مؤسسة دبي للمستقبل
DUBAI FUTURE FOUNDATION

أبحاث دبي للمستقبل
DUBAI FUTURE RESEARCH

بالتعاون مع

الإمارات العربية المتحدة
وزارة الطاقة والبنية التحتية

الإمارات العربية المتحدة
وزارة التغير المناخي والبيئة

هيئة كهرباء ومياه دبي
Dubai Electricity & Water Authority

الهيدروجين

من الخيال إلى الحقيقة

DUBAIFUTURE.AE

نسخة 1.0

ينشر هذا التقرير بموجب ترخيص المشاع الإبداعي باستثناء النصوص أو الشعارات أو الصور التي تملكها جهات أخرى. يُسمح بنسخ محتوى التقرير وتوزيعه على أن تنسبه إلى مصدره الأصلي، وتبيّن إن أجريت عليه أي تغييرات، وتضيف رابطًا إلى الترخيص. يتوفر الترخيص على الرابط التالي:
creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ar

يستثني هذا الإشعار أيضًا على وجه التحديد العلامات التجارية لاسم مؤسسة دبي للمستقبل وشعارها من نطاق ترخيص المشاع الإبداعي.

الفهرس

1. الملخَّص **4**

2. نبذة عن الهيدروجين **15**

العنصر الأول

لمحة تاريخية

3. الأثر البيئي **19**

تغير المناخ

تهديد وشيك

التزامنا

الهيدروجين والعمل المناخي

4. أنواع الهيدروجين **26**

الهيدروجين الرمادي

الهيدروجين الأزرق

الهيدروجين الفيروزي

الهيدروجين الأخضر

الهيدروجين الأصفر

5. استخدامات الهيدروجين الحالية **32**

الاستخدامات الأولية

الأمونيا

تكرير النفط

6. استخدامات الهيدروجين المستقبلية **35**

إزالة الكربون من الصناعات الثقيلة

النقل الجوّي والبحري

تصدير الموارد الشمسية

تخزين الطاقة وتوليد الكهرباء

التغلُّب على التحديات

7. نقل الهيدروجين **42**

السلامة

التصديق والمعايير

المعايير

8. استراتيجيات الهيدروجين عالميّا **48**

9. مستقبل الهيدروجين في دولة الإمارات العربية المتحدة **57**

سيناريوهات سوق الطاقة العالمية

استراتيجيات الطلب المحلي على الهيدروجين

استراتيجيات تطوير قطاع تصدير الهيدروجين

10. الخاتمة والتوصيات **84**

ملحق: افتراضات تحليل الأثر **91**

المراجع **94**

شكر وتقدير **98**

1.

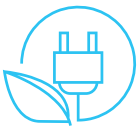
الملخَّـــص

أهمِّيَّة الهيدروجين

الهيدروجين مادة حاملة للطاقة تزداد قدرتنا على إنتاجها بأساليب نظيفة، ما يتيح للعالم مواصلة النمو الاقتصادي مع خفض التأثير السلبي على البيئة. ونشهد جميعًا كيف يتغير مناخ كوكبنا بوتيرة مقلقة نتيجة الانبعاثات الكربونية بشرية المنشأ، وتحاول معظم بلدان العالم الحد من هذه الانبعاثات، بالاتجاه إلى مصادر الطاقة النظيفة والمتجددة، خاصة بعد أن أصبحت ذات جدوى اقتصادية أعلى من نظيراتها الملوثة في كثير من المناطق. لكن مصادر الطاقة المتجددة المتوفرة حاليًا ما زالت محدودة الإمكانات، ولا سيَّما من ناحية قدرتها على توفير الطاقة للصناعة، وهنا يأتي دور الهيدروجين في تجاوز هذه المحدودية. وفي سياق سعي العالم لتصفير صافي الانبعاثات الكربونية، سيلعب الهيدروجين دور المكمّل لمصادر الطاقة الأخرى منخفضة أو منعدمة الكربون، فيصبح المكون الرئيس لمزيج الطاقة النظيفة لكوكبنا، لأنه سيمكننا خصوصاً من إزالة الكربون من الصناعات التي يصعب الاستغناء عنها، مثل الصلب والإسمنت والطيران والشحن.

الفرص

يُستخدم الهيدروجين حاليًا بشكل أساسي في إنتاج الأمونيا والميثانول عبر عملية الاصطناع الكيميائي، ويستخدم أيضًا في مصافي النفط، لخفض نسبة الكبريت في الوقود. وقد تبرز له عدد من الاستخدامات الجديدة نتيجة الجدوى المتزايدة لإنتاج الهيدروجين منخفض الكربون، ومنها:

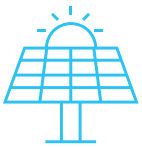


توفير الوصول إلى الطاقة النظيفة

بإمكان شركات إنتاج الطاقة الكهربائية تخزين الطاقة المستمدة من المصادر المتجددة في الهيدروجين وتصديره إلى البلدان التي تفتقر إلى مصادر الطاقة المتجددة.

تقليل انبعاثات الكربون في الصناعات الثقيلة

يمكن أن يلعب «الهيدروجين الأزرق»، أي المنتج بالاعتماد الغاز الطبيعي عبر امتصاص الكربون، و«الهيدروجين الأخضر»، المنتج بالكهرلة بالاعتماد على طاقة كهربائية مولدة بمصادر متجددة، دورًا رئيسًا في تخفيف البصمة الكربونية للصناعات الثقيلة عالية التلويث، مثل إنتاج الإسمنت والصلب، إذ يصعب أن توفر الطاقة الشمسية وطاقة الرياح الحرارة اللازمة لمثل هذه الصناعات.



تخزين الطاقة من مصادر الطاقة المتجددة

بإمكان شركات إنتاج الطاقة الكهربائية الاعتماد على الهيدروجين كوسيلة لتخزين الطاقة لدعم المصادر المتجددة المتقطِّعة مثل الطاقة الشمسية، بالإضافة إلى أنه يقدم ميزة إضافية تتمثل في قابليته للنقل. وهو يوفر درجة من الموثوقية والاستقرار تفتقر إليها مصادر الطاقة المتجددة الأخرى. صحيح أنَّ البطاريات ما زالت وسيلة تخزين الطاقة المفضلة لشبكات الطاقة، إلا أن لتخزينها في الهيدروجين مزايا عديدة أهمها أنه يخفض تكلفة تخزين الطاقة لفترات زمنية طويلة، ويزيد سهولة نقلها مقارنة بالبطاريات.

النقل الثقيل

تتيح تقنية خلايا الوقود الحالية للهيدروجين مدّ مجموعة واسعة من أنواع المركبات بالطاقة، وهي حاليًا ذات جدوى اقتصادية أعلى للمركبات الثقيلة والأقل مدى مثل الرافعات الشوكية والشاحنات المحلية. وسيتيح تطوير اقتصاد الهيدروجين لمجموعة واسعة من المركبات المنافسة اقتصاديًا مع البدائل الكهربائية ومحركات الاحتراق الداخلي.

استخدامات أخرى

تشمل الاستخدامات المستقبلية الأخرى التي تجرى الأبحاث عليها حاليًّا إزالة الكربون من الطيران والصناعات البحريَّة، بالاعتماد على خلايا وقود الهيدروجين والأمونيا والوقود الاصطناعي المشتق من الهيدروجين الأخضر.

التحديات

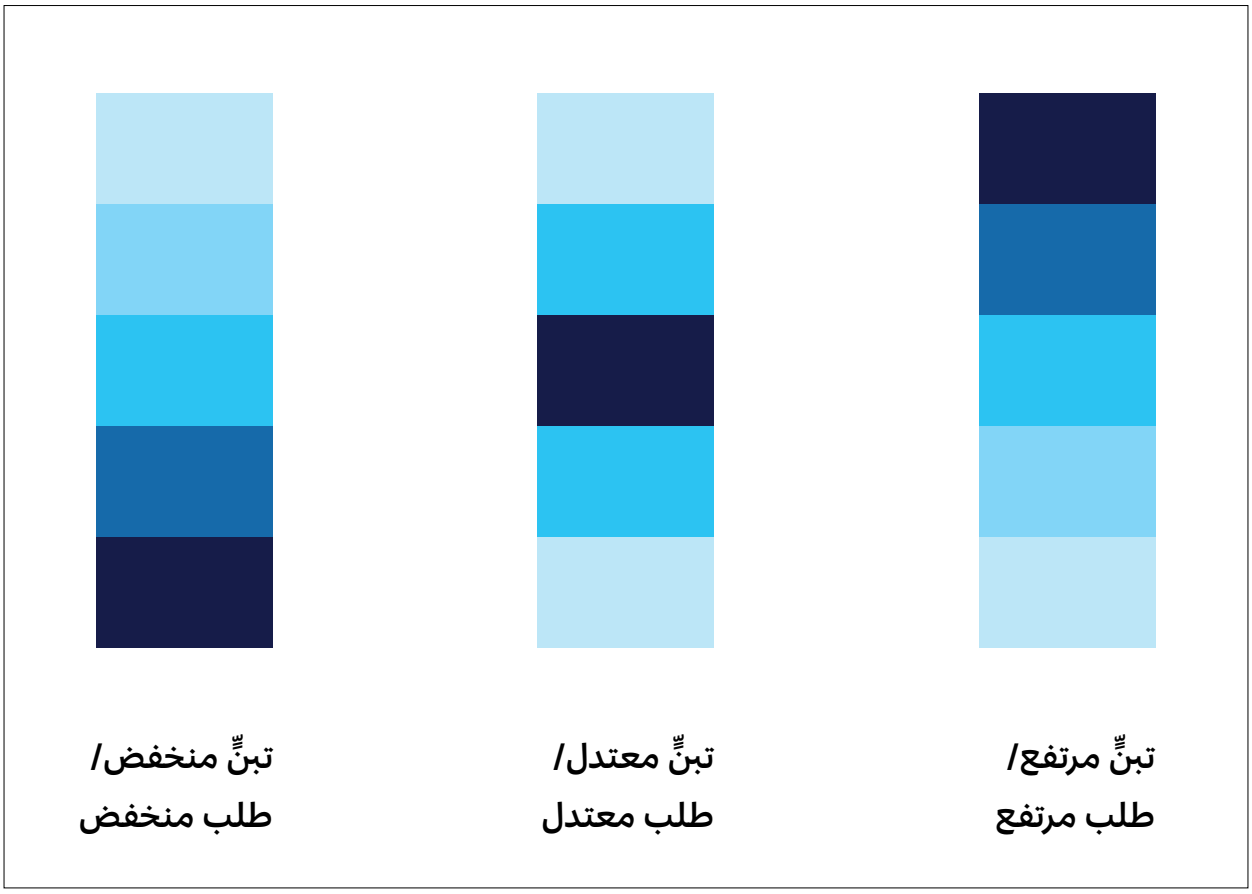
صحيح أن طاقة الهيدروجين عالية بدرجة ملفتة في وحدة الكتلة، إلا أن طاقته في وحدة الحجم أو ما يسمى كثافة الطاقة، منخفضة نسبيًا، خاصة عند مقارنتها بالوقود الكربوني مثل البنزين والديزل. لا يطرح ذلك مشكلة لاستخدامه في أماكن ساكنة، لكنه يشكِّل تحدّيًا عند الحاجة إلى نقل الهيدروجين للتصدير، أو عند استخدامه لتشغيل المركبات. وتشمل الحلول المطروحة حاليًا لمشكلة كثافة الطاقة الضغط والإسالة، لكن هذه الأساليب منخفضة الجدوى وتستهلك كمية ضخمة من الطاقة. ولهذا يعمل العلماء على تطوير مجموعة من الحلول الناشئة، وأهمها تخزين الهيدروجين كيميائيًّا في شكل هيدرات[1]، وهدرجة الجزيئات العضوية لاستخدامها كناقلات هيدروجين عضوية سائلة[2]، واستخدام الأمونيا كناقل للهيدروجين. أما التحديات الأخرى لاستخدام الهيدروجين فتشمل مخاوف السلامة واستدامة إنتاج الهيدروجين الأخضر، ولا بد من معالجتها كي يصبح الهيدروجين بديلًا فعليًا مفتوح الأفق للوقود الأحفوري.

اقتصاد الهيدروجين المستقبلي في دولة الإمارات العربية المتحدة

يجمع هذا التقرير الهادف إلى تطوير إطار عمل لفهم إمكانات اقتصاد الهيدروجين الإماراتي بين نمذجة البيانات ونهج السيناريو لحصر النتائج المحتملة وتقييمها:

سيناريوهات سوق الطاقة العالمية

تبنى هذه السيناريوهات على افتراضات أساسية مدمجة في نموذج كمّي للطلب الدولي على الهيدروجين وأسعاره. وينظر في كل من سيناريوهات السوق المحلي الثلاثة وسيناريوهات قطاع التصدير الأربعة من خلال ثلاثة سيناريوهات لسوق الطاقة الدولي:



تشمل المتغيرات التي تؤثر في النتيجة تسعير الكربون، والالتزامات بتصفير صافي الانبعاثات وامتصاص الهيدروجين ذاته.

استراتيجيات الطلب المحلي

تتطلب صياغة استراتيجية قطاع الهيدروجين في دولة الإمارات العربية المتحدة النظر في مجموعة من الخيارات لإدارة القطاع وتوجيه السوق المحلية. ويستفاد أيضًا من نماذج السياسات الصناعية الناجحة في بلدان أخرى في تشكيل تصورات إجماليّة عن أساليب تنمية قطاعات صناعية جديدة.

يغطي التقرير ثلاثة نماذج ممكنة لسوق الهيدروجين في دولة الإمارات العربية المتحدة:

الحديقة المسوَّرة

طريقة متشددة لتطوير سوق محلي كبير وآمن.

توازن التكاليف والفوائد

نهج متوازن يحافظ على بعض عناصر الحديقة المسوّرة على نطاق أصغر مع خفض مستوى التدخّل الحكومي.

التصدير فقط

نهج عدم التدخل الذي يقلص دور الدولة في إدارة الطلب المحلي.

استراتيجيات تنمية قطاع التصدير

تشمل المسارات الإستراتيجية لقطاع التصدير معايير محددة كميًّا، تشمل تحديد كميات الإنتاج المستهدفة، واختيار نوع الهيدروجين المنتج، وتحديد مستويات الاستثمار لتلبية أهداف الإنتاج، وتوقع الأسواق النهائية للهيدروجين المنتج في دولة الإمارات. وبناءً على هذه المعايير، أعدّت نماذج تنبؤ مختلفة للتأثير الاقتصادي والبيئي والاجتماعي على دولة الإمارات العربية المتحدة. وتتضمن الاستراتيجيات أيضًا تعديلات السياسة الخارجية اللازمة للوصول بتلك الاستراتيجيات إلى النجاح.

المنتِج والمركز

السعي إلى تحقيق أكبر حصة سوقية ممكنة لدولة الإمارات العربية المتحدة وتطويرها لتتبوأ مكانة المركز الابتكاري لهذه الصناعة.

التنسيق الإقليمي

إنشاء مجموعة هيدروجين على مستوى المنطقة بدلاً من الانخراط في منافسة مضرة بين دول مجلس التعاون الخليجي.

المنتج

تسخير موارد دولة الإمارات العربية المتحدة وعلاقاتها وموقعها لتطوير قطاع الهيدروجين إلى مرتبة منافسة دوليًا على مستوى مماثل لدول مجلس التعاون الخليجي.

الحل الأمثل

السعي إلى تقليل تعرض دولة الإمارات العربية المتحدة لخطر الخسارة عن طريق الحد من الاستثمار في قطاع الهيدروجين، مع اغتنام الفرص حيثما وجدت.

التوصيات

يجب الإقرار بأن التوصية بالاعتماد الدائم على الهيدروجين يرتبط بتوفر الأراضي والقيود اللوجستية والآثار المالية لدعم الطلب المحلي. ولهذا لا بد من إجراء دراسة تقنية اقتصادية مفصلة قبل التوصية باتباع مسار استراتيجي محدد في هذه المرحلة. أما مستقبلاً وبعد التخلص من هذه القيود، فإن المنفعة الكبرى لدولة الإمارات من اقتصاد الهيدروجين العالمي ستنتج عن إنشاء سوق تصدير قوي للهيدروجين المنتج محلياً، والذي يوصف في هذا التقرير بأنه تطوير استراتيجية قطاع التصدير «المنتِج والمركز»، وتنفيذ هذه الاستراتيجية أمر ممكن في ظل طلب عالمي ومحلي مرتفع أو معتدل على الهيدروجين. ويتوقع أن تضيف استراتيجية «المنتج والمركز» ما يصل إلى 32 مليار درهم سنويًا إلى الناتج المحلي الإجمالي لدبي بحلول عام 2050، وأن توفر أكثر من 120 ألف فرصة عمل من الآن وحتى عام 2050، وتعوِّض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بما يعادل 84 يومًا من استهلاك النفط الخام كل عام في دولة الإمارات بحلول عام 2050.

يضيف ما يصل إلى 32 مليار درهم

سنويًا إلى الناتج المحلي الإجمالي لدبي بحلول عام 2050

يوفّر أكثر من 120 ألف فرصة عمل

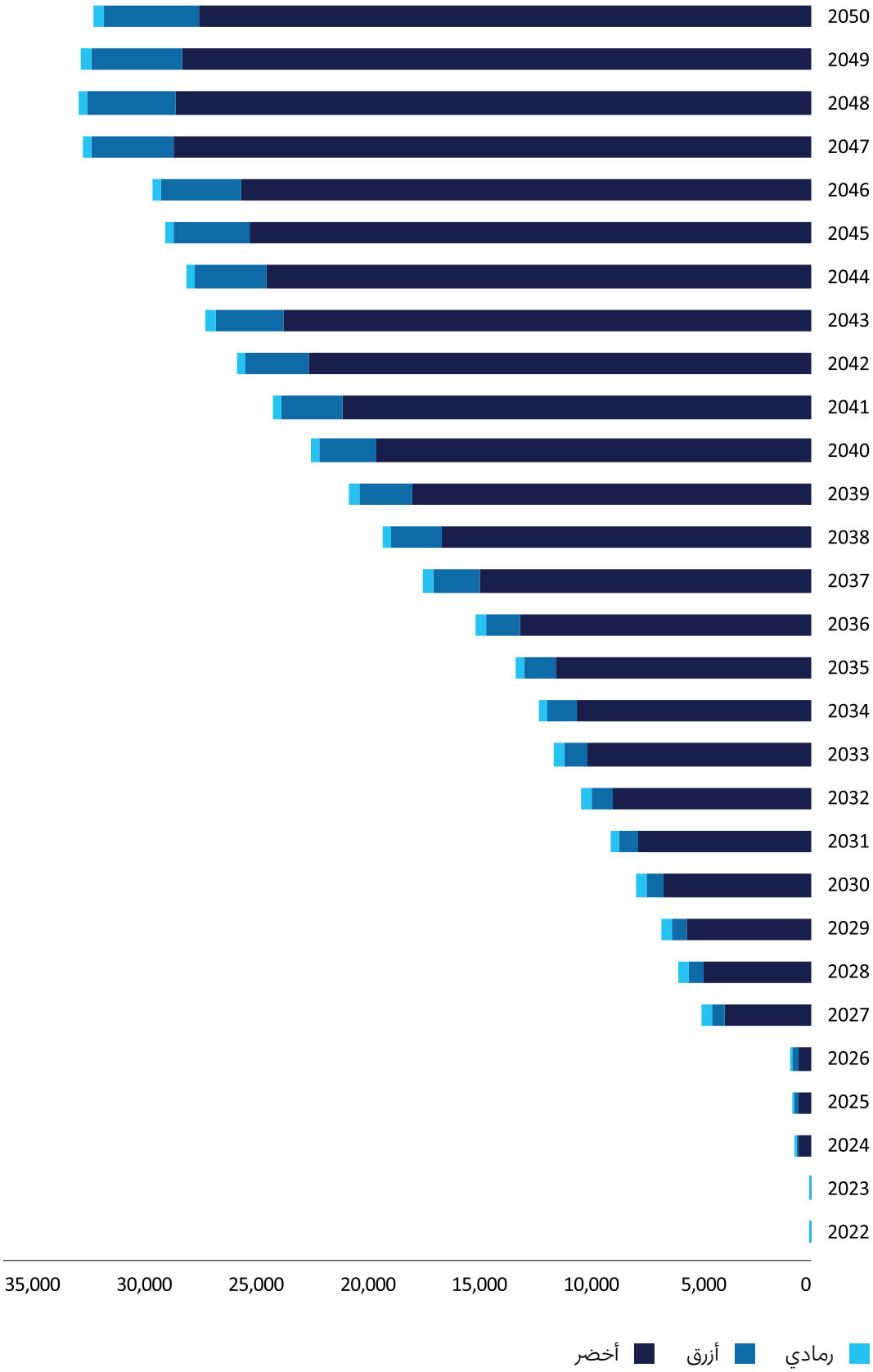
من الآن وحتّى عام 2050

يعوض إصدار ثاني أكسيد الكربون لمدة 84 يومًا

في السنة من إنتاج النفط الخام في دولة الإمارات بحلول عام 2050

الأثر الاقتصادي (على دبي):

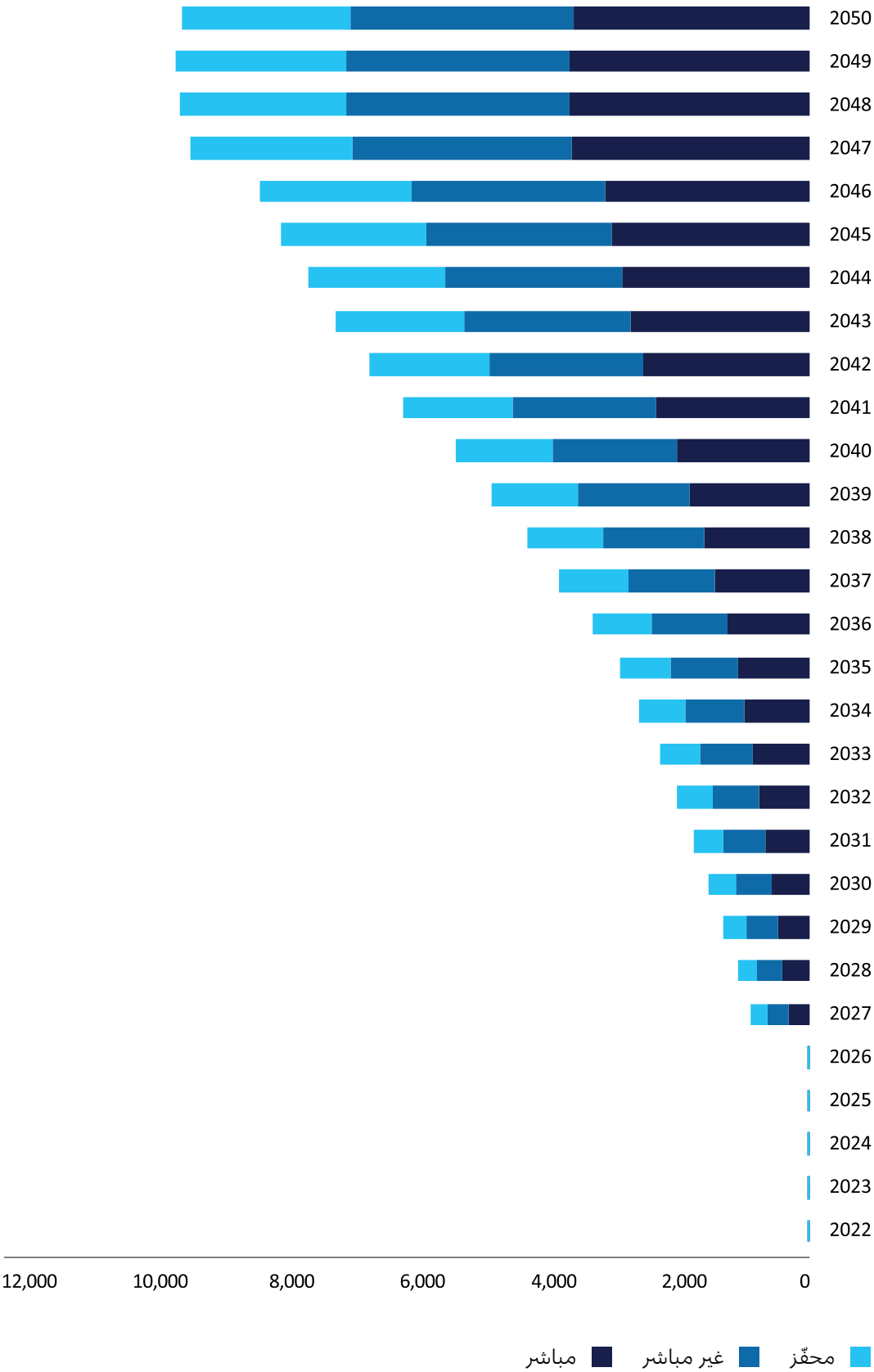
الشكل 1: دبي: نسبة الإضافة إلى الناتج المحلي الإجمالي (مباشر + غير مباشر + محفّز) (مليار درهم)



المصدر: مؤسسة دبي للمستقبل

الأثر الاجتماعي (على دبي):

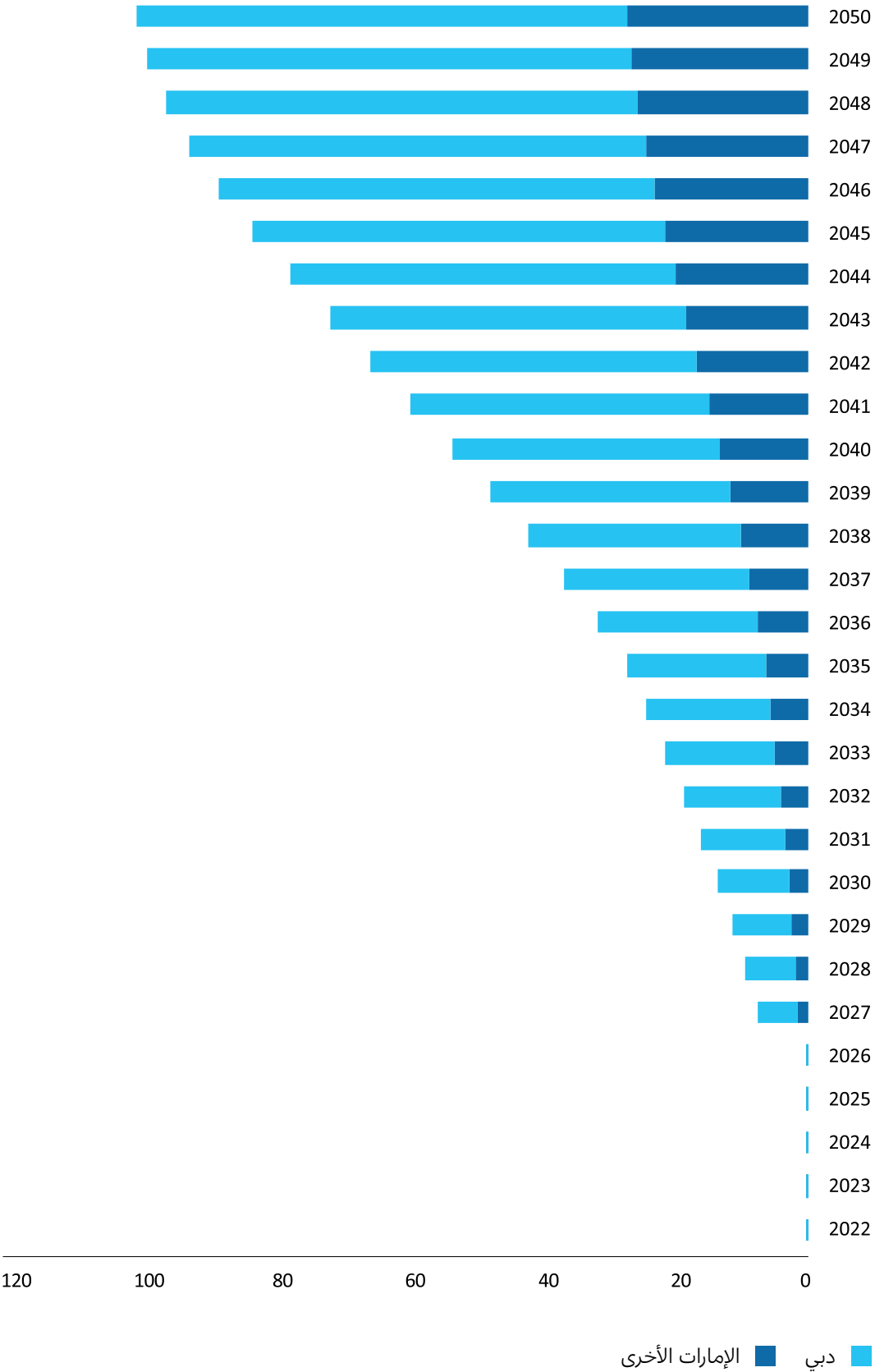
الشكل 2: دبي: فرص الوظائف المضافة كل عام (دوام كامل)



المصدر: مؤسسة دبي للمستقبل

الأثر البيئي (على دولة الإمارات العربية المتحدة):

الشكل 3. تعويض يوم في السنة عن إصدار ثاني أكسيد الكربون في إنتاج النفط لدولة الإمارات



المصدر: مؤسسة دبي للمستقبل

تقدم مؤسسة دبي للمستقبل وشركاؤها والمساهمون الخبراء التوصيات التالية لتطبيق هذا المسار الاستراتيجي على المديين القصير والمتوسط:

.1

تقديم السلطات المحلية «إثباتات مفاهيم» تعرض حالات الاستخدام المستقبلية، ويشمل ذلك الوقود الاصطناعي الأخضر القائم على الهيدروجين.

.2

تطوير نماذج أولية تبرهن القدرة على التغلب على التحديات، مثل النماذج الأولية لكهرلات (أو المحللات الكهربائية) مياه البحر للتغلب على تحدي ندرة المياه العذبة.

.3

تنفيذ مشروع تجريبي للتحقق من نظافة الهيدروجين.

.4

تقييم مشروع مد خط أنابيب ممول بشكل مشترك يربط دول مجلس التعاون الخليجي بأوروبا وشرق آسيا لتصدير الهيدروجين، ودراسة جدواه.

.5

التنسيق المتكامل بين الكيانات الحكوميّة الرئيسيّة في جميع أنحاء دولة الإمارات العربيّة المتّحدة لإدارة وتنسيق إنتاج وتوريد الهيدروجين الأزرق والأخضر.

.6

تقديم حوافز مالية لمنتجي الهيدروجين.

.7

إدخال تدابير لدعم البحث والتطوير في مجال الهيدروجين في دولة الإمارات العربيّة المتّحدة.

.8

تحويل ما يصل إلى 50% من جميع الأساطيل العامة للمركبات الثقيلة إلى مركبات كهربائية تعمل بخلايا وقود الهيدروجين بحلول عام 2050.

.9

إنشاء 100 محطّة للتزويد بوقود الهيدروجين في دولة الإمارات بحلول عام 2050.

.2

نبـــذة عن الهيدروجـــين

العنصر الأول

يمثل الهيدروجين أحد أكثر حوامل الطاقة المتاحة اليوم فعاليةً، إذ يحتوي على طاقة في واحدة الكتلة أكثر من الوقود الأحفوري. وتحرر هذه الطاقة عندما يتحد الهيدروجين مع الأكسجين، والمنتج الثانوي لهذا التفاعل لا يزيد عن بخار الماء (اعتمادًا على الطريقة المستخدمة)، مّما يوفّر الطاقة اللازمة لنمو الاقتصادّ مع خفض التأثير السلبي على البيئة. والهدروجين أيضًا العنصر الأكثر وفرة، ليس على كوكبنا فحسب، بل في الكون بأسره. وحتى اليوم طور البشر طرق متعددة لإنتاج الهيدروجين النظيف، ومنها عملية تعرف باسم التحليل الكهربائي أو الكهرلة، والتي تستخدم الكهرباء لفصل ذرات الهيدروجين عن الأكسجين في الماء. وحين تستخدم الكهرباء الناتجة عن مصادر متجددة -مثل الطاقة الشمسية- في هذه العملية فإنها تترك تأثيرًا ضئيلًا على البيئة.

الهيدروجين مرشح ليكون جزءًا مهمًا من مزيج الطاقة، إلى جانب مصادر الطاقة المتجددة الأخرى. فوفقًا لبعض التقديرات، قد يلبي الهيدروجين ما يصل إلى 24% من احتياجات الطاقة في العالم بحلول عام 2050، إن طبقت سياسات قوية وشاملة لدعمه[3]، أما اليوم فإن ما يقرب من 95% من صناعة إنتاج الهيدروجين تعتمد على الوقود الأحفوري[4]. ولزيادة الإنتاج لا بد من التوجه إلى طرق الإنتاج النظيفة لخفض التأثير على المناخ.

صحيح أن الهيدروجين ذو إمكانيات كبيرة، إلا أن له محدوديات أيضًا. أولًا، كثافة طاقته -أي الطاقة التي تولدها وحدة الحجم- أقل من كثافة طاقة الوقود الأحفوري، ولهذا فإن تخزينه يتطلب حجماً أكبر. فمثلًا، إن أردنا تعديل الطائرات المستخدمة حاليًا لاستخدام الهيدروجين، يجب إعادة تصميمها لاستيعاب خزانات وقود أكبر، ما يؤدي إلى خفض عدد مقاعد الركاب أو حجم الشحن. ثانيًا، لا يستفيد الهيدروجين من البنية التحتية القائمة للتزود بالوقود. فمثلًا غالبًا ما تُشحن المركبات الكهربائية التي تعمل بالبطاريات في منازل أصحابها، وفي المقابل، تتطلب المركبات الكهربائية التي تعمل بخلايا وقود الهيدروجين شبكات جديدة تمامًا من محطات الهيدروجين، مماثلة لمحطات البنزين القائمة حاليًا. يتيح غياب البنية التحتية للهيدروجين للرواد الأوائل تحديد المعايير واختيار التقنيات والاستحواذ على حصة كبيرة من السوق المبكرة مع اللحاق بركب الاقتصادات الأخرى. وستناول لاحقًا في هذا التقرير تحديات أخرى، كتخزين الهيدروجين ونقله، والاستدامة، ومخاوف السلامة، إلى جانب طرق تجاوزها والاتجاهات الناشئة التي تكشف عن الإمكانات الحقيقية للهيدروجين التي تؤهله ليصبح وقود الغد.

لمحة تاريخية

تخيَّل مؤلف الخيال العلمي جول فيرن اقتصاد الهيدروجين، منذ عام 1874، في كتابه الجزيرة الغامضة، فوصفه بالعبارات التالية:

> «سيستخدم الماء يومًا كوقود، وسيوفر الهيدروجين والأكسجين اللذان يكونانه -حين يستخدمان معًا أو كل منهما وحده- مصدرًا لا ينضب للحرارة والضوء، وبكثافة لا يصل إليها الفحم».

ما كان خيالاً يومها يتحول الآن إلى حقيقة. في الخمسينيات من القرن الماضي، بدأت الإدارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء (ناسا) في تطوير خلايا وقود الهيدروجين لاستخدامها في الفضاء. وشهد العقدان التاليان إرسال بعثات أبولو إلى القمر بالاعتماد على خلايا وقود الهيدروجين كمصدر للطاقة. وبدأ مفهوم اقتصاد الهيدروجين في جذب اهتمام كبير في التسعينيات بعد أن تراكمت الأدلة العلمية على تأثير غازات الدفيئة البشرية المنشأ في تغير المناخ، إذ يطلق النشاط البشري غازات الدفيئة في الغلاف الجوي لكوكبنا، وتتكون بمعظمها من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن صناعة الوقود الأحفوري واستخدامه، ويضاف إليها غازات ثاني أكسيد الكربون والميثان وثاني أكسيد النيتروجين الناتجة عن الزراعة، وتغير استخدام الأراضي وعلى رأس ذلك إزالة الغابات.

أطلق الوعي بهذه المعلومات الموجة الأولى من اقتراحات الحلول والاستخدامات الهيدروجينية، لكنها كانت غير عملية ومكلفة في ذلك الوقت. وعلى الرغم من ذلك تقدمت تقنيات الهيدروجين وخلايا الوقود كثيرًا منذ ذلك الحين، بفضل زيادة تمويل الأبحاث والتطوير. وفي موازاة ذلك، أصبحت مصادر الطاقة المتجددة الأخرى أقل تكلفة، بل إن مصادر الطاقة المتجددة أصبحت في بعض البلدان أقل تكلفة من الوقود الأحفوري التقليدي[5].

تغير مشهد السياسات على مر السنين أيضًا، ما أتاح بدائل جديدة للطاقة النظيفة شجعت على استخدامها سياسات مجابهة تغير المناخ، إذ لعبت اتفاقية باريس الموقعة عام 2015 دورًا مركزيًا في الدفع باتّجاه مستقبل أكثر اخضرارًا للطاقة. وتبشر مجموعة من العوامل التقنية والاقتصادية والسياسية الواعدة الآن بتوفر إمكانية حقيقية لاستخدام الهيدروجين على نطاق أوسع لإزالة الكربون من قطاعات صناعية رئيسة مثل النقل وتخزين الطاقة وتوليدها، والأسمدة الخضراء، وإنتاج الصلب. التطور الجديد الآخر هو تصاعد ضغط المساهمين على الشركات للإفصاح عن نشاطها المؤثر سلبيًا على المناخ ومطالبتها برسم خطط لإزالة الكربون. وتتخلى بعض صناديق التحوُّط وشركات التأمين عن قطاعات بأكملها - مثل الفحم - بسبب المخاطر المناخية المحسوسة[6].

على الرغم من أن تقنيات الهيدروجين وخلايا الوقود ما زالت باهظة الثمن نسبيًا مقارنة بتقنيات توليد الطاقة وتخزينها الأخرى، أظهرت مشاريع التنفيذ الأولية وفورات الإنتاج الكبير، ما أدى إلى انخفاض تدريجي في التكاليف، وفتح الطريق أمام نشر تقنية خلايا الوقود والهيدروجين. والواقع أنَّ الصناعات التي تعمل بالهيدروجين الأخضر - أو المشتق من مصادر الطاقة المتجددة - تكتسب بالفعل زخمًا كبيرًا على مستوى العالم، حتى أن بعض أكبر شركات النفط والغاز، ومنها بريتيش بتروليوم وشل، تطور مشاريع إنتاج الهيدروجين[7]. وهذه الموجة الثانية من استخدام الهيدروجين تختلف عن تلك التي حدثت منذ عقود، فهو هذه المرة في وضع أفضل للاستمرار مستقبلًا.

.3

الأثـــر البيـــئي

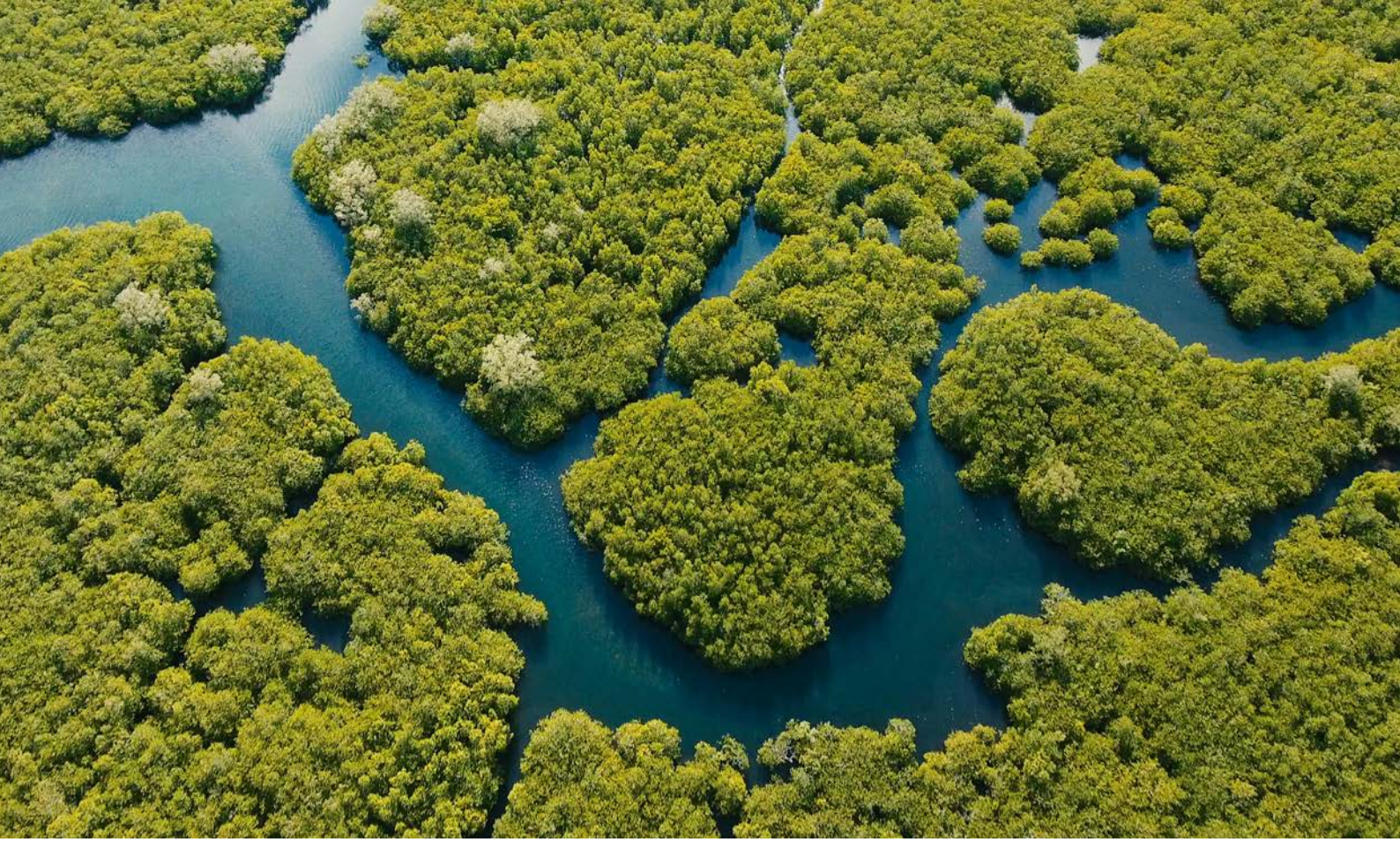
تغير المناخ

تُعرِّف الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ التابعة للأمم المتحدة (IPCC) تغير المناخ بأنه «تغير في حالة المناخ يستدَل عليه من خلال التغيرات في متوسِّط خصائصه و/أو تقلّبيّتها ويستمر لفترة طويلة، تمتدُّ عادةً عقودًا أو أكثر». تغير المناخ هو أيضا ظاهرة طبيعية. فعلى مدى 650 ألف سنة الماضية حدثت سبع دورات من تقدم الأنهار الجليدية وتراجعها، إلا أن لدينا اليوم أدلة دامغة على أن التغير المناخي السريع الذي نشهده حاليًا ناتج عن تغير كبير في مستويات غازات الدفيئة في الغلاف الجوي منذ الثورة الصناعية الأولى، إذ ارتفع متوسط درجة حرارة سطح كوكبنا نحو درجة واحدة مئوية منذ أواخر القرن التاسع عشر[8]. ولوحظت ظاهرة تغير المناخ من خلال مختلف مؤشرات تغير المناخ العالمي الأخرى، مثل المحتوى الحراري للمحيطات، ومستويات سطح البحر، وتوازن كتلة الأغطية الجليدية.

تهديد وشيك

سيكون لتغير المناخ تأثير مدمر على كوكبنا. فهو يشكل خطرًا على قطاعات متعددة منها صحة الإنسان والأمن الغذائي والمائي والنمو الاقتصادي والطاقة والبنية التحتية والبيئة. تعتمد الزراعة ومردودات المحاصيل والغابات والمراعي بشكل كبير في نموها على أنماط درجة الحرارة وهطول الأمطار، وتتأثر بها. ويؤدي تغير المناخ إلى تغيير هذه الأنماط. وفقًا للمنظمة العالمية للأرصاد الجوية، تشكل الكوارث المرتبطة بالمناخ أحد الأسباب الرئيسة لارتفاع معدل الجوع في العالم، وهذا مصدر قلق كبير، إذ يعاني واحد من كل تسعة أشخاص في العالم من الجوع بدءًا من عام 2018. وبسبب تغير المناخ قد تصبح موجات الجفاف والفيضانات أعلى تواترًا، وقد تؤدي ظروف الجفاف الشديدة إلى زيادة حجم حرائق الغابات ووتيرتها. ويؤثر تغير المناخ أيضًا على محيطاتنا ضمن سلسلة مترابطة من التهديدات البيئية. فهو يتسبب في زيادة انفصال طبقات المحيطات وتحمضها، وخسارتها للأكسجين، وهذا يؤدي إلى سلسلة من التغييرات الجذرية في النظام البيئي والتنوع البيولوجي.

إنَّ تغير المناخ قضية عالمية، ومنطقتنا العربية ليست محصنة ضدها. ففي 11 يوليو عام 2018، سجل المركز الوطني للأرصاد الجوية في دولة الإمارات العربية المتحدة أعلى درجة حرارة على الإطلاق في المزيرة في أبوظبي عند 51.1 درجة مئوية.



التزامنا

يواصل الموقعون على اتفاقية باريس بذل جهود للحد من ارتفاع درجة الحرارة العالمية إلى 1.5 درجة مئوية فوق مستويات ما قبل العصر الصناعي. لكن حتى إن تم الوفاء بالالتزامات غير المشروطة التي تعهد بها الموقعون بدءًا من أواخر عام 2020 بموجب اتفاقية باريس، فما زال من متوقعًا أن يرتفع متوسط درجة الحرارة العالمية بمقدار 3.2 درجة مئوية[9]. ما لم تنخفض انبعاثات غازات الدفيئة العالمية بنسبة 7.6% كل عام بين عامي 2020 و2030، فلن يتمكن العالم من تحقيق هدف درجة الحرارة البالغ 1.5 درجة مئوية. سيحتاج هذا إلى عمل جماعي متضافر. كانت دولة الإمارات العربية المتحدة من أوائل الدول في المنطقة التي صادقت على اتفاقية باريس، فأسهمت في التزام المجتمع العالمي بمواصلة الجهود للتخفيف من انبعاثات غازات الدفيئة.

وقدمت دولة الإمارات العربية المتحدة مساهمتها الثانية المحددة وطنيًا في عام 2020، فتعهدت بتخفيض انبعاثاتها من غازات الدفيئة لتحقيق انخفاض بنسبة 23.5% مقارنة بالوضع الاعتيادي للأعمال لعام 2030، وبخفض مطلق للانبعاثات بنحو 70 مليون طن.

وتعهدت دولة الإمارات بزيادة قدرة الطاقة النظيفة المركبة إلى 14 جيجاوات، وزراعة 30 مليون شجرة مانغروف لتعزيز التقاط الكربون ولتعمل كحواجز طبيعية أمام ارتفاع مستوى سطح البحر.

تبذل دولة الإمارات حاليًا جهودًا متسارعة لفصل نموها الاقتصادي عن الأثر البيئي. وفي إطار تحديد مسار التنمية الجديد للدولة وإبراز طموحها أطلقت في العام 2010 رؤية الإمارات 2021 بهدف تصنيف دولة الإمارات بين أفضل الدول في العالم بحلول عام 2021. وعبّرت الدولة عن عزمها على تعزيز تنافسية نموها واستدامته والحفاظ على بيئتها للأجيال المقبلة من خلال مبادرة الاقتصاد الأخضر للتنمية المستدامة عام 2012، وهي تطمح أن تصبح مركزًا عالميًا ونموذجًا ناجحًا للتنمية المستدامة. وهو ما يحسن قدرة الدولة على التكيف مع الآثار الضارة لتغير المناخ بالتحول نحو بيئة أنظف وأكثر خضرة.

وترى دولة الإمارات العربية المتحدة أن التحول إلى اقتصاد أخضر متكيف مناخيًا فرصة واعدة للتنويع الاقتصادي، تسهم في الارتقاء بمكانة الدولة كرائد عالمي في مجال الطاقة المتجددة والابتكار الأخضر. اعتمد مجلس الوزراء الإماراتي الخطة الوطنية لتغير المناخ 2050 في يونيو 2017 بهدف تعزيز العمل المناخي لدولة الإمارات في إطار واحد وتحديد الأولويات الاستراتيجية التي تشمل كلاً من التخفيف والتكيف. واعتمد في عام 2017، كذلك خطة الطاقة الوطنية لدولة الإمارات العربية المتحدة 2050 وهدفها زيادة نسبة حصة الطاقة النظيفة في إجمالي قدرات توليد الطاقة المركبة في الدولة إلى 50% بحلول عام 2050.

ويضاف إلى ذلك أن دولة الإمارات العربية المتحدة أعلنت في أكتوبر 2021، عن مبادرتها الاستراتيجية بتحقيق الحياد المناخي بحلول عام 2050، والتي تشمل خططاً لاستثمار 600 مليار درهم في تطوير مصادر الطاقة النظيفة والمتجددة خلال العقود الثلاثة المقبلة.

الهيدروجين والعمل المناخي

معروف أن قطاع الطاقة مسؤول عن أغلب انبعاثات غازات الدفيئة في العالم، ولهذا تشكل التدخلات التقنية والسياسات في هذا القطاع جزءًا مهمًا من الجهد العالمي لمكافحة تغير المناخ. ويعد استهلاك الهيدروجين للطاقة «نظيفًا»، ولهذا بإمكانه أن يلعب دورًا مهمًا في خفض انبعاثات قطاع الطاقة، إن استخدمت طرق منخفضة انبعاثات غازات الدفيئة في إنتاجه. ويمثل الهيدروجين أيضًا حلًا اقتصادي التكلفة لإزالة الكربون من قطاعات معينة، مثل النقل والصناعات الثقيلة.

تنشط البلدان في مختلف أنحاء العالم لتحويل اقتصاداتها إلى اقتصادات خضراء والاعتماد على الهيدروجين بأساليب متنوعة في إطار جهودها للتصدي لتغير المناخ. فمثلًا، تركّز أستراليا -وهي حاليًا أكبر مصدر للفحم في العالم- على جانب الإنتاج، وتطمح إلى أن تصبح المصدّر الرئيس للهيدروجين. وفي المقابل تركّز اليابان على جانب الاستهلاك عبر تبنّي الهيدروجين لتقليل اعتمادها على الوقود الأحفوري.

تظهر البيانات أن قطاع الطاقة في دولة الإمارات العربيّة المتّحدة مسؤول عن أكثر من 85% من انبعاثات غازات الدفيئة في البلاد، وتسعى الدولة إلى إدراج الهيدروجين في الاقتصاد ليصبح حاملًا رئيسًا للطاقة في النقل والاستخدام الصناعي وتوليد الكهرباء. وتمثل دولة الإمارات، وتحديدًا مجمع محمّد بن راشد آل مكتوم للطاقة الشمسيّة في دُبي، موطنًا لأوّل مشروع هيدروجين أخضر يعمل بالطاقة الشمسية في المنطقة, وبدأت هيئة كهرباء ومياه دبي (ديوا) تشغيله فعلاً في مايو 2021، وهو يندرج في إطار تحقيق رؤية صاحب السموّ الشيخ محمد بن راشد آل مكتوم، نائب رئيس الدولة, رئيس مجلس الوزراء حاكم دُبي "رعاه الله"، التي توجه إلى التعرف على موارد طاقة جديدة وتوفير الطاقة المستدامة ضمن نهج متوازن يمنح الأولوية للبيئة.

وسيظهر مشروع الهيدروجين الأخضر كيف تسهم الكهرباء الخضراء في إزالة الكربون من الاقتصاد، التزامًا برؤية صاحب السمو الشيخ محمد بن راشد آل مكتوم، لتوليد 75% من إجمالي إنتاج الطاقة في دبي من مصادر الطاقة النظيفة بحلول عام 2050. وتشمل مبادرات دولة الإمارات الأخرى خطط شركة بترول أبو ظبي الوطنية (أدنوك) لتوسيع إنتاج الهيدروجين[10]، وتخطط شركة مبادلة أيضًا لتسريع زيادة قدرات الهيدروجين الأخضر في أبوظبي بالتعاون مع سيمنز[11].

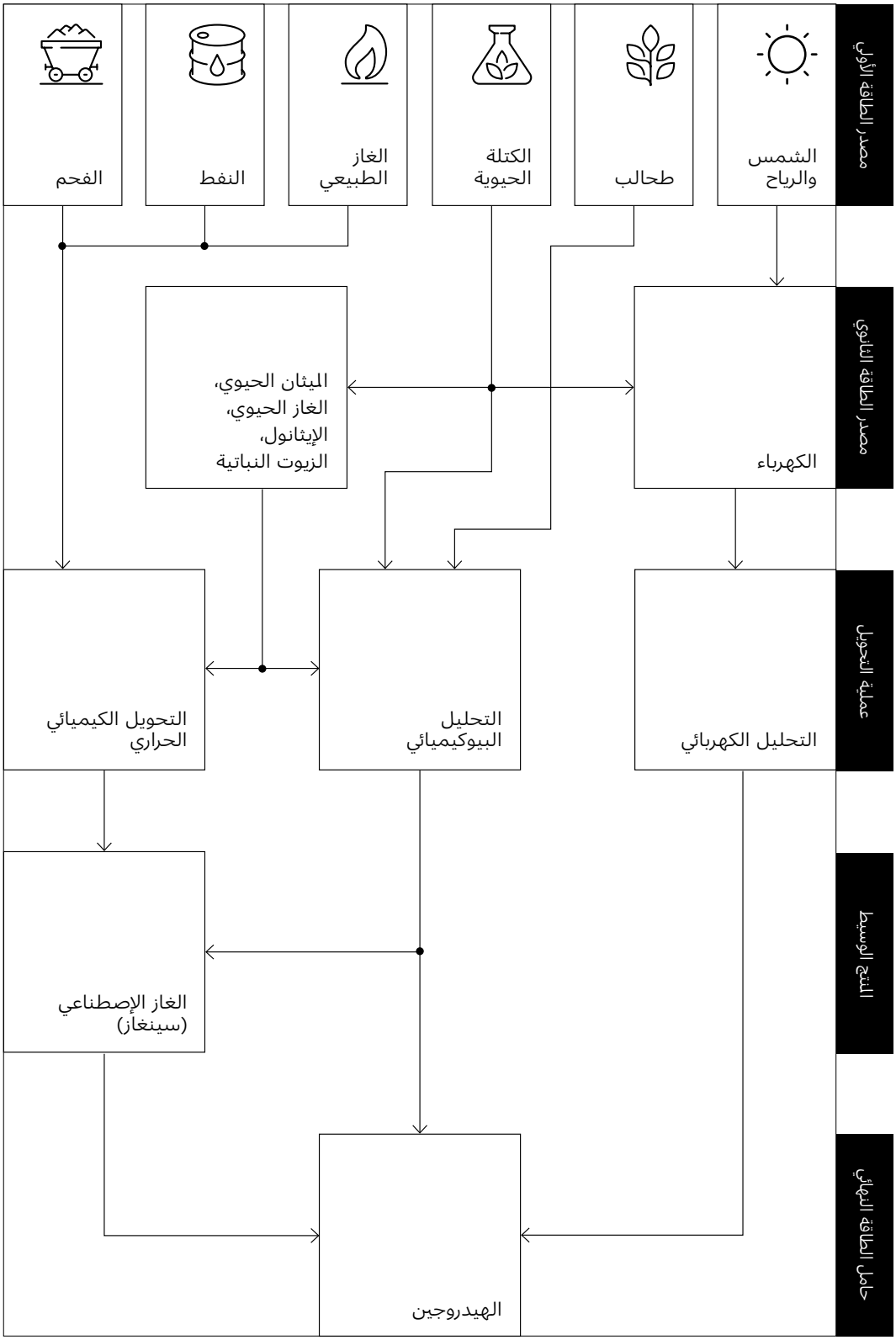
أدَّت وفرة الوقود الأحفوري وتطوير تقنيات الطاقة المرتبطة به عالميًا إلى استحواذه على أفضلية اقتصادية من الناحية المالية البحتة. ويُعدّ الإخفاق في إضافة تكلفة تأثير انبعاثات الكربون على تكلفة الوقود الأحفوري مثلًا بليغًا عن الفشل في تحديد تكلفة على العوامل الخارجية. ولهذا حاولت سلسلة من الاتفاقيات الدولية الأخيرة تصحيح هذا بتحديد أهداف طوعية لخفض الانبعاثات في الاقتصادات المتقدمة، بالإضافة إلى تطبيق آليات سوقية لتحفيز خفض استخدام الوقود الكربوني.
وتشمل التدابير الأخيرة نظم جمع أرصدة تعويض الكربون على المستوى الوطني والقطاع الخاص والتي تمكن البلدان أو المنظمات المنفذة لمشروعات تخفض إجمالي انبعاثات الكربون في أماكن أخرى من أن تولد الإيرادات، وذلك في إطار نظام تديره الأمم المتحدة طور بموجب بروتوكول كيوتو. وقد يشكل تطوير قطاع هيدروجين منخفض الكربون/أخضر آلية لتحقيق الأهداف المناخية، ووسيلة محتملة لتوليد الإيرادات من خلال الأرصدة القابلة للتداول.

4.

أنـــواع الهيدروجـــين

على الرغم من وفرة الهