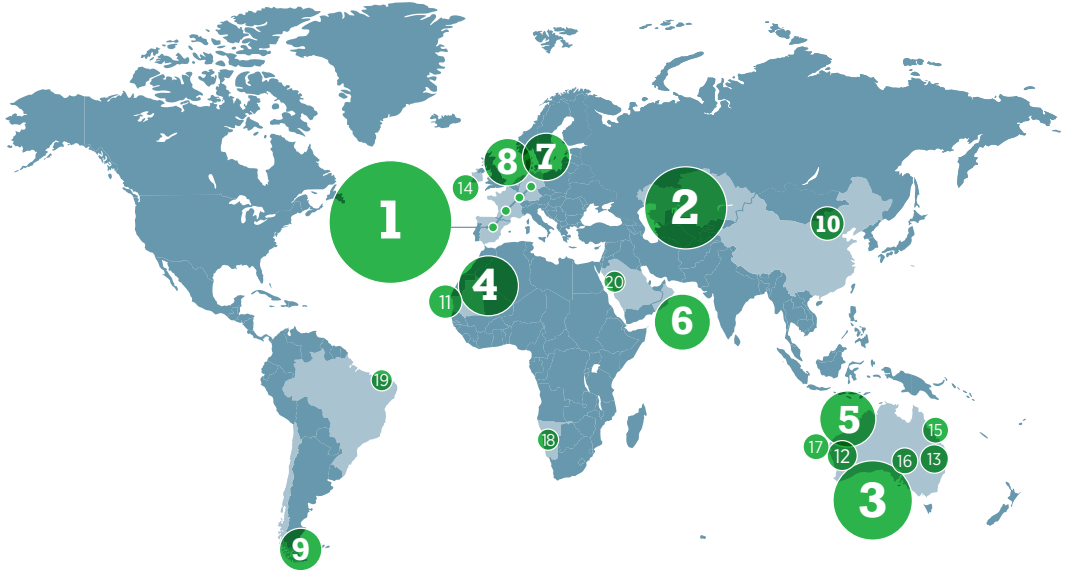
واجهت صناعة الغاز الطبيعي المسال في بداياتها نفس المشكلة التي يواجهها مصدرو الهيدروجين اليوم؛ ألا وهي كيفية الحد من مخاطر الأسعار على المصدرين ومخاطر الحجم على المشترين؟ وقد رست عروض الإمداد الأولى في أسواق الغاز الطبيعي المسال على المتعهدين المضمونين، وذلك وفق عقود ثنائية طويلة الأجل (عشرون عاماً أو أكثر)، والتي تتميز بثلاث خصائص رئيسية (الأمانة العامة لمنظمة معاهدة ميثاق الطاقة، 2007).

أولاً: اشتملت العقود على بنود "الاستلام أو الدفع"، والتي سيدفع المشترون بموجبها أسعار الحد الأدنى من مستويات الغاز الطبيعي سواء كانوا سيحتاجونها أم لا. ثانياً، اعتمدت العقود نظام "قيمة الاستبدال" للتسعير، وبموجبه لا يعتمد سعر الغاز الطبيعي المسال على تكلفة الإنتاج والنقل وهامش الربح وغيرها، وإنما يرتبط بسعر الوقود المنافس (النفط عموماً). ثالثاً، تضمنت العقود "شروط الوجهة"، والتي تمنع المشتري من إعادة بيع الغاز الطبيعي المسال الذي تم شراؤه إلى أطراف ثالثة.

ونتيجة لهذه الشروط، غالباً ما يشار إلى طرق تجارة الغاز الطبيعي المسال الأولى باسم "خطوط الأنابيب العائمة"، وذلك لأنها شهدت ناقلات مخصصة تقوم برحلات ذهاب وإياب لتصدير واستيراد الغاز الطبيعي المسال بين محطات محددة. وسمح هذا الترتيب بتشارك المخاطر؛ حيث أراح مخاوف مشتري الغاز الطبيعي المسال بخصوص أمن الإمدادات، بينما حقق عائد استثمار مقبول لبائعيه. وفي الأعوام الأخيرة، ومع ازدياد استخدام العقود قصيرة الأجل والتداول الفوري، أصبحت تجارة الغاز الطبيعي المسال أكثر سلاسة ومرونة.

ولعبت اليابان دوراً رائداً في تأسيس سوق للغاز الطبيعي المسال المتداول. فمنذ أولى وارداتها من الغاز الطبيعي المسال من ألاسكا في عام 1969، كانت الدولة أكبر مشترٍ للوقود (إلى أن تفوقت عليها الصين في النصف الأول من عام 2021)، كما أنها شكلت هيكلية سوق الغاز الطبيعي المسال. ويعتبر مؤشر الأسعار لما يسمى كوكيتل النفط الخام الياباني في الوقت الراهن عنصراً أساسياً في السوق الآسيوي للغاز الطبيعي المسال، والذي يعد إلى حد بعيد السوق الإقليمي الأكبر لهذا الغاز (كوياما، 2021).

الشكل 4.6 أكبر 20 مشروعاً مُعلنًا للهيدروجين الأخضر على مستوى جيجا في العالم.



1	مشروع هايدريل أمبشن (67 جيجاواط)	أوروبا الغربية
2	بدون اسم (30 جيجاواط)	كازاخستان
3	مركز الطاقة الخضراء الغربي (28 جيجاواط)	أستراليا
4	محطة طاقة الرياح والطاقة الشمسية الهجينة "أمان" (16 جيجاواط)	موريتانيا
5	المركز التسيوي للطاقة المتجددة (14 جيجاواط)	أستراليا
6	مركز عُمان للطاقة الخضراء (14 جيجاواط)	سلطنة عُمان
7	أكوافيتتوس (10 جيجاواط)	ألمانيا
8	2 NORTH (10 جيجاواط)	هولندا
9	اتش تو ماجالانيس 2 H MAGALLANES (8 جيجاواط)	تشيلي
10	بكين جينغنيغ (5 جيجاواط)	الصين
11	مشروع "نور" (5 جيجاواط)	موريتانيا
12	مشروع "هاينبرج زيرو كربون هيدروجين" (4 جيجاواط)	أستراليا
13	مشروع إنتاج الهيدروجين من الطاقة الشمسية في المحيط الهادي (3.6 جيجاواط)	أستراليا
14	جرين مارلين (3.2 جيجاواط)	أيرلندا
15	مركز الهيدروجين في جلادستون (3 جيجاواط)	أستراليا
16	مشروع مولواتانا للهيدروجين المتجدد (3 جيجاواط)	أستراليا
17	مشروع مورشييسون للهيدروجين المتجدد (3 جيجاواط)	أستراليا
18	بدون اسم (3 جيجاواط)	ناميبيا
19	بيس ون (2 جيجاواط)	البرازيل
20	مشروع "هيلوس" للوقود الأخضر (2 جيجاواط)	المملكة العربية السعودية

ملاحظة: الحجم يشير إلى قدرة التحليل الكهربائي. تركز المعلومات إلى الخطط المعلنة. أ حساب قدرة التحليل الكهربائي المقدر تستند إلى مقارنة مع مخططات ذات حجم مماثل. إخلاء مسؤولية: هذه الخريطة متاحة لأغراض توضيحية فقط. والحدود الموضحة في الشكل لا تعني أي تأييد أو قبول من الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (إيرينا). مصدر الخريطة: ناتشورال إيرث ، 2021

ثمة حدود معينة لقدرة المستثمر الأجنبي على تحمّل المخاطر. ومن المستبعد أن تقوم البلدان التي تشهد اضطرابات وتمتلك بعضاً من أفضل الإمكانيات في الهيدروجين ومشتقاته (رام وآخرون، 2020)، باستغلال إمكانياتها هذه في المستقبل القريب، نظراً للمخاطر الكبيرة التي تنطوي عليها ممارسة الأعمال في ظل السياسات الضعيفة لهذه البلدان وظروفها الأمنية الصعبة.

الأعطال التقنية والاضطرابات السياسية

يمكن أن تشهد إمدادات الطاقة اضطرابات بسبب أعطال مختلفة- بما فيها أعطال تقنية (المعدات أو البنية التحتية)؛ أو بشرية (أخطاء أو حوادث أو أذية مفتعلة)؛ أو طبيعية (أعاصير أو زلازل أو فيضانات). وقد ينجم عن مثل هذه الاضطرابات عواقب وخيمة تكون أشدّ خطورة في حالة البنية التحتية للهيدروجين، ذلك لأن الهيدروجين يتمتع بخصائص فريدة تتطلب معالجة خاصة لضمان السلامة.³⁷ ومع ذلك، فإن مخاطر السلامة المرتبطة بالهيدروجين مفهومة جيداً، ويمكن لتطبيق المعايير والبروتوكولات والتدابير الوطنية والدولية أن يحد منها.

وثمة شكل آخر من الاضطرابات يحدث عندما تحاول الدول استغلال تجارة الطاقة والاعتماد المتبادل كأداة إجبار تحقق من خلالها أهدافاً جيواستراتيجية. ويوجد الكثير من الأمثلة عبر التاريخ على تلاعب الدول بتدفقات الطاقة، مثل (مقاطعة التصدير أو حظر الاستيراد)؛ وأسعار الطاقة (تقديم حسومات للحلفاء)؛ أو البنية التحتية للطاقة (بناء خطوط أنابيب نفط وغاز جديدة) وذلك من أجل تحقيق أهداف سياستها الخارجية (شان دي جراف وسوفاكول، 2020). وقد ارتبطت غالبية حالات "التحكم بالطاقة" هذه بالنفط الخام والغاز الطبيعي.

ومن غير المستبعد استخدام صادرات أو واردات الهيدروجين في المستقبل لغايات الضغط والابتزاز السياسي أو الابتزاز عموماً. فوجود عدم تكافؤ هو شرط أساسي لحالة "التحكم بالطاقة"، حيث يكون فيها أحد أطراف العلاقة أكثر عرضةً لتحطيمها من الآخر - فمثلاً يمكنه اللجوء إلى شركاء تجاريين آخرين، أو يمتلك أدوات جيدة لحماية نفسه، مثل مخزون الطوارئ (كوهان ونيي، 2001). ومن المتوقع أن يكون عدد الشركاء في بدايات تشكل تجارة الهيدروجين الدولية محدوداً، كما يرجح أن يكون كل من الموردين والعملاء مقيّدين بعقود ثنائية طويلة الأجل. لذا فإن أي اضطراب في واردات أو صادرات الهيدروجين ستنعكس تبعاته على الجانب الآخر، وذلك بسبب الغياب المحتمل لسوق يتمتع بالسيولة.

وبالرغم من ذلك، من غير المرجح أن تصبح تجارة الهيدروجين احتكارية بيد تكتلات معينة على غرار تحالفات الوقود الأحفوري التاريخية مثل "الأخوات السبع". إذ يتطلب ذلك شروطاً مسبقة تتلخص بوجود عدد صغير نسبياً من المنتجين الذين يهيمنون على حصة كبيرة من السوق، ويكونون قادرين على تحديد وفرض حصص الإنتاج، والتحكم في توسيع نطاق الإمكانيات، والحد من دخول منتجين جدد. علاوةً على ذلك، يجب أن تكون بدائل المنتج قصيرة الأجل محدودة. وأدى غياب هذه الشروط إلى منع ظهور تكتلات احتكارية في أسواق الغاز (جافي وسوليجو، 2006). ومن غير المرجح أيضاً أن يظهر أي منها في حالة الهيدروجين.

ويمكن إنتاج الهيدروجين في أماكن عديدة حول العالم، فهو مُنتَج مُصنَّع وليس مادة أولية أو مصدراً للطاقة. الأمر الذي يستحيل معه دخول لاعبين جدد إلى الصناعة، وهو ما يعد شرطاً أساسياً لتشكيل التكتلات. علاوةً على ذلك، عبّرت العديد من الدول عن طموحها بأن تصبح مُصدرة للهيدروجين وأنواع الوقود المشتقة، مما يقلل فرص تركّز التصدير في بلدان محددة.

37 يعتبر الهيدروجين من الغازات عالية الاشتعال عبر نطاق واسع من تركيزاته، لذا قد تشكل بعض المركبات المشتقة من الهيدروجين مخاطر صحية جسيمة.

الوصول إلى مواد الخام الأساسية

تحتاج تقنية إنتاج الهيدروجين وغيرها العديد من تقنيات الطاقة المتجددة الأخرى إلى مواد الخام، لذا تتسع دائرة النقاش لتشمل أيضاً "أمن المواد". ويتم استخدام حوالي 30 مادة خام في تقنيات خلايا الوقود وتخزين الهيدروجين (المفوضية الأوروبية، 2020ب). وفي حين أن معظم المعادن والفلزات من الموارد الجيولوجية كافية حالياً، إلا أن الأسواق قد تشهد نقصاً جراء الطلب المتنامي بسرعة، والفترات الزمنية الطويلة التي تستغرقها مشاريع التعدين والتكرير. كما قد تظهر تقنيات أخرى تنافس الهيدروجين على الكميات المتوافرة من المواد الأساسية. وحتى في حال كانت البلدان قادرة على إنتاج الهيدروجين الخاص بها وتعزيز استقلالها على صعيد الطاقة، إلا أنها قد تضطر إلى الاعتماد على عدد محدود من البلدان للحصول على مواد الخام اللازمة له. وستشكل مفاهيم الابتكار التكنولوجي، وكفاءة الطاقة، وإعادة التدوير، والاقتصاد الدائري، أموراً حاسمة للتخفيف من حدة المخاوف المتعلقة بنقص إمدادات الفلزات والمعادن.

وسيؤدي النمو السريع في إنتاج الهيدروجين إلى زيادة الطلب على معدني النيكل والزرنيخوم لاستخدامهما في التحليل الكهربائي، ومعادن مجموعة البلاتين لاستخدامها في خلايا الوقود (وكالة الطاقة الدولية، 2021خ). ولأن الهيدروجين سيحفز زيادة نشر التقنيات المتجددة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، وسيترافق مع مد خطوط كهربائية جديدة وتركيب بطاريات، فإنه بالتالي سيزيد من الطلب على المعادن المستخدمة في تلك التقنيات.

تتطلب الأنواع المختلفة من أجهزة التحليل الكهربائي وخصائص الوقود أنواعاً مختلفة من المواد. وتعتمد أجهزة التحليل الكهربائي القلوية، المسيطرة على السوق حالياً، على المواد التي تعتبر غير أساسية عموماً، مثل الفولاذ والنيكل (HyTechCycling، 2020). وعلى العكس من ذلك، يبدو أن أجهزة التحليل الكهربائي بغشاء البوليمر المنحل بالكهرباء وأجهزة التحليل الكهربائي للأكسيد الصلب، تفرض مشكلات أكثر خطورة بسبب المواد الأساسية التي تستخدمها. ويعتبر معدني البلاتين والإيريديوم اللذين يستخدمان في أجهزة التحليل الكهربائي بغشاء البوليمر المنحل بالكهرباء، من أكثر المعادن ندرةً وكثافةً بالانبعثات الكربونية في العالم، كما أن إمدادهما محصور في مناطق محدودة؛ حيث توفر جنوب أفريقيا وحدها أكثر من 70% من البلاتين وأكثر من 85% من الإيريديوم عالمياً (الشكل 4.7) (مينكي وآخرون، 2021). ولا يوجد حالياً أي بدائل متوافرة أو متوقعة للإيريديوم (كيمل وآخرون، 2021).



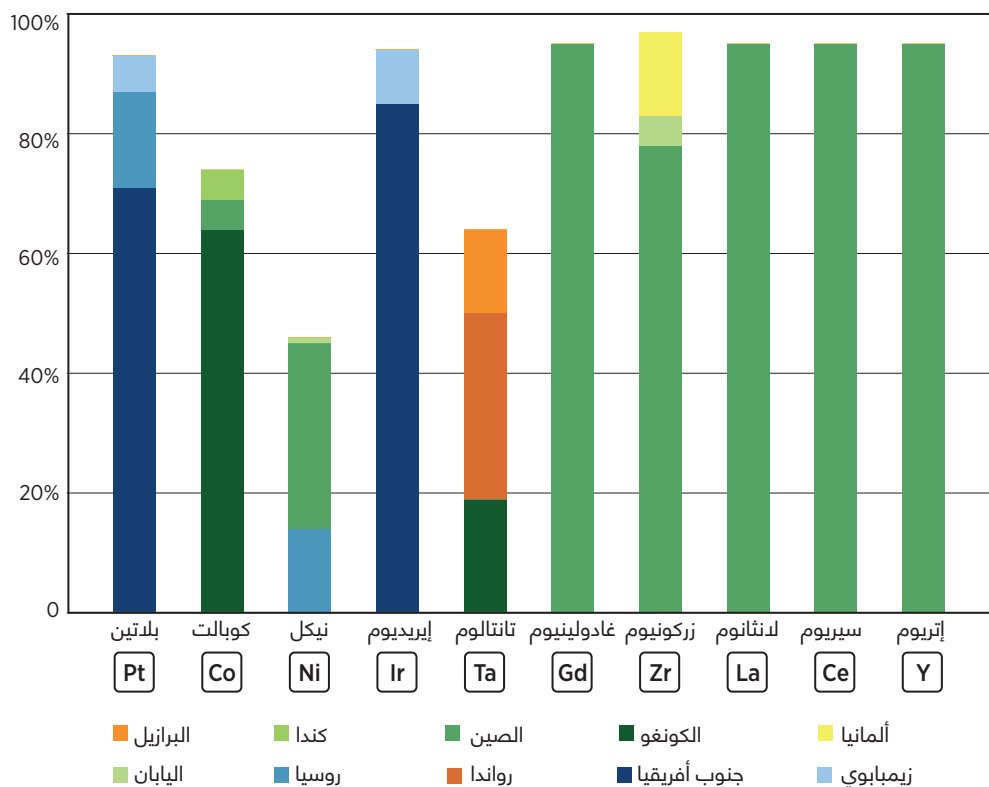
تعتبر معادن مجموعة البلاتين من أهم العناصر الأساسية المستخدمة في صناعة السيارات اليوم؛ ولا سيما المعادن الثلاثة التي يتم استخدامها في محفزات محركات الاحتراق الداخلي (البلاتين والبلاديوم والروديوم) للحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت وأكسيد النيتروز. لكن ظهور السيارات الكهربائية التي تعمل بالبطاريات أدى إلى خفض الطلب على هذه المعادن. وتأمل صناعة البلاتين أن يحفز ظهور أجهزة التحليل الكهربائي بغشاء البوليمر المنحل بالكهرباء وخلايا الوقود إلى تعويض هذا الانخفاض. أما أجهزة التحليل الكهربائي للأكسيد الصلب- التي ما تزال قيد الاختبار وتعد بتوفير كفاءات قد تقلل استهلاك الكهرباء- فإنها تعاني من مشكلة تركز مناطق إمداد موادها بصورة أكبر، إذ توفر الصين وحدها 95% تقريباً من المواد الأساسية المستخدمة في هذه الأجهزة (الشكل 4.7) (آيرينا، 2020). وهو أمر ينطبق أيضاً على خلايا وقود الأكسيد الصلب.

ومن الجدير بالذكر أن أسواق العديد من هذه المواد تفتقر للسيولة وغير مرنة على المدى القصير. أي أن أي تغيير بسيط نسبياً في العرض والطلب قد يؤدي إلى تقلبات كبيرة في الأسعار. فمثلاً، شهدت الأعوام العشرين الماضية تقلباً في أسعار البلاتين بمقدار أربعة أضعاف، و15 ضعفاً في أسعار البلاديوم، و70 في أسعار الإيريديوم (بلاتين مائي، n.d.). ويمكن أن تنعكس تقلبات الأسعار هذه عبر سلاسل توريد الهيدروجين، وتؤثر على التكلفة الإجمالية للقطع الأساسية من المعدات، مثل أجهزة التحليل الكهربائي، فضلاً عن التأثير على إيرادات شركات التعدين ومصدري مواد الخام.



الشكل 4.7 كبار منتجي المواد الأساسية للتحليل الكهربائي

تجزئة الإمداد العالمي من المعادن (%)



المصدر: آيرينا (2020 أ)

©Evgeny_V/shutterstock.com



الفصل الخامس

الأسباب الجذرية لعدم الاستقرار الجيوسياسي ودور الهيدروجين في معالجتها

في عالمنا المترابط اليوم، يجب أن نتعامل اعتبارات التغير الجيوسياسي مع الطبيعة الواسعة ومتعددة الأبعاد للتهديدات ومواطن الضعف العالمية؛ وغالباً ما يتم استخدام مفهوم "الأمن البشري" لتحديد الأسباب الجذرية وراء انعدام الاستقرار الجيوسياسي. وعدا عن التهديدات العسكرية لأمن الدول، يوسع هذا المفهوم نطاق الأجندة الأمنية لتشمل التهديدات غير التقليدية مثل تغير المناخ والفقر والمرض، والتي قد تقوض أسس السلام والاستقرار داخل الدول وفيما بينها. وقد أقرت الجمعية العامة للأمم المتحدة (2012) هذا المبدأ الذي يوجه عمل المنظمة الدولية في مجالات عدة تتراوح بين بناء عمليات السلام إلى تقديم المساعدات الإنسانية وحفز التنمية المستدامة.

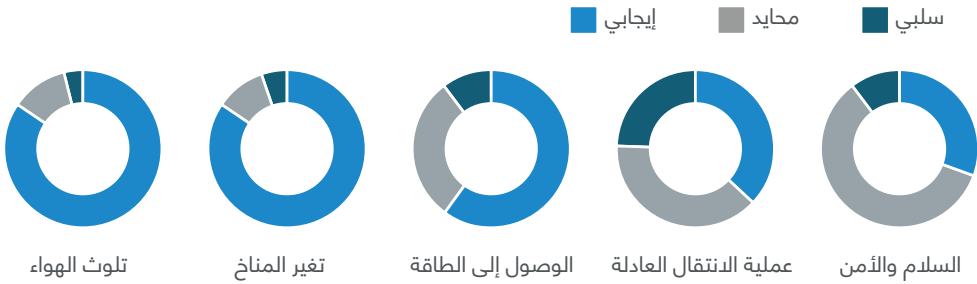
تعكس أهداف التنمية المستدامة السبعة عشر (SDGs) للأمم المتحدة الطبيعة متعددة الأبعاد للأمن البشري. وتبعاً لطريقة إنتاجه، قد يكون للهيدروجين تداعيات إيجابية أو سلبية على مخرجات التنمية المستدامة (الشكل 5.1).

05



© Panchenko Vladimir/shutterstock.com

الشكل 5.1 آراء الخبراء حول تأثير الهيدروجين على مخرجات محددة للتنمية المستدامة بحلول عام 2050



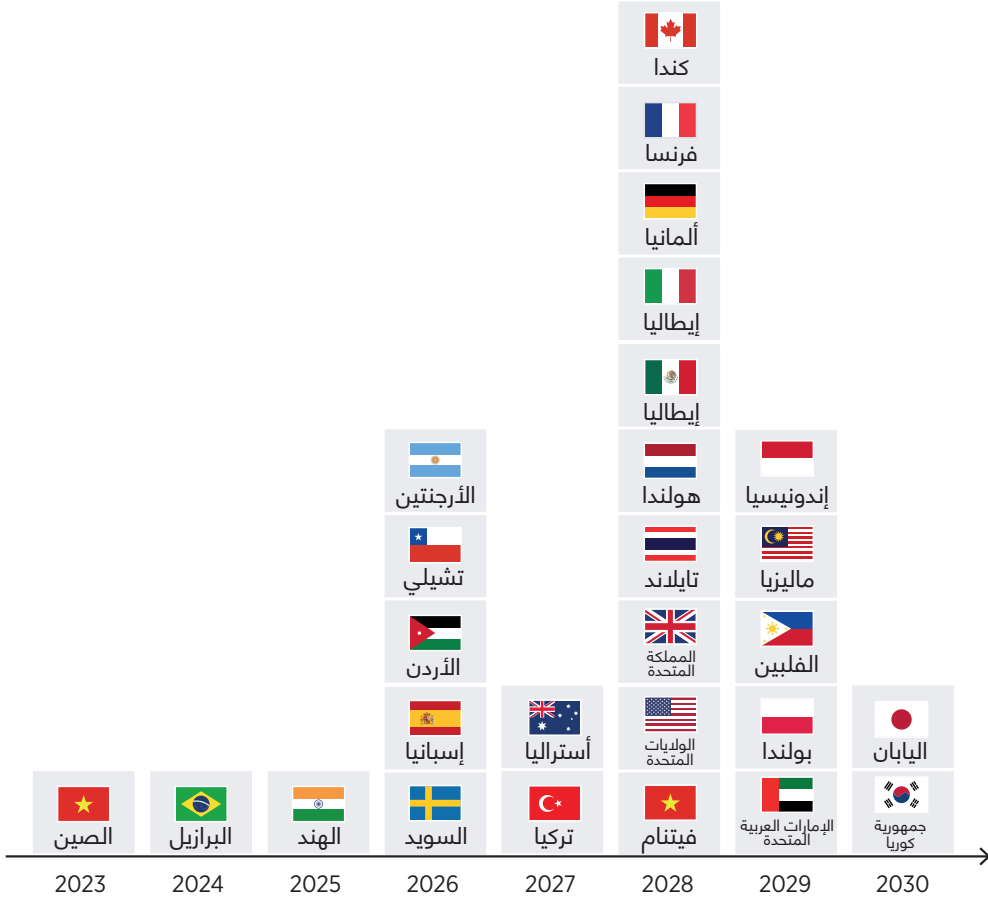
المصدر: (استطلاع آراء خبراء الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (الإطار 2.2).

5.1 التحولات الاجتماعية – السياسية

يترتب على انتقال الطاقة العالمي تداعيات اجتماعية واقتصادية قد يكون لها آثار جيوسياسية متفاوتة. ولتنفيذ هذا التحول بشكل عادل وشامل، يجب أن يراعي صناع السياسات مدى تأثيره على فرص العمل والتنمية الصناعية، فضلاً عن مستوى شموليته. فمن جهة، تقدّر الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (آيرينا) أن تقنيات التحليل الكهربائي قد تخلق لوحدها ما يقارب مليوني فرصة عمل مباشرة في جميع أنحاء العالم بحلول عام 2030 من أصل 137 مليون فرصة عمل تشكل إجمالي حجم القوة العاملة المتوقع دخولها سوق العمل بحلول ذلك الوقت (آيرينا ومنظمة العمل الدولية، 2021). ومن ناحية ثانية، يمكن للهيدروجين أن يتسبب باضطراب بعض الصناعات من خلال زيادة مخاطر الأصول العالقة. ويُنظر إلى الهيدروجين الأزرق أحياناً باعتباره رهاناً آمناً كونه يسمح للدول المنتجة بمعاودة استخدام موارد وخطوط أنابيب الغاز الطبيعي التي قد تخرج عن الخدمة. ولكن الانخفاض المتوقع في تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر، بالتوازي مع اتباع سياسات أكثر صرامة للتخفيف من حدة تغير المناخ، قد يؤدي في نهاية المطاف إلى وقف الاستثمارات في سلاسل توريد الهيدروجين القائم على الوقود الأحفوري (الأزرق أو الرمادي)، ولا سيما الأصول المتوقع تشغيلها لسنوات عدة.

وتتوقع الوكالة أن يصبح إنتاج الهيدروجين الأخضر أقل تكلفةً من الهيدروجين الأزرق بحلول عام 2030 (آيرينا، 2020 أ). وقد يتحقق ذلك بشكل أسرع في بعض الدول مثل الصين بفضل ما تملكه من أجهزة تحليل كهربائي منخفضة التكلفة، بالإضافة إلى البرازيل والهند بفضل مخزونها الوفير من مصادر الطاقة المتجددة غير المكلفة وأسعار الغاز المرتفعة نسبياً (الشكل 5.2).

الشكل 5.2 الدول التي قد تصبح فيها تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر أقل من الهيدروجين الأزرق سنوياً



المصدر: بلومبرج لتمويل الطاقة الجديدة (2021 ث).
ملاحظات: يعتمد الشكل أعلاه على سيناريو تكلفة المحلل الكهربائي القلوي الواعد من مؤسسة بلومبرج لتمويل الطاقة الجديدة؛ والمقارنة الحجمية لقدرة إنتاج الطاقة المتجددة مقابل المحلل الكهربائي؛ والمعدلات الوسطية لتوقعات أسعار الغاز على مدى 20 عاماً.

H₂



H₂

ويلوح في الأفق خطر آخر يهدد بخروج الأصول عن الخدمة في قطاعات الاستخدام النهائي لسلسلة قيمة الهيدروجين. ومن المتوقع أن يلعب الهيدروجين النظيف دوراً مهماً في الصناعات الثقيلة مثل الصلب والأسمدة والكيماويات. حيث يتراوح عمر المصانع العاملة في هذه القطاعات عادةً بين 30 و40 عاماً، ويخضع معظمها لعمليات ترميم كبيرة خلال دورة حياتها (أيرينا، 2020ب). وفي حال تم إنشاء مصانع وأصول جديدة تعمل على الوقود الأحفوري، فسيؤدي ذلك إلى حبس مليارات الأطنان من انبعاثات غازات الدفيئة عدا عن المخاطرة بخروجها عن الخدمة في سياق التوجهات الحالية لتحقيق الحياد الكربوني. ومع تبقي القليل من دورات الاستثمار في هذا القطاع قبل عام 2050، من الضروري مواصلة الاستفادة من هذه المصانع مستقبلاً.

وسيكون من الضروري جداً أن تتعاون الدول فيما بينها لنشر التقنيات النظيفة بأسرع ما يمكن، ولا سيما في قطاعات الصناعة الثقيلة والنقل. وقد تؤدي مساعدة الدول النامية لنشر مشاريع الهيدروجين إلى تخليها عن الوقود الأحفوري بدلاً من استمرار الاعتماد عليه. وربما يكون من الأفضل للدول الصناعية استبدال البنية التحتية القديمة بحلول مستقبلية تساعد على تحقيق أهداف الحياد الكربوني.

ويمكن أن يشكل إنتاج الهيدروجين كذلك جزءاً من حزمة متكاملة لتحقيق عملية الانتقال العادلة للطاقة، وأن يدعم جهود التنمية الصناعية وإعادة التحويل، بما في ذلك المجمعات الصناعية والموانئ كثيفة الاستهلاك للطاقة. على سبيل المثال، بدأت شركة "إيبردرولا"، وهي شركة إسبانية متعددة الجنسيات لمرافق الكهرباء، في بناء مصنع هيدروجين أخضر للاستخدامات الصناعية في مدينة بورتولانو الإسبانية، وهي مركز سابق لتعدين الفحم (إيبردرولا، بدون تاريخ). كما يخطط ميناء روتردام، والذي يشكل حالياً مركزاً رئيسياً للوقود الأحفوري، لأن يصبح مركزاً للهيدروجين النظيف من خلال ربطه بكابلات عالية الجهد مع مزارع الرياح البحرية في بحر الشمال وإنشاء طرق تجارية جديدة لاستيراد الهيدروجين ومشتقاته. (هيئة ميناء روتردام، 2020).



© Igor-Kardasov / iStock.com



5.2 تغير المناخ والإجهاد المائي وانعدام الأمن الغذائي

المخاطر الأمنية المتعلقة بالمناخ

لأكثر من عشر سنوات، حظيت ظاهرة تغير المناخ باهتمام عالمي واسع النطاق باعتبارها "عاملًا مضاعفًا للخطر" قد يؤدي إلى تفاقم النزاعات وانعدام الأمن العالمي (الجمعية العامة للأمم المتحدة، 2009). ويحدد تقرير "مناخ جديد للسلام" - الصادر عام 2015 بتكليف من مجموعة القوى السبع العظمى G7 (أدلفي وآخرون، 2015) - سبعة مخاطر مركبة لهشاشة المناخ تشكل تهديدات خطيرة لاستقرار الدول والمجتمعات خلال العقود المقبلة (الجدول 5.1). وتتراوح هذه المخاطر بين زيادة التنافس على الموارد المحلية، وتقلب أسعار المواد الغذائية، وصولاً إلى الهجرة وعدم استقرار سبل العيش.

الجدول 5.1 الطرق السبعة التي يهدد بها تغير المناخ على الاستقرار

التهديد	الوصف
التنافس على الموارد المحلية	مع تزايد الضغط على الموارد المحلية، قد يؤدي التنافس عليها إلى انعدام الاستقرار وحتى المواجهة العنيفة مع الافتقار إلى آلية فعالة لحل النزاعات.
عدم استقرار مصادر العيش والهجرة	سيتسبب تغير المناخ في انعدام استقرار حياة الأفراد الذين يعتمدون على الموارد الطبيعية في تأمين معيشتهم، مما قد يدفعهم إلى الهجرة أو اللجوء إلى مصادر دخل غير رسمية وغير شرعية.
ظروف وكوارث الطقس القاسي	تؤدي ظروف وكوارث الطقس القاسي إلى تفاقم الأوضاع الهشة، وقد تزيد من ضعف السكان ومظالمهم، ولا سيما في مناطق النزاعات.
تقلب أسعار الغذاء واضطراب إمداداته	من المرجح أن يؤدي تغير المناخ إلى اضطراب إنتاج الغذاء في العديد من مناطق العالم، مما يؤدي بدوره إلى ارتفاع الأسعار وتقلبات السوق وزيادة مخاطر الاحتجاجات وأعمال الشغب والنزاعات الأهلية.
إدارة المياه العابرة للحدود	غالبًا ما تشكل إدارة المياه العابرة للحدود مصدر توتر بين الدول. ومع تزايد الطلب على المياه وتأثير تغير المناخ على توافرها وجودتها، من المرجح أن تؤدي المنافسة على استخدام المياه إلى زيادة الضغط على هياكل الحوكمة القائمة.
ارتفاع مستوى سطح البحر وتدهور المناطق الساحلية	يشكل ارتفاع مستوى سطح البحر تهديدًا حقيقياً لإمكانية الحياة في المناطق المنخفضة حتى قبل أن تغمرها المياه، مما قد يؤدي إلى حالات من الاضطراب الاجتماعي والنزوح والهجرة، وكذلك احتمال تصاعد الخلافات حول الحدود البحرية وموارد المحيطات.
الآثار الجانبية لسياسات المناخ	مع تطبيق سياسات التكيف مع تغير المناخ على نطاق واسع، ستزداد معها الآثار الجانبية السلبية، ولا سيما في السياقات الهشة.

المصدر: أدلفي وآخرون، (2015).

سيكون إنتاج الهيدروجين النظيف أمراً ضرورياً لتحقيق أهداف إزالة الكربون وتفاذي تغير المناخ الحاد، وقد يساهم الحد من تهديدات تغير المناخ بالتالي في تحقيق الاستقرار الجيوسياسي. وهنا تبرز الحاجة إلى اعتماد سياسة فعالة، وخصوصاً في حالة الهيدروجين الأزرق نظراً لمخاطر تسرب غاز الميثان وعدم وجود معايير لمعدلات احتجاز ثاني أكسيد الكربون. ويمكن لغاز الهيدروجين أن يساهم بشكل غير مباشر في الاحتباس الحراري العالمي في حال تسربه إلى الغلاف الجوي، ذلك لأنه يزيد من مستويات الميثان والأوزون اللذين يعتبران أكثر غازات الدفيئة ضرراً بعد ثاني أكسيد الكربون؛ ولا ينبغي مع ذلك المبالغة في حجم هذا التأثير. ومن المقدّر لمساهمة الهيدروجين المحتملة في الاحتباس الحراري على مدى 100 عام أن تكون أقل من ربع مساهمة غاز الميثان. ومع ذلك، فإن تطوير شهادات منشأ ضمن إطار نظام دولي يتسم بالشفافية والمصادقية سيكون أمراً بالغ الأهمية لمراقبة وإدارة مساهمة الهيدروجين في تغير المناخ.

الإجهاد المائي

يشكل الإجهاد المائي تهديداً مباشراً لسلامة الإنسان والبيئة في آن معاً. وقد يؤدي أيضاً إلى حدوث هجرات جماعية ونشوب صراعات على مستويات مختلفة؛ بدءاً من المستوى المجتمعي حيث قد تضطر المجتمعات المحلية إلى التنافس على احتياطات المياه العذبة النادرة، وصولاً إلى المستوى الدولي من خلال حدوث نزاعات عبر الحدود (منظمة الأغذية والزراعة، 2020). ويعيش اليوم أكثر من مليار شخص في دول تعاني من الإجهاد المائي، (اليونسكو، 2021)، ومن المتوقع أن تتفاقم هذه المشكلة نتيجة تغير المناخ والأنماط الاقتصادية والنمو السكاني.

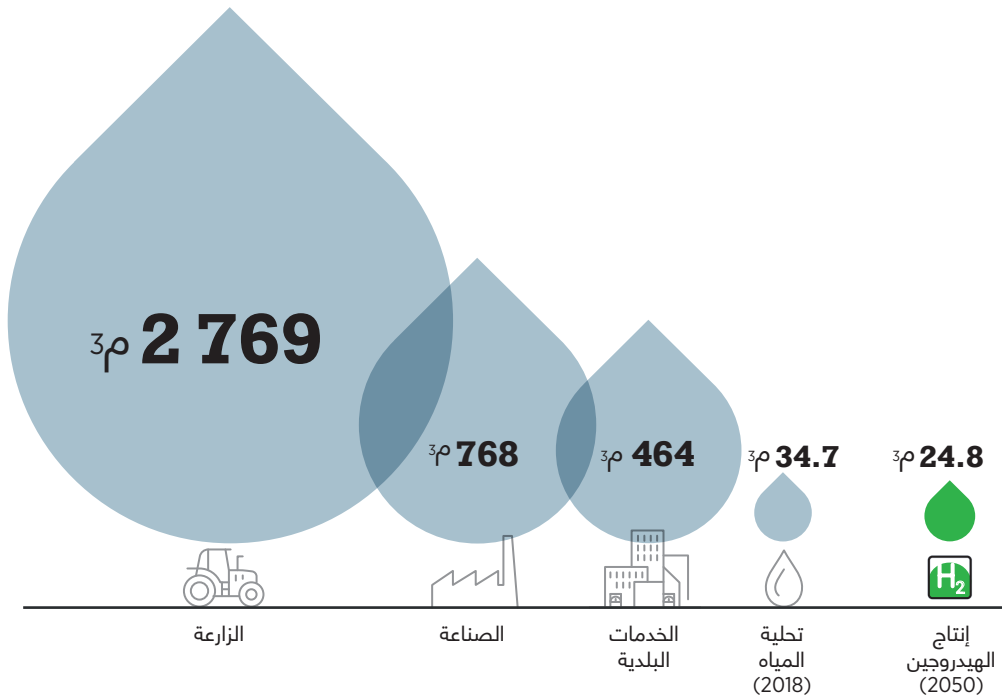
يتطلب إنتاج الهيدروجين استهلاك كميات كبيرة من المياه (العذبة) كمادة خام. ومع استمرار آثار تغير المناخ في مفاومة الإجهاد المائي، قد تضطر المزيد من الدول إلى إعادة النظر في جدوى إنتاج الهيدروجين بالنسبة لها على المدى الطويل. وقد يتطلب إنتاج 409 مليون طن من الهيدروجين الأخضر، والذي تفترض آيرينا تحقيقه بحلول عام 2050 لنجاح مساعي وقف ارتفاع درجة حرارة الأرض عند 1.5 درجة مئوية، ما يقارب 7 - 9 مليار متر مكعب من المياه سنوياً، وهذا أقل من 0.25% من استهلاك المياه العذبة حالياً، (البنك الدولي، بدون تاريخ ت). ومن المهم أيضاً اختيار طريقة الإنتاج المناسبة، فإنتاج الهيدروجين الأخضر أقل استهلاكاً للماء من الهيدروجين الأزرق. وتعد تقنيات الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح أقل استهلاكاً للمياه من التوليد الحراري خلال مرحلة التشغيل، وبالتالي فإنها تحرر موارد المياه المحدودة بشكل متزايد (آيرينا، 2015). على سبيل المثال، كشف تحليل أجرته الوكالة الدولية للطاقة المتجددة حول مدى التزام الصين والهند بمساهمتهما المحددة وطنياً أن توسيع نطاق توليد الطاقة المتجددة، ولد سيما الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح، إلى جانب تقنيات التبريد المحسنة، قد يقلل من كثافة سحب المياه لتوليد الكهرباء بنسبة 42% و 84% بحلول عام 2030 على التوالي (آيرينا، 2018ب؛ آيرينا، 2016ب). وفي منطقة مجلس التعاون الخليجي، قد يؤدي تحقيق أهداف وخطط نشر الطاقة المتجددة بحلول عام 2030 إلى تقليل سحب المياه لإنتاج الطاقة واستخلاص الوقود المرتبط بها بمقدار 11.5 تريليون لتر، ويشكل ذلك انخفاضاً بنسبة 17% (آيرينا، 2019ب).



تتراوح المساهمة المحتملة للهيدروجين في الاحتباس الحراري على مدى 100 عام بين 1.9 و 4.7 مقارنة مع 21.2 - 37.2 لغاز الميثان (فيلد وديروينت، 2021)

اتجهت أنظار المستثمرين إلى المواقع التي تمتلك أفضل مصادر الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح لتطوير مشاريع إنتاج الهيدروجين الأخضر. غير أن المناطق المشمسة تميل عادةً لأن تكون الأكثر جفافاً أيضاً، وبالتالي فإن أكثر من 70% من مشاريع التحليل الكهربائي المخطط لها ستكون في المناطق التي تعاني من الإجهاد المائي، مثل أستراليا وتشيلي وعمان والمملكة العربية السعودية وإسبانيا (الشكل 5.4). ونتيجةً لذلك، قد يحتاج أكثر من 85% من مشاريع إنتاج الهيدروجين الأخضر المخطط لها إلى مصادر مياه يتم تأمينها عن طريق تحلية المياه، (ريستاد، 2021). وتضيف تحلية مياه البحر ما يتراوح بين 0.02 – 0.05 دولار على تكلفة كل كيلوغرام من الهيدروجين (بلانكو، 2021، كالديرا وبرابر، 2017)، علماً أن معظم محطات التحلية التجارية اليوم تعمل بالوقود الأحفوري.

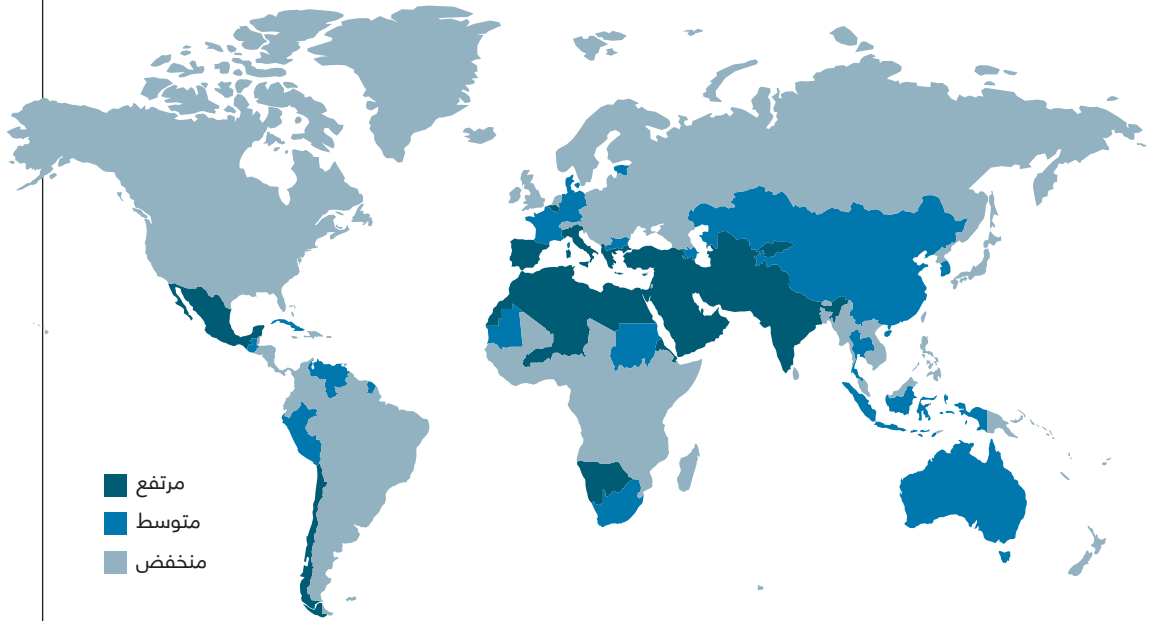
الشكل 5.3 استهلاك المياه لإنتاج الهيدروجين في عام 2050 مقارنةً مع قطاعات محددة اليوم (مليار متر مكعب)



المصدر: بلانكو (2021).
ملاحظة: تقتصر النتائج المبينة في الشكل أعلاه على استهلاك المياه فقط دون أن يأخذ بالاعتبار سحب المياه. وتغطي عمليات السحب المياه التي يتم إرجاعها مباشرة إلى الأحواض المائية التي أخذت منها. أما الاستهلاك، فيغطي المياه التي يتم تحويلها إلى شكل آخر أو لم يتم إعادتها إلى أحواضها الأصلية. وبالرغم من إمكانية استعادة معظم المياه عند احتراق الهيدروجين أو استخدامه في خلايا الوقود، إلا أنه لا تتم إعادتها بشكل عام إلى أحواضها الأصلية وبالتالي فإنها تعتبر مُستهلكة (بيسويك، وأوليفيرا، ويان، 2021).

وقد يشكل إنتاج الهيدروجين الأخضر فرصةً لتحسين الأمن المائي؛ حيث تعتبر تحلية المياه مرتفعة التكلفة لبعض القطاعات مثل الزراعة والصناعات الصغيرة، مما يجعل إمدادات المياه عنصراً جوهرياً لهذه القطاعات. وترفع عملية تحلية المياه لغرض إنتاج الهيدروجين الأخضر استهلاك الطاقة وتكلفة الإنتاج بنسبة تتراوح بين 1 - 2% تبعاً لحجم الكهرباء المستهلكة. وبالتالي فمن شأن الهيدروجين الأخضر أن يساهم في حفز قطاع تحلية المياه وتحقيق قفزة كبيرة في حجم القدرة الإنتاجية من المياه المحلاة. وقد يؤدي أيضاً إلى زيادة إمدادات المياه العذبة للأغراض أخرى عدا التحليل الكهربائي، أو خفض تكاليف تحلية المياه (آيرينا، 2020). ومع ذلك، تجدر الإشارة إلى أن محطات تحلية المياه تنتج محاليل مشبعة بالأملاح والمواد الكيميائية التي قد تترك آثاراً بيئية سلبية لدى إعادتها إلى البحر.

الشكل 5.4 الخريطة الحرارية لمستويات الإجهاد المائي



المصدر: قاعدة بيانات ريسناد إنيرجي للطاقة المتجددة (RenewableCUBE) (2021)

مصدر الخريطة: قاعدة بيانات ناتشورال إيرث، 2021

إخلاء مسؤولية: تم إدراج الخريطة للأغراض توضيحية فقط، والحدود الموضحة في الشكل لا تعني أي تأييد أو قبول من قبل الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (آيرينا).

النزاع على الأرض والغذاء

يدخل الهيدروجين في إنتاج جميع الأمونيا الصناعية في العالم، وهي المكون الرئيسي للأسمدة الصناعية التي تعتمد عليها غالبية المحاصيل الزراعية. وتدعم هذه الأسمدة القائمة على الهيدروجين حوالي نصف سكان العالم حالياً (ريتشي، 2017). وبدون الهيدروجين، ستخفّض الإنتاجية الزراعية ويهدد ذلك بالتالي الأمن الغذائي لملايين الناس.

لا يوجد في الوقت الراهن بديل حقيقي لاستخدام الهيدروجين في إنتاج الأسمدة الصناعية، ويتم الحصول عليه بشكل عام من الغاز الطبيعي والفحم دون الحاجة إلى احتجاز الكربون وتخزينه. وبالتالي فإن الازدهار المتوقع في إنتاج الهيدروجين النظيف قد يساهم في إزالة الكربون من سلسلة توريد الغذاء العالمية، الأمر الذي يساهم في تعزيز الأمن الغذائي العالمي بالتوازي مع زيادة إمدادات الهيدروجين في السوق.

وقد تكون هذه التنازلات ذات صلة خاصة بأفريقيا جنوب الصحراء الكبرى، حيث لم يتجاوز استهلاك الأسمدة 20 كيلوغراماً للهكتار الواحد في عام 2018 – وهذا أقل بمرتين إلى ثلاث مرات مما هو مطلوب لتلبية احتياجات القطاع الزراعي (البنك الدولي، بدون تاريخ ث). ويؤدي الاستخدام غير الكافي للأسمدة إلى استنفاد العناصر الغذائية للتربة، وتراجع الإنتاجية الزراعية، وانخفاض نصيب الفرد من الأراضي الصالحة للزراعة. ويتم إنتاج الأمونيا في القارة بنسبة كبيرة من الغاز الطبيعي المركز في الجزائر ومصر ونيجيريا. ومع ذلك، يمكن إنتاج الأمونيا أيضاً بتكلفة أكثر تنافسية من مصادر الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، وقد تم بالفعل الإعلان عن مشاريع كهذه في مصر وموريتانيا والمغرب وناميبيا (البطار 3.2). ويعد تحديد الأولويات أمر بالغ الأهمية أيضاً، حيث يتعين تلبية الاحتياجات المحلية للبلدان المنتجة قبل تصدير الأمونيا.





© Ecopix/shutterstock.com

وقد يؤثر اعتماد الهيدروجين النظيف على أسعار الغذاء العالمية أيضاً. ويمكن ليلزام منتجي الأسمدة باستخدام حصص من الهيدروجين الأخضر - كما تخطط الهند - أن يؤدي إلى زيادة إنتاج هذا الهيدروجين؛ ويجب مع ذلك دراسة مدى تأثير هذا الأمر على الأمن الغذائي. وتمثل تكلفة الغاز الطبيعي حالياً ما بين 60 - 80% من تكاليف المدخلات المتغيرة لإنتاج الأسمدة النيتروجينية (المفوضية الأوروبية، 2019). وترتبط أسعار الأسمدة عموماً بتقلب أسعار الغاز، وقد ظهر ذلك جلياً في خريف عام 2021 عندما أُرغم ارتفاع أسعار الغاز الطبيعي عدداً من مصنعي الأسمدة في أوروبا على تخفيض إنتاجهم جزئياً أو كلياً (ثابليال، 2021).

وفيما يخص تأثير إنتاج الهيدروجين على الأراضي، توجد بعض القيود المفروضة على نشر تقنيات التحليل الكهربائي القائمة على مصادر الطاقة المتجددة في مناطق معينة، مثل المناطق ذات الكثافة السكانية العالية أو الأنشطة أو الوظائف التنافسية (مثل الزراعة أو المناطق المحمية). غير أن التأثير الأكبر على الأراضي سيأتي من مزارع الرياح والطاقة الشمسية الكهروضوئية الواسعة التي يتعين إنشاؤها لتوفير الكميات المطلوبة من الكهرباء المتجددة والهيدروجين الأخضر. وسيتم أحد هذه المشاريع في أستراليا، وهو مركز الطاقة الخضراء الغربي، على مساحة 15 000 كيلومتر مربع - أي ما يقارب نصف مساحة بلجيكا أو ليسوتو - لإنتاج الهيدروجين الأخضر والأمونيا بغرض تصديرهما. ويمكن الحد من وطأة التنافس على استخدام الأراضي إذا ما تم تطوير منشآت الطاقة المتجددة في المناطق الصحراوية غير المأهولة والكتل البحرية، كما هو الحال في مشروع نور لإنتاج الهيدروجين من طاقة الرياح والطاقة الشمسية في موريتانيا، والذي قد يحفز على تطوير أول مزرعة رياح بحرية في أفريقيا (كولينز ، 2021ب).

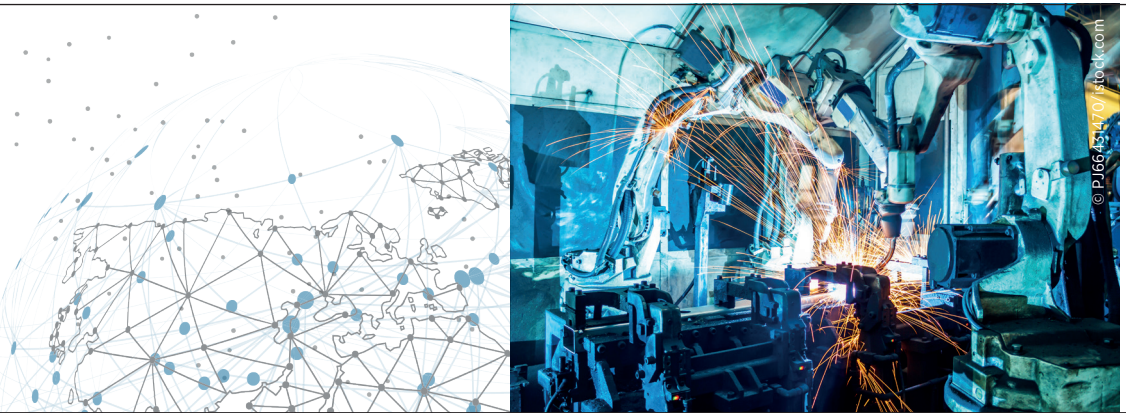
5.3 الهيدروجين والدول النامية

لفترة طويلة ساد الاعتقاد لدى العديد من البلدان بأن السبيل الأرخص والأسهل للتنمية يعتمد على الوقود الأحفوري، ولا سيما الفحم. ويوفر الفحم أكثر من ثلث الطاقة التي يتم إنتاجها حالياً على مستوى العالم، ويلعب دوراً محورياً في صناعات رئيسية مثل الحديد والصلب. وبالنسبة للعديد من البلدان النامية، كان الفحم هو المحرك الرئيسي للنمو على مدى السنوات والعقود الماضية. ففي الصين على سبيل المثال، استحوذ الفحم على 61% من إجمالي توليد الطاقة في عام 2020، ويعتمد 71% من إمدادات الطاقة في الهند على الفحم (إمبر، بدون تاريخ- إمبر، بدون تاريخ-أ). ولا تزال الصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة، مثل الأسمنت والصلب والكيماويات، مرتبطة على نحو وثيق بالوقود الأحفوري.

وخلال السنوات العشر الماضية، بدأت تقنيات الطاقة المتجددة الأقل تكلفة تشكل تحدياً حقيقياً لأنواع الوقود التي كانت سائدة طوال القرن العشرين. وقد ساهم انخفاض تكاليف هذه التقنيات، مثل الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح والبطاريات، في إطلاق مسارات جديدة للتنمية. وتعد مصادر الطاقة المتجددة الآن أرخص أشكال توليد الكهرباء، تكلفة، حيث تفوقت على 61% من محطات الطاقة الحالية العاملة بالفحم من حيث التكلفة بدون دعم مالي في عام 2020 (آيرينا، 2021؛ لوفينز، 2021). ونتيجة لذلك، تحظى الدول النامية الآن بفرصة فريدة لتخطي الوقود الأحفوري في نظام الطاقة. وقد نجحت العديد من البلدان في ذلك بالفعل، بينما تقف دول أخرى على أعتاب الانتقال إلى مصادر الطاقة المتجددة لتلبية نمو الطلب على الكهرباء (بوندر وأخرون، 2021).

وما من سبب يدعو للاعتقاد بأن الانتقال من الوقود الأحفوري سيقصر فقط على قطاع الكهرباء. وعلى سبيل المثال، يمكن للبلدان والمناطق أن تتحول مباشرة إلى اعتماد وسائل النقل الكهربائية كما هو الحال في الهند وأفريقيا مع انتشار المركبات الكهربائية ذات العجلتين أو الثلاث عجلات. ويمكن للهيدروجين النظيف أن يوسع طيف الخيارات المتاحة للتخلي عن الوقود الأحفوري في العديد من القطاعات.

وهناك العديد من البلدان النامية التي تحظى بعقود طويلة من الخبرة في مجال الهيدروجين، حتى ولو كمادة خام في إنتاج الأسمدة الزراعية. وبإدار القليل من البلدان فقط إلى تجريب مشاريع الهيدروجين في قطاعات جديدة؛ حيث بدأت كل من إندونيسيا وجنوب أفريقيا وترينيداد وتوباغو باستخدام خلايا الوقود القائمة على الميثانول أو الأمونيا في أبراج الاتصالات، وغالباً ما تشكل هذه الخلايا بديلاً لمولدات الديزل في أنظمة الطاقة الاحتياطية (رومر، 2011). وبدورها بدأت الصين وكوستاريكا وماليزيا باستخدام حافلات تعمل بخلايا الوقود (دي سيستيرنز، وفرناندو، وجاكسون، 2020). وتنتظر الهند حالياً في إلزام مصافي التكرير ومصانع الأسمدة باستخدام حصص محددة من الهيدروجين الأخضر في عملياتها (فيرما، 2020).



لا تزال الكثير من الدول النامية بحاجة إلى بناء بنيتها التحتية؛ بما في ذلك الطرق، والمنازل، والمدارس، والمصانع، وأنظمة الصرف الصحي، وأنظمة الطاقة. ويتطلب ذلك بطبيعة الحال استهلاك كميات هائلة من الطاقة والمواد كثيفة الانبعاثات التي يتم استيرادها في أغلب الأحيان. وتساهم الحاجة إلى تلبية هذه المتطلبات في مضاعفة فوائد التخلي عن الوقود الأحفوري.

وقد يوفر الهيدروجين الأخضر فرصاً صناعية جديدة لإنتاج واستخدام السلع مثل الفولاذ الأخضر. ويمكن حتى لأفقر دول العالم أن تستغل إمكانات الطاقة المتجددة لديها لإنتاج الهيدروجين الأخضر محلياً، وتوليد الفرص الاقتصادية، وتعزيز أمن الطاقة. ولا يمكن تحقيق هذه الإمكانيات إلا من خلال تضامن الجهود الدولية لتوجيه الموارد، وتشارك التقنيات، ونقل الخبرات والمعارف.

ولا شك أن نشر مشاريع الهيدروجين الأخضر في البلدان النامية والاقتصادات الناشئة يحقق مصلحة عالمية بامتياز كونه يساعد في تقليل انبعاثات غازات الدفيئة، وحفز مسارات التنمية المحلية والنمو الاقتصادي. وتجدر الإشارة هنا إلى أن استهلاك الطاقة في الدول النامية قد تضاعف تقريباً منذ مطلع الألفية، وتمثل الدول النامية والاقتصادات الناشئة الآن أكثر من نصف الطلب العالمي على الطاقة (بريتيش بتروليوم، 2021)³⁹ على الرغم من أن نصيب الفرد من استهلاكها لا يزال أقل بكثير من البلدان المتقدمة، حتى أن ملايين الأشخاص في هذه البلدان لا يزالون يفتقرون إلى خدمات الطاقة الأساسية.

ومع ذلك، تعتبر تقنيات انتقال الطاقة باهظة التكلفة بالنسبة للعديد من البلدان النامية. وبالتالي، فإن عملية الانتقال العادلة والمنصفة للطاقة لا تزال مرهونة بسد تلك الفجوة - التي ربما تتسع قبل أن تضيق - بين العالم الغني الذي يستطيع أن يتحمل تكاليف البحث والتطوير ونشر الهيدروجين النظيف، وبين العالم الأفقر الذي لا يستطيع ذلك.

إن مساعدة الدول النامية - ولا سيما أقلها نمواً - على نشر تقنيات الهيدروجين بصورة مبكرة قد يمنع اتساع الفجوة العالمية في إزالة الكربون. وسيكون الوصول إلى هذه التقنيات، والتدريب عليها، وبناء القدرات المتعلقة بها، والتمويل الميسور لنشرها عاملاً حاسماً في تحقيق الإمكانيات الكاملة للهيدروجين وبالتالي إزالة الكربون من نظام الطاقة العالمي وتحقيق العدالة والاستقرار. ولا تقتصر فوائد الأسواق المتنوعة للهيدروجين على تحقيق عملية الانتقال العادلة للطاقة فحسب، وإنما تنعدها إلى توفير فرص جديدة للتجارة والتعاون بما يقلل من مخاطر سلسلة التوريد ويعزز مستويات أمن الطاقة لجميع دول العالم.



الفصل السادس

الاعتبارات السياسية العامة وسبل المضي قدماً

ذكرت اللجنة العالمية المعنية بالجغرافيا السياسية لتحول الطاقة في تقريرها لعام 2019 أن العالم بعد الانتقال إلى الطاقة المتجددة سيكون مختلفاً تماماً عن العالم الحالي القائم على استخدام الوقود الأحفوري (آيرينا، 2019 أ). وأشار التقرير إلى عدم إمكانية التنبؤ بنطاق وسرعة تحول الطاقة؛ وخير مثال على ذلك هو صعود الهيدروجين الذي كان قبل بضع سنوات أحد البدائل الحاضرة في خطاب الطاقة العالمي، وأصبح اليوم محور تركيز رئيسي لاستراتيجيات إزالة الكربون في القطاعات التي يصعب الحد من انبعاثاتها، مع تزايد عدد الدول والقطاعات التي تراهن على استخدامه على نطاق أوسع.

ولم تزال العديد من جوانب انتقال الطاقة تتطور؛ حيث تتنامى حصة الطاقة المتجددة وتزداد معها التغييرات المنهجية الناجمة عن تبنيها. ويساهم اعتماد النظم الكهربائية عبر قطاعات الاستخدام النهائي في إعادة تشكيل الطلب على الطاقة من حيث الحجم والنطاق. ولم يتحدد بعد الدور النهائي للهيدروجين، حيث لا يزال الجزء الأكبر من إنتاجه يعتمد على الوقود الأحفوري. ومن المتوقع أن يزدهر إنتاج الهيدروجين الأخضر، ولكن في مواقع بعيدة عن حقول النفط والغاز الحالية. وقد تظهر آثار اقتصادية واجتماعية وبيئية وجيوسياسية مختلفة نتيجة تطور أسواق الهيدروجين. وعلى الرغم من ضبابية المشهد في الكثير من هذه الجوانب، إلا أنه من المتوقع للهيدروجين أن يحقق إنجازات كبيرة بحلول عام 2030 ضمن إطار المساعي المبذولة لبناء نظام طاقة خالٍ من الانبعاثات الكربونية بحلول عام 2050. ويتضمن هذا القسم بعض الاعتبارات التي يجب مراعاتها في عملية صنع السياسات.



© northlightimages/istock

06

يشكل الهيدروجين جزءاً من المشهد الأوسع لانتقال الطاقة، ولا ينبغي متابعة استراتيجيات تطويره ونشره بمعزل عن غيرها.

ينبغي على الدول أن تجهد في تقييم مدى توافق نشر الهيدروجين مع استراتيجياتها الاقتصادية والاجتماعية والبيئية والسياسية الشاملة. وهناك العديد من العوامل التي يجب على الدول أن تأخذها بعين الاعتبار في سعيها لدخول اقتصاد الطاقة الجديد، ومنها نضج قطاع الطاقة فيها، ومستوى التنافسية الاقتصادية لخيارات الهيدروجين المتاحة، والتأثير الاجتماعية والاقتصادية المحتملة لأي خيار تتخذه. على سبيل المثال، قد تختار دولة ما تحظى بكهرباء رخيصة وموارد جيدة من الطاقة المتجددة استخدام تقنيات التحليل الكهربائي لخفض تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر وجعله أكثر تنافسية. وفي حالات أخرى، قد يفضل صناع السياسات التركيز على التقنيات الأخرى التي تدعم انتقال الطاقة (آيرينا، 2020ب).

ويساهم انتقال الطاقة في تنويع الموردين، وطرق الإمداد، وناقلات الطاقة المتاحة للاستيراد. ولذلك، يجب تقييم الخطط والاستثمارات الخاصة بالبنية التحتية بعناية، نظراً لأن هذه القرارات طويلة الأمد وأن مخاطر (وتكاليف) الأصول العالقة عالية. وينبغي أن تكون البنية التحتية لخطوط الأنابيب، على سبيل المثال، قابلة لإعادة الاستخدام في نقل الغازات الخضراء مثل الهيدروجين والميثان الحيوي. ويجب دراسة التحديات التكنولوجية والتكاليف الاقتصادية المترتبة على إعادة تأهيل خطوط الأنابيب هذه قبل الشروع في ذلك.

يعتبر تحديد الأولويات الصحية لاستخدام الهيدروجين أمراً ضرورياً لتوسيع نطاقه سريعاً وزيادة مساهمته طويلة الأمد في جهود إزالة الكربون.

يجب أن تركز الجهود العالمية على التطبيقات التي توفر المزايا الملحة وتحقق وفورات الحجم المناسبة، ولا سيما على المدى القريب. ومن المرجح أن تقوم تجارة الهيدروجين في مراحلها الأولى على ترتيبات ثنائية مهددة بتخلف أي طرف من أطرافها عن الوفاء بالتزاماته. وعلى الأرجح أيضاً أن يكون إعطاء الأولوية للتطبيقات عالية الطلب - والتي يكون فيها الهيدروجين هو البديل الأفضل بشكل واضح - فعالاً من حيث التكلفة وأقل عرضة للمخاطر المتعلقة بالأسواق الناشئة. ومن الأمثلة على ذلك دعم وتسريع الانتقال إلى الهيدروجين الأخضر في التطبيقات الصناعية التي يُستخدم فيها الهيدروجين بالفعل مثل عمليات التكرير وإنتاج الأمونيا والميثانول (آيرينا، 2020ب).

يتعين كذلك الإيمعان في تقييم الكهرباء التي يتم توليدها من مصادر متجددة لأغراض إنتاجية قبل تحويلها لإنتاج الهيدروجين الأخضر (آيرينا، 2020 ب)، وإلا فقد يؤدي الاستخدام العشوائي للهيدروجين الأخضر إلى إبطاء مسار انتقال الطاقة وربما ارتفاع حصة الوقود الأحفوري مجدداً في مزيج الطاقة. وقد يحول عدم الالتزام بمبدأ الإضافة أيضاً إلى إعاقة التقدم نحو توسيع الوصول إلى الطاقة لمن يفتقرون إليها اليوم، إذ أعطت الدول الأولوية لنشر مصادر الطاقة المتجددة لتصدير الهيدروجين الأخضر.



لا بُدّ من التعاون الدولي لتطوير سوق شفاف للهيدروجين بمعايير وقواعد متماسكة تدعم جهود مكافحة تغير المناخ.

قد يُشكل الهيدروجين النظيف جزءاً مهماً من جهود إزالة الكربون، وربما يساهم أيضاً في زيادة الاستقرار الجيوسياسي من خلال توسيع الفرص الاقتصادية والسياسية الإيجابية للدول والمناطق وتقليل مخاطر وخسائر تغير المناخ. غير أن حبس الكربون ينطوي كذلك على العديد من المخاطر في حال أدت استراتيجيات الهيدروجين إلى إطالة أمد الطلب والعرض على الوقود الأحفوري، وأعادت كفاءة استهلاك الطاقة والكهرباء، ومن الضروري، فيما يخص الهيدروجين الأزرق، تحديد عتبة متفق عليه لاحتجاز الكربون وانبعثات الميثان لضمان مساهمة الهيدروجين الأزرق بشكل فعال في إزالة الكربون.

وتعد الشفافية في كيفية تحديد الانبعاثات أمراً بالغ الأهمية لضمان الأداء السليم لسوق الهيدروجين الدولي؛ إذ يعتمد نجاح أسواق الهيدروجين النظيف على وضع قواعد ومعايير متماسكة وشفافة لتسهيل نشر تقنياته عبر الدول والمناطق والقطاعات. وقد يكون ذلك ساحة للمنافسة الجيوسياسية، ولكن يمكن تحقيق الكثير من المكاسب من خلال التعاون الدولي القوي والمشاركة السياسية والاقتصادية البناءة. وتوفر آيرينا المنصة العالمية اللازمة لمثل هذا التعاون من خلال إطارها التعاوني بشأن إنتاج الهيدروجين الأخضر.

دعم تطور الطاقة المتجددة والهيدروجين الأخضر في الدول النامية يعتبر أمراً بالغ الأهمية لإزالة الكربون من نظام الطاقة العالمي، وقد يساهم بتحقيق عدالة واستقرار الطاقة على المستوى الدولي.

يساهم تنوع سوق الهيدروجين في خلق فرص جديدة للتجارة والتعاون، وتقليل مخاطر سلسلة التوريد، وتحسين أمن الطاقة للجميع. ويتوقف نجاح الدول في تحويل إمكانات المصادر المتجددة إلى طاقة على قدرتها على تصنيع المعدات اللازمة وحماية الملكية الفكرية لدعم الابتكار. وتتركز القدرة التصنيعية حالياً في عدد محدود جداً من البلدان، وبالتالي فإن أغلب دول العالم تعتمد على واردات المعدات من مجموعة صغيرة نسبياً من المواقع. ولتحقيق الاستقرار الجيوسياسي وعملية الانتقال العادلة للطاقة، يتعين على المستوردين المستقبليين حفز تنوع السوق من خلال تمكين الدول النامية الغنية بمصادر الطاقة المتجددة من بناء سلاسل القيمة المحلية والصناعات الخضراء التي توفر فرص العمل. ولا بد من تيسير سبل الوصول إلى التكنولوجيا والتدريب وبناء القدرات والتمويل الميسور لتحقيق الإمكانات الكاملة للهيدروجين، وإزالة الكربون من نظام الطاقة العالمي، والمساهمة في تحقيق العدالة والاستقرار العالمي.

يمكن الحد من المخاطر الجيوسياسية من خلال تقليل الاستهلاك غير الضروري للطاقة عبر العديد من الاستخدامات النهائية.

إن بناء قطاع طاقة مستدام حقاً لا يستوجب استبدال مصادر الطاقة فحسب، وإنما يتطلب أيضاً تطوير طرق فعالة لاستخدام الطاقة بشكل عادل. ويشمل ذلك تقليل الاستهلاك غير الضروري عبر العديد من الاستخدامات النهائية، وتغيير نظم الطاقة التي تعتمد على زيادة الاستهلاك باستمرار. على سبيل المثال، وفي سعيها للتحويل إلى نظام طاقة خالٍ من الانبعاثات الكربونية، قد تلجأ الدول إلى إنتاج الهيدروجين بكميات جيدة لتعزيز استقلاليته في مجال الطاقة، ولكنها لا تزال تعتمد على عدد محدود من الدول في تأمين المواد اللازمة. وقد يساعد الابتكار وكفاءة الاستهلاك وإعادة التدوير والاقتصاد الدائري في تقليل المخاوف المرتبطة بصعوبة تأمين الخامات والمعادن، ولكن تقليل الطلب سيكون ضرورياً لضمان استقرار إمدادات هذه المواد على المدى الطويل.

يتعين على صنّاع السياسات دراسة الآثار الواسعة لإنتاج الهيدروجين على التنمية المستدامة لضمان نتائج إيجابية طويلة الأمد.

غالباً ما يُذكر مفهوم "الأمن البشري" باعتباره واحداً من الأسباب الجذرية لعدم الاستقرار الجيوسياسي. وحسبما نصت عليه خطة التنمية المستدامة لعام 2030 وأهداف التنمية المستدامة السبعة عشر للأمم المتحدة، فإن مفهوم الأمن البشري يوسع نطاق الأجندة الأمنية لتشمل تهديدات مثل الفقر والمرض، والتي قد تقوض السلام والاستقرار داخل الدول وفيما بينها. وتبعاً لطريقة تطويره، يمكن لإنتاج الهيدروجين أن يؤثر سلباً أو إيجاباً على نتائج التنمية المستدامة. على سبيل المثال، ومن المنظور الفني، لا يشكل الماء المطلوب لإنتاج الهيدروجين عائناً أمام انتشاره. ومع ذلك، فإن تغير المناخ يضاعف المخاطر المرتبطة بالمياه في المناطق التي يُنظر إليها حالياً كمواقع واعدة لإنتاج الهيدروجين. ويساهم الفهم الأوسع لطبيعة التهديدات متعددة الأبعاد ونقاط الضعف العالمية في توقع وتخفيف بعض المخاطر المترافقة مع نشر الهيدروجين على نطاق واسع.

تمتلك الحكومات اليوم فرصة فريدة لصياغة مشهد الهيدروجين، وتجنب عيوب الأنظمة الحالية، والتأثير على النتائج الجيوسياسية. صحيح أن التبنّي المتزايد لتقنيات إنتاج الهيدروجين سيعطل العديد من التحالفات والشراكات الاقتصادية والسياسية، إلا أن هذه المجموعة من التقنيات تتيح أيضاً - إذا ما تم تطبيقها بعناية وحذر - فرصة مهمة لإظهار القوى الإيجابية لهذا الاضطراب، وتعزيز السيادة الوطنية والإقليمية، وتحسين مستويات المرونة والتعاون. وقد تكون الخبرة المكتسبة من استخدام الوقود الأحفوري مفيدة مع تسارع السباق للحصول على الهيدروجين النظيف. ويمكن لصنّاع السياسات أيضاً الاستفادة من خبرات الرواد الأوائل في قطاع الهيدروجين وتطبيق ممارساتهم الناجحة. وقبل أي شيء آخر، سيكون التعاون الدولي ضرورياً لاستكشاف الجوانب المجهولة، وتخفيف المخاطر، والتغلب على العقبات في السنوات القادمة.

المراجع

- Abad, A.V. and P.E. Dodds (2020)**, "Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges", *Energy Policy*, Vol. 138, 111300.
- Adelphi**, International Alert, Woodrow Wilson International Center for Scholars, and European Union Institute for Security Studies (2015), *A New Climate for Peace: Taking Action on Climate and Fragility Risks*.
- ADNOC (2021a)**, "ADNOC and three Japanese companies to explore hydrogen and blue ammonia opportunities", Abu Dhabi National Oil Company, Abu Dhabi, www.adnoc.ae/en/news-and-media/press-releases/2021/adnoc-and-three-japanese-companies-to-explore-hydrogen-and-blue-ammonia-opportunities.
- ADNOC (2021b)**, "ADNOC and PETRONAS sign comprehensive strategic framework agreement", Abu Dhabi National Oil Company, Abu Dhabi, www.adnoc.ae/en/news-and-media/press-releases/2021/adnoc-and-petronas-sign-comprehensive-strategic-framework-agreement.
- ADNOC (2021c)**, "ADNOC and Korea's GS energy explore opportunities to grow Abu Dhabi's hydrogen economy and carrier fuel export position", Abu Dhabi National Oil Company, Abu Dhabi, www.adnoc.ae/en/news-and-media/press-releases/2021/adnoc-and-koreas-gs-energy-explore-opportunities.
- African Hydrogen Partnership (2019)**, *Green African Hydrogen Operational Planning*, www.afr-h2-p.com/documents, (accessed 13 January 2022).
- Agora (2021)**, *12 insights on hydrogen*, Agora Energiewende and Agora Industry, www.agora-energiewende.de/en/publications/12-insights-on-hydrogen-publication/.
- Amelang, S. (2020)**, "Europe vies with China for clean hydrogen superpower status", Clean Energy Wire, www.cleanenergywire.org/news/europe-vies-china-clean-hydrogen-superpower-status.
- Aramco (2020a)**, "Aramco completes its acquisition of a 70% stake in SABIC from the Public Investment Fund (PIF)", www.aramco.com/en/news-media/news/2020/saudi-aramco-completes-acquisition-of-70-percent-stake-in-sabic.
- Aramco (2020b)**, "World's first blue ammonia shipment opens new route to a sustainable future", www.aramco.com/en/news-media/news/2020/first-blue-ammonia-shipment.
- Argus (2021)**, "Oman signs land deal for new green hydrogen plant", www.argusmedia.com/en/news/2247165-oman-signs-land-deal-for-new-green-hydrogen-plant.
- Atchison, J. (2021)**, "Ammonia infrastructure: panel wrap-up from the 2020 Ammonia Energy Conference", 22 January, www.ammoniaenergy.org/articles/ammonia-infrastructure/.
- Bataille, C. et al. (2021)**, *Global Facility Level Net-Zero Steel Pathways: Technical Report on the First Scenarios of the Net-Zero Steel Project*, Institute for Sustainable Development and International Relations, Paris, http://netzerosteel.org/wp-content/uploads/pdf/net_zero_steel_report.pdf.
- Bauer, C. et al. (2021)**, *On the climate impacts of blue hydrogen production*. <https://doi.org/10.33774/CHMRXIV-2021-HZ0QP>.
- Beswick, R.R., A.M. Oliveira and Y. Yan (2021)**, "Does the green hydrogen economy have a water problem?", *ACS Energy Letters*, Vol. 6, No. 9, pp. 3167-3169.
- Black, R. et al. (2021)**, *Taking Stock: A global assessment of net zero targets*, Energy & Climate Intelligence Unit and Oxford Net Zero, London.
- Blanco, H. (2021)**, "Hydrogen production in 2050: How much water will 74 EJ need?" *Energy Post*, <https://energypost.eu/hydrogen-production-in-2050-how-much-water-will-74ej-need/>.
- BloombergNEF (2021a)**, *New Energy Outlook 2021*, Bloomberg New Energy Finance, London.
- BloombergNEF (2021b)**, *2H 2021 Hydrogen Market Outlook: China Drives a Gigawatt*, Bloomberg New Energy Finance, London.

BloombergNEF (2021c), *Decarbonizing Steel: A Net Zero Pathway*, Bloomberg New Energy Finance, London.

BloombergNEF (2021d), *Green Hydrogen to Start Undercutting Blue by Mid-2020s*, Bloomberg New Energy Finance, London.

BMW (2021), "Minister Altmaier: 'Making further progress on international market ramp-up for green hydrogen'", Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action, Press Release, 14 June, www.bmw.de/Redaktion/EN/Pressemitteilungen/2021/06/20210614-new-funding-instrument-h2global-launched.html, (accessed 13 January 2022).

Bogdanov, D., M. Child and C. Breyer (2019), "Reply to 'Bias in energy system models with uniform cost of capital assumption'", *Nature Communication*, Vol. 10, 4587, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12469-y>.

Bond, K. et al. (2021), *Reach for the sun: The emerging market electricity leapfrog*, Carbon Tracker.

Bowen, J. (2021), *Fuelling Cooperation: The Indo-Pacific Hydrogen Transformation*, Perth USAsia Center.

BP (2021), Statistical Review of World Energy 2021, BP, London, www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf.

Brasington, L. (2019), "Hydrogen in China" Cleantech Group, www.cleantech.com/hydrogen-in-china/.

Brisbane Times (2021), "Fortescue unveils plan for world-leading green hydrogen hub in Qld", 10 October, www.brisbanetimes.com.au/ (subscription required).

Bullard, N. (2021), "A gigafactory for hydrogen could be a game changer", Bloomberg, www.bloomberg.com/news/articles/2021-07-01/a-gigafactory-for-hydrogen-could-be-a-game-changer, (subscription required).

CAFCP (2018), *The California Fuel Cell Revolution*, California Fuel Cell Partnership, July, p. 24.

Caglayan, D.G. et al. (2020), "Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No.11, pp. 6793-6805.

Caldera, U., and C. Breyer (2017), "Learning curve for seawater reverse osmosis desalination plants: Capital cost trend of the past, present, and future", *Water Resources Research*, Vol. 53, No. 12, pp. 10523-10538.

CARB (2019), *2019 Annual Evaluation of Fuel Cell Electric Vehicle Deployment & Hydrogen Fuel Station Network Development*, California Air Resources Board, July, p. 89.

Chilean Ministry of Energy (2020a), *National Green Hydrogen Strategy*, Government of Chile, Santiago, https://energia.gob.cl/sites/default/files/national_green_hydrogen_strategy_-_chile.pdf.

Chilean Ministry of Energy (2020b), "Chile 2020: Green Hydrogen Summit - Highlights", Government of Chile, Santiago, https://energia.gob.cl/sites/default/files/giz_green_hydrogen_summit.pdf.

Collins, L. (2021a), "Green hydrogen now cheaper to produce than grey H2 across Europe due to high fossil gas prices", *Recharge*, www.rechargenews.com/energy-transition/green-hydrogen-now-cheaper-to-produce-than-grey-h2-across-europe-due-to-high-fossil-gas-prices/2-1-1098104.

Collins, L. (2021b), "New 10GW green hydrogen project in Mauritania could include Africa's first offshore wind farm", *Recharge*, www.rechargenews.com/energy-transition/new-10gw-green-hydrogen-project-in-mauritania-could-include-africas-first-offshore-wind-farm/2-1-1074316.

CSET (2021), *Outline of the People's Republic of China 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development and Long-Range Objectives for 2035*, Center for Security and Emerging Technology, Georgetown University, Washington, D.C., https://cset.georgetown.edu/wp-content/uploads/t0284_14th_Five_Year_Plan_EN.pdf.

CSIS (2021a), *Hydrogen Economy Roadmap of Korea*, Center for Strategic and International Studies, www.csis.org/analysis/south-koreas-hydrogen-industrial-strategy.

CSIS (2021b), *Japan's hydrogen industrial strategy*, Center for Strategic and International Studies, www.csis.org/analysis/japans-hydrogen-industrial-strategy.

den Ouden, B., (2020), *A Hydrogen Exchange for the Climate*, Dutch Ministry of Economic Affairs and Climate Policy, www.government.nl/documents/reports/2020/09/24/a-hydrogen-exchange-for-the-climate.

E4Tech (2021), *The Fuel Cell Industry Review 2020*, www.fuelcellindustryreview.com, (accessed 13 January 2022).

Egli, F., B. Steffen, B. and T.S. Schmidt (2019), Bias in energy system models with uniform cost of capital assumption. *Nature Communication*, Vol. 10, 4588. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12468-z>.

EIA (n.d.), "Europe Brent spot price FOB (dollars per barrel)", Energy Information Administration, Washington, D.C., www.eia.gov/dnav/pet/hist/rbrteD.htm.

Ember (n.d.-a), "China was the only G20 country to see large increase in coal generation in 2020", <https://ember-climate.org/global-electricity-review-2021/g20-profiles/china/>.

Ember (n.d.-b), "India's wind and solar generation tripled since 2015", <https://ember-climate.org/global-electricity-review-2021/g20-profiles/india/>.

Emirates News Agency, 2021. "UAE announces Hydrogen Leadership Roadmap, reinforcing Nation's commitment to driving economic opportunity through decisive climate action", www.wam.ae/en/details/1395302988986, (accessed 13 January 2022).

Energy Charter Secretariat (2007), "Putting a price on energy: International pricing mechanisms for oil and gas". Energy Charter Treaty, Brussels. www.energycharter.org/what-we-do/trade-and-transit/trade-and-transit-thematic-reports/putting-a-price-on-energy-international-pricing-mechanisms-for-oil-and-gas-2007/.

Energy Transition Commission (2021), Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy, The Making Mission Possible Series, ETC, www.energy-transitions.org/publications/making-clean-hydrogen-possible/.

Energy Voice (2021), "CWP signs \$40bn MoU with Mauritania on green hydrogen", 31 May, www.energyvoice.com/renewables-energy-transition/hydrogen/africa-hydrogen/326911/cwp-mou-mauritania-hydrogen/.

Engineering News (2021), "Namibia selects preferred bidder for pioneering \$9.4bn green hydrogen project", 5 November, www.engineeringnews.co.za/article/namibia-may-launch-second-green-hydrogen-bidding-process-in-early-2022-2021-11-23.

Equinor and OGE (2019), *The potential of hydrogen for decarbonization of German industry*, Equinor and Open Grid Europe, www.equinor.com/content/dam/statoil/documents/climate-and-sustainability/H2morrow-The%20Potential-of-Hydrogen-for-Decarbonization-of-German-Industry.pdf.

European Commission (2021), *The European economic and financial system: fostering openness, strength and resilience*, 19 January, Brussels.

European Commission (2020a), *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*, 8 July, Brussels, https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf.

European Commission (2020b), *Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU: A Foresight Study*, Joint Research Centre, European Commission, Brussels, <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42881>.

European Commission (2019), "Fertilisers in the EU: Prices, trade, and use", *EU Agricultural Market Briefs*, No. 15, June, https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/food-farming-fisheries/farming/documents/market-brief-fertilisers_june2019_en.pdf.

FAO (2020), *The State of Food and Agriculture 2020. Overcoming water challenges in agriculture*, Food and Agriculture Organization, Rome, <https://doi.org/10.4060/cb1447en>.

FCH JU (2014), *Study on Development of Water Electrolysis in the EU*, Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, [www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCHJUElectrolysisStudy_FullReport%20\(ID%20199214\).pdf](http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCHJUElectrolysisStudy_FullReport%20(ID%20199214).pdf).

FCH JU (n.d.), *Discover New FCH JU Project Big Hit: Orkney Islands- A Model Hydrogen Territory*, Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking. www.fch.europa.eu/news/discover-new-fch-ju-project-big-hit-orkney-islands-model-hydrogen-territory.

Field, R. A., and R.G. Derwent (2021), "Global warming consequences of replacing natural gas with hydrogen in the domestic energy sectors of future low-carbon economies in the United Kingdom and the United States of America", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 58, pp. 30190-30203.

Financial Times (2021), "The race to scale up green hydrogen", Financial Times, 8 March, www.ft.com/content/7eac54ee-f1d1-4ebc-9573-b52f87d00240, (accessed 13 January 2022).

Fitchratings (2021), *Climate Change "Stranded Assets" Are a Long-Term Risk for Some Sovereigns*, 15 February, www.fitchratings.com/research/sovereigns/climate-change-stranded-assets-are-long-term-risk-for-some-sovereigns-15-02-2021.

Fraunhofer ISE (2020), "HySpeedInnovation: A joint action plan for innovation and upscaling in the field of water electrolysis technology", www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/News/Position-Paper-HySpeedInnovation.pdf.

Fund for Peace (2021), *Fragile States Index Annual Report 2021*, Fund for Peace, Washington, D.C., <https://fragilestatesindex.org/wp-content/uploads/2021/05/fsi2021-report.pdf>.

Gas for Climate (2021a), *Extending the European Hydrogen Backbone*, <https://gasforclimate2050.eu/sdm-downloads/extending-the-european-hydrogen-backbone/>.

Gas for Climate (2021b), *Market State and Trends in Renewable and Low-Carbon Gases in Europe*, www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2021/12/Gas-for-Climate-Market-State-and-Trends-report-2021.pdf.

Geingob, H. G. (2021), "Namibia is poised to become the renewable energy hub of Africa", World Economic Forum, 3 October, www.weforum.org/agenda/2021/10/namibia-is-positioned-to-become-the-renewable-energy-hub-of-africa/.

Ghosh, A. and S. Chhabra (2021), *Speed and Scale for Disruptive Climate Technologies: Case for a Global Green Hydrogen Alliance*, GCF-CEEW Report, Global Challenges Foundation, Stockholm.

GIE & Guidehouse (2021), "Picturing the value of underground gas storage to the European hydrogen system", June, www.gie.eu/gie-presents-new-study-picturing-the-value-of-underground-gas-storage-to-the-european-hydrogen-system/.

Gielen, D. et al. (2021), "EU's carbon border adjustment mechanism lacks the detail to drive industry's relocation near clean energy", *Energy Post*, 15 June, <https://energypost.eu/eus-carbon-border-adjustment-mechanism-lacks-the-detail-to-drive-industrys-relocation-near-clean-energy/>.

Gielen, D. et al. (2020), "Renewables-based decarbonization and relocation of iron and steel making: A case study", *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 24, No. 5, pp. 1113-25.

Glaeser, E. L. and J.E. Kohlhase (2004), "Cities, regions and the decline of transport costs", in *Fifty Years of Regional Science*, pp. 197-228, Springer, Berlin, Heidelberg.

Gobierno de Chile (2020), "Estrategia Nacional De Hidrógeno Verde [National Green Hydrogen Strategy]", November, https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf.

Godula-Jopek, A. (2015), "Introduction", in *Hydrogen Production by Electrolysis*, pp. 15, Wiley-VCH, Weinheim.

Goldman Sachs (2020), *Green Hydrogen: The Next Transformational Driver of the Utilities Industry*, Goldman Sachs, New York, 22 September, www.goldmansachs.com/insights/pages/gs-research/green-hydrogen-report.pdf.

Government of Australia (2021), "Future hydrogen industry to create jobs, lower emissions and boost regional Australia", Media release, www.minister.industry.gov.au/ministers/taylor/media-releases/future-hydrogen-industry-create-jobs-lower-emissions-and-boost-regional-australia.

Government of Australia (2019), *Australia's National Hydrogen Strategy*, www.industry.gov.au/data-and-publications/australias-national-hydrogen-strategy.

Government of Canada (2020), *Canada's Hydrogen Opportunity*, p. 86.

Government of Namibia (2021), "Pillar 2: Economic advancement. Activity 2: Investigate the feasibility of green hydrogen and ammonia as a transformative strategic industry", <https://hppl.gov.na/activities/activity-2-investigate-the-feasibility-of-green-hydrogen-and-ammonia-as-a-transformative-strategic-industry/>.

GreenInfo Network and Global Energy Monitor, (2021), https://greeninfo-network.github.io/fossil_tracker/ (accessed 13 January 2022).

Grimm, V. and K. Westphal (2021), "The focus on green hydrogen slows down climate protection," SWP Point of View, www.swp-berlin.org/en/publication/climate-purists-only-want-green-hydrogen-that-is-a-mistake, (accessed 13 January 2022).

Grinschgl, J., J.M. Pepe and K. Westphal (2021), "Eine neue Wasserstoffwelt: Geotechnologische, geoökonomische und geopolitische Implikationen für Europa", [A new hydrogen world: geotechnological, geoeconomic and geopolitical implications for Europe], SWP Aktuell, 8 December.

H2Atlas Africa (2021), *Atlas of green hydrogen generation potentials in Africa*, www.h2atlas.de (accessed 13 January 2022).

Harding, R. (2019), "Japan launches first liquid hydrogen carrier ship", *Financial Times*, 11 December, www.ft.com/content/8ae16d5e-1bd4-11ea-97df-cc63deld73f4, (subscription required).

HELIOS (n.d.), "Fostering cleaner energy for our planet", www.heliosindustry.com/project/.

Howarth, R.W. and M.Z. Jacobson (2021), "How green is blue hydrogen?" *Energy Science & Engineering*, Vol. 9, Issue 10, pp. 1676-1687, <https://doi.org/10.1002/ESE3.956>.

Hydrogen Council (2021), *Hydrogen for Net Zero: A Critical Cost-Competitive Energy Vector*, https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/11/Hydrogen-for-Net-Zero_Full-Report.pdf.

HyTechCycling (2020), *Assessment of critical materials and components in FCH technologies*, <http://hytechcycling.eu/wp-content/uploads/d2-1-assessment-of-critical-materials-den-components-in-fch-technologies.pdf>.

Iberdrola (n.d.), "Iberdrola builds the largest green hydrogen plant for industrial use in Europe", www.iberdrola.com/about-us/lines-business/flagship-projects/puertollano-green-hydrogen-plant.

IEA (2021a), *Net Zero by 2050, A Roadmap for the Global Energy Sector*, International Energy Agency, Paris, https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf.

IEA (2021b), *Methane Tracker 2021 – Analysis*, IEA, Paris, www.iea.org/reports/methane-tracker-2021.

IEA (2021c), *Global Hydrogen Review 2021*, IEA, Paris, www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021.

IEA (2021d), "Could the green hydrogen boom lead to additional renewable capacity by 2026?", IEA, Paris, 1 December, www.iea.org/articles/could-the-green-hydrogen-boom-lead-to-additional-renewable-capacity-by-2026.

IEA (2021e), *Global EV Outlook 2021*, IEA, Paris, www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021.

IEA (2021f), *World Energy Outlook 2021*, IEA, Paris, www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021.

IEA (2021g), *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, IEA, Paris.

IEA (2020), *World Energy Outlook 2020*, IEA, Paris, www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020.

IEA (2019a), *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities*, IEA, Paris.

IEA (2019b), *Africa Energy Outlook 2019 – World Energy Outlook Special Report*, IEA, Paris, www.iea.org/reports/africa-energy-outlook-2019.

IPCC, (2021), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

IRENA and ILO (2021), *Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2021*, International Renewable Energy Agency, International Labour Organization, Abu Dhabi, Geneva.

IRENA, IEA, REN21 (2020), *Renewable energy policies in a time of transition: Heating and cooling*, IRENA, Abu Dhabi.

IRENA INSPIRE webtool (2021), <http://inspire.irena.org/Pages/home.aspx> (accessed 13 January 2022).

IRENA (forthcoming-a), *Global hydrogen trade to meet the 1.5 °C climate goal: Part II – Technology review of hydrogen carriers*, IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (forthcoming-b), *Green hydrogen for industry: A guide to policy making*, IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2021a), *World Energy Transitions Outlook*, IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2021b), *Green Hydrogen Supply: A Guide to Policy Making*, IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2021c), *Renewable Power Generation Costs in 2020*, IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2021d), *A pathway to decarbonise the shipping sector by 2050*, IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2021e), "Majority of new renewables undercut cheapest fossil fuel on cost", 22 June, www.irena.org/newsroom/pressreleases/2021/Jun/Majority-of-New-Renewables-Undercut-Cheapest-Fossil-Fuel-on-Cost.

IRENA (2020a), *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal*, IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2020b), *Green Hydrogen: A Guide to Policy Making*, IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2020c), *Energy subsidies: Evolution in the global energy transformation to 2050*, IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2019a), *A New World: The Geopolitics of the Energy Transformation*, IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2019b), *Renewable Energy Market Analysis: GCC 2019*, IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2018a), *Renewable Power-To-Hydrogen - Innovation Landscape Brief*, IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2018b), *Water Use in India's Power Generation: Impact of Renewables and Improved Cooling Technologies to 2030*, IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2016a), *A Path to Prosperity: Renewable Energy for Islands*, IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2016b), *Water Use in China's Power Sector: Impact of Renewables and Cooling Technologies to 2030*, IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2015), *Renewable Energy in the Water, Energy and Food Nexus*, IRENA, Abu Dhabi.

Jaffe, A.M. and R. Soligo (2006), "Market Structure in the New Gas Economy: Is Cartelisation Possible?" *In Natural Gas and Geopolitics: From 1970 to 2040*, pp. 439-464, Cambridge University Press, New York.

Japan Ministry of Environment (2020), *Summary of Japan's hydrogen strategy*, www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/Summary_of_Japan's_Hydrogen_Strategy.pdf.

Keohane, R.O. and J.S.Nye (2001), *Power and Interdependence* (3rd ed.), Longman, New York.

Khalili S., (2019), "Global Transportation Demand Development with Impacts on the Energy Demand and Greenhouse Gas Emissions in a Climate-Constrained World", *Energies*, Vol. 12, No. 20, 3870. <https://doi.org/10.3390/en12203870>.

Kiemel, S., et al. (2021), "Critical materials for water electrolyzers at the example of the energy transition in Germany", *International Journal of Energy Research*, Vol. 45(7), pp. 9914-9935.

Kleen, G. and E. Padgett (2021), *Durability-adjusted fuel cell system cost*, US Department of Energy, 8 January, www.hydrogen.energy.gov/pdfs/21001-durability-adjusted-fcs-cost.pdf.

The Korea Herald (2019), "S. Korea to build 3 hydrogen-powered cities by 2022", 10 October, www.koreaherald.com/view.php?ud=20191010000806, (accessed 13 January 2022).

Koyama, K. (2021), "China replaced Japan as world's largest LNG importer in 1st half of 2021: A Japanese perspective on the international energy landscape," 26 July, Institute of Energy Economics, Japan.

La Repubblica (2021), "Snam, Alverà guarda al futuro: dalla Gigafactory allo stoccaggio" [Snam, Alverà looks to the future: From Gigafactory to storage], https://finanza.repubblica.it/News/2021/11/29/snam_alvera_guarda_al_futuro_dalla_gigafactory_allo_stoccaggio-101/.

Longden, T., et al. (2022), "'Clean' hydrogen? - Comparing the emissions and costs of fossil fuel versus renewable electricity based hydrogen", *Applied Energy*, Vol. 306, Part B, 118145, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921014215#s0010.

Lovins, A. (2021a), "Profitably decarbonizing heavy transport and industrial heat: transforming these 'harder-to-abate' sectors is not uniquely hard and can be lucrative", RMI Innovation Center, Basalt, CO, www.rmi.org/profitable-decarb/.

Lovins, A. (2021b), "Decarbonizing our toughest sectors - profitably", *MIT Sloan Management Review*, 4 August, <https://sloanreview.mit.edu/article/decarbonizing-our-toughest-sectors-profitably/>.

Ludwig, M., (2021), The Green Tech Opportunity in Hydrogen, April 12, www.bcg.com/en-in/publications/2021/capturing-value-in-the-low-carbon-hydrogen-market.

Mander, B. (2020), "Chile seeks to turn solar boom into green hydrogen bonanza", *Financial Times*, 31 August, www.ft.com/content/16481d72-1495-4b24-9c59-97ea9a856cc1. (subscription required).

McWilliams, B. and G. Zachmann (2021), "A new economic geography of decarbonisation?" Bruegel, 8 November, www.bruegel.org/2021/11/a-new-economic-geography-of-decarbonisation/#:~:text=The%20interactive%20map%20allows%20users,encouraged%20to%20experiment%20for%20themselves.

MEM (2021), Green Hydrogen Roadmap, Ministry of Energy, Mining, and Environment, Government of Morocco, www.mem.gov.ma/Lists/Lst_rapports/Attachments/36/Feuille%20de%20route%20de%20hydrog%C3%A8ne%20vert.pdf.

METI (2017), *Basic hydrogen strategy*, Ministry of Economy, Trade and Industry, Government of Japan, 26 December, www.meti.go.jp/english/press/2017/pdf/1226_003b.pdf. (accessed 13 January 2021).

Minke, C. et al. (2021), "Is iridium demand a potential bottleneck in the realisation of large-scale PEM water electrolysis?", *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 46, Issue 46, pp. 23581-23590.

Mission Possible Partnership (2021), *Net Zero Steel: Sector Transition Strategy*, October 2021.

MOEF (2020), *Korea's green new deal*, Ministry of Economy and Finance, www.greencclimate.fund/sites/default/files/event/koreas-green-new-deal-moef-international-conference-green-new-deal.pdf.

Moya Rivera, J. and A. Boulamanti (2016), *Production Costs from Energy Intensive Industries in the EU and Third Countries*, EUR 27729, JRC100101, Publications Office of the European Union, Luxembourg, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7e4fe297-084c-11e6-b713-01aa75ed71a1/language-en>.

Muttitt, G. et al. (2021), *Step off the gas: International public finance, natural gas and clean alternatives in the Global South*, International Institute for Sustainable Development, June.

Nagashima, M. (2018), *Japan's hydrogen strategy and its economic and geopolitical implications*, French Institute of International Relations (IFRI), October, www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/nagashima_japan_hydrogen_2018_.pdf.

Niermann, M. et al. (2019), "Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs)-techno-economic analysis of LOHCs in a defined process chain", *Energy and Environmental Science*, Vol. 12, No. 1, pp. 290-307.

Open Grid Europe (2021), *H2morrow: Act today to be greenhouse gas neutral by 2050*, <https://oge.net/en/us/projects/our-hydrogen-projects/h2morrow>.

Patonia, A. (2021), "Hydrogen: Savior or boondoggle for Russia?" 18 August, www.gmfus.org/news/hydrogen-savior-or-boondoggle-russia.

Paulsson, L. and M. Durisin (2021), "Energy crunch hits pig slaughter and fertilizers in risk to food", *Bloomberg*, 17 September, www.bloomberg.com/news/articles/2021-09-17/europe-s-energy-woes-hit-fertilizers-in-another-threat-to-food. (subscription required).

Philibert, C. (2017), *Renewable Energy for Industry: From Green Energy to Green Materials and Fuels*, IEA Insights Series, OECD/IEA, Paris, https://iea.blob.core.windows.net/assets/48356f8e-77a7-49b8-87de-87326a862a9a/Insights_series_2017_Renewable_Energy_for_Industry.pdf.

Platinum Matthey, (n.d.), <http://www.platinum.matthey.com/prices/price-charts>.

Pollard, S. (1981), *Peaceful Conquest: The Industrialization of Europe - 1760-1970*, Oxford University Press, Oxford.

Port of Rotterdam Authority (2020), "Hydrogen vision", 7 May, www.portofrotterdam.com/sites/default/files/2021-06/hydrogen-vision-port-of-rotterdam-authority-may-2020.pdf.

Piria, R. et al. (2021), "Critical review of the IPHE working paper 'Methodology for determining the GHG emissions associated with the production of hydrogen'", Adelphi and Öko Institut e.V., www.adelphi.de. (accessed 13 January 2022).

Prinzhofer, A., C.S.T. Cissé and A.B. Diallo (2018), "Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali)", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 42, pp. 19315-19326.

- Radowitz, B. (2021)**, "Germany eyes world's cheapest green hydrogen from Namibia amid global 'race for best sites'", *Recharge News*, 25 August.
- Ram M. et al. (2020)**, *Powerfuels in a Renewable Energy World - Global volumes, costs, and trading 2030 to 2050*, LUT University and Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Lappeenranta, Berlin.
- Ratcliffe, V., S. El Wardany and M. Martin (2020)**, "Saudi Arabia aims next to be largest hydrogen exporter", *Bloomberg*, 18 November, www.bloombergquint.com/business/biggest-in-oil-saudis-aim-next-to-be-largest-hydrogen-exporter.
- Ratcliffe, V., S. Kim and K. Park (2021)**, "Saudi Arabia to ship gas to South Korea and take CO₂ back", *Bloomberg*, 3 March, www.bloomberg.com/news/articles/2021-03-03/saudi-arabia-to-ship-gas-to-south-korea-and-take-back-the-co2, (subscription required)
- Recharge News (2021a)**, "Modi pledges massive green hydrogen 'quantum leap' to Indian energy independence", 16 August, www.rechargenews.com/energy-transition/modi-pledges-massive-green-hydrogen-quantum-leap-to-indian-energy-independence/2-1-1052701.
- Recharge News (2021b)**, "'Our largest energy source': South Korea plans 40 foreign hydrogen bases to meet vast future demand", 1 December, www.rechargenews.com/energy-transition/our-largest-energy-source-south-korea-plans-40-foreign-hydrogen-bases-to-meet-vast-future-demand/2-1-1110526.
- Recharge News (2021c)**, "New 10GW green hydrogen project in Mauritania could include Africa's first offshore wind farm", 28 September, www.rechargenews.com/energy-transition/new-10gw-green-hydrogen-project-in-mauritania-could-include-africas-first-offshore-wind-farm/2-1-1074316.
- Reuters (2021)**, "Deutsche Boerse's EEX to launch hydrogen index in 2022", www.reuters.com/business/sustainable-business/exclusive-deutsche-boerses-eex-launch-hydrogen-index-2022-2021-11-24/.
- RIA Novosti (2021)**, "Не только газ: Россия нашла новый способ заработать на Европе" [Not only gas: Russia has found a new way to make money on Europe], <https://ria.ru/20210505/vodorod-1729501925.html>.
- Ritchie, H. (2017)**, "How many people does synthetic fertilizer feed?", *Our World in Data*, 7 November, <https://ourworldindata.org/how-many-people-does-synthetic-fertilizer-feed>, updated 30 April 2020.
- Romer, R. (2011)**, "Fuel cell systems provide clean backup power in telecom applications worldwide," *2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, pp. 1-2, doi: <https://doi.org/10.1109/INTLEEC.2011.6099732>.
- Roos, T. and J. Wright (2021)**, *Powerfuels and Green Hydrogen*, EU-South Africa, www.euchamber.co.za/wp-content/uploads/2021/02/Powerfuels-Summary-Report-South-Africa-EU-SA_Partners-for-Growth-Final-28-Jan-2021.pdf.
- The Russian Government (2021)**, "Agenda: Draft hydrogen energy development concept, federal support for the regions", <http://government.ru/en/news/42970/>, (accessed 13 January 2022).
- Rystad Energy RenewableCube, (2021)**, "Green hydrogen projects will stay dry without a parallel desalination market to provide fresh water", Press Release, September 27, www.rystadenergy.com/newsevents/news/press-releases/green-hydrogen-projects-will-stay-dry-without-a-parallel-desalination-market-to-provide-fresh-water, (accessed 13 January 2022).
- S&P Global (n.d.)**, *Hydrogen Price Assessments*, S&P Global Platts, London.
- Saunois, M. et al. (2016)**, "The global methane budget 2000-2012", *Earth System Science Data*, Vol. 8, No. 2, pp. 697-751. <https://doi.org/10.5194/essd-8-697-2016>.
- De Sisternes J., J. Fernando and C.P. Jackson (2020)**, *Green Hydrogen in Developing Countries*, World Bank Group, Washington, D.C., <http://documents.worldbank.org/curated/en/953571597951239276/Green-Hydrogen-in-Developing-Countries>.
- Smith, A. (1776)**, *The Wealth of Nations*, W. Strahan and T. Cadell, London.
- Smolinka, T., M. Günther and J. Garche (2011)**, *Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien [Status and development potential of electrolysis for the production of hydrogen from renewable energy]*, Fraunhofer ISE, www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/now-studie-wasserelektrolyse-2011.pdf.

Smyth, J. (2021), "Green groups fume as Canberra rejects world's biggest renewables project", *Financial Times*, 21 June, (accessed 13 January 2022).

Steinberger-Wilckens, R. et al. (Eds.) (2017), *The Role of Hydrogen and Fuel Cells in Delivering Energy Security for the UK*, H2FC Supergen, London.

Strategy Advisory Committee of the Technology Roadmap and the Society of Automotive Engineers of China (SAE-China) (2016), Hydrogen Fuel Cell Vehicle Technology Roadmap, https://static1.squarespace.com/static/5b7d93fe0dbda3ea011485b9/t/5d93c88ef490cb28e94bd655/1569966226975/FCV+Tech+Roadmap_China.pdf.

Systemiq (2020), *The Paris Effect: How the Climate Agreement is Reshaping the Global Economy*, https://www.systemiq.earth/wp-content/uploads/2020/12/The-Paris-Effect_SYSTEMIQ_Full-Report_December-2020.pdf.

Thapliyal, D. (2021), "Fertilizers and the cross-commodity impact of record high gas prices", Independent Commodity Intelligence Services, www.icis.com/explore/resources/news/2021/10/05/10686659/topic-page-fertilizers-in-the-cross-commodity-impact-of-record-high-gas-prices.

UCL (n.d.), "Economic rents", University College London, www.ucl.ac.uk/bartlett/public-purpose/research/economic-rents.

UN Comtrade (2021), <https://comtrade.un.org/data>.

UN General Assembly (2009), *Climate change and its possible security implications. Report of the Secretary-General*, 11 September United Nations, New York.

UN (2019), *World Population Prospects 2019*, United Nations, New York.

UNCTAD, (2020), *Review of Maritime Transport*, 2020, United Nations Conference on Trade and Development, https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2020_en.pdf.

UNESCO (2021), *The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing Water*, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris.

UNFCCC (2021), "COP26 world leaders summit- statement on the breakthrough agenda", *UN Climate Change Conference UK 2021*, United Nations Framework Convention on Climate Change, <https://ukcop26.org/cop26-world-leaders-summit-statement-on-the-breakthrough-agenda/>.

US Congress (2021), *H.R.5376 – Build Back Better Act*, www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/5376/text.

Van de Graaf, T. and B.K. Sovacool (2020), *Global Energy Politics*, John Wiley & Sons.

van Wijk, A. and F. Wouters (2021), "Hydrogen–The Bridge Between Africa and Europe", in Weijnen M.P.C., Z. Lukszo and S. Farahani (Eds.) *Shaping an Inclusive Energy Transition*, Springer, Cham, https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-74586-8_5.

Verma, N. (2021), "India to require refiners, fertiliser plants to use some green hydrogen", *Reuters*, August 10, (accessed 13 January 2022).

Vortex (2021a), "Global annual average global horizontal irradiation", *IRENA Global Atlas*, <https://globalatlas.irena.org/workspace>.

Vortex (2021b), "Global annual average wind speed at 100 m height", *IRENA Global Atlas*, <https://globalatlas.irena.org/workspace>.

Wang, X. (2021), "Alkaline vs. PEM: Breaking electrolyzer technologies myths", 28 July, Bloomberg, (subscription required).

WEC (2021), "National hydrogen strategies", *World Energy Council*, London, www.worldenergy.org/assets/downloads/Working_Paper_-_National_Hydrogen_Strategies_-_September_2021.pdf.

Weidlich, B. (2021), "Namibia optimistic about new green hydrogen industry", 8 November, <https://namibian.org/news/economics/namibia-optimistic-about-new-green-hydrogen-industry>.

White, L.V. et al. (2021), "Towards emissions certification systems for international trade in hydrogen: The policy challenge of defining boundaries for emissions accounting", *Energy*, Vol. 215, 119139.

World Bank (n.d.-a), "GDP (current, US\$)", World Bank, Washington DC, <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD>.

World Bank (n.d.-b), "Energy imports, net (% of energy use), World Development Indicators." <https://data.worldbank.org/indicator/EG.IMP.CON.S.ZS>.

World Bank (n.d.-c), "Annual freshwater withdrawals, total (billion cubic meters)", <https://data.worldbank.org/indicator/ER.H2O.FWTL.K3>.

World Bank (n.d.-d), "Fertiliser consumption (kilograms per hectare of arable land)", <https://data.worldbank.org/indicator/AG.CON.FERT.ZS>.

World Energy Council (2021), *Hydrogen on the horizon: Hydrogen demand and cost dynamics*, World Energy Council, September 2021, www.worldenergy.org/publications/entry/working-paper-hydrogen-demand-and-cost-dynamics.

Zgonnik, V. (2020), "The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review", *Earth-Science Reviews*, Vol.203, 103140.



جيوسياسية تحول قطاع الطاقة عامل الهيدروجين

Access the publication
and Annex online:



www.irena.org

ISBN 978-92-9260-370-0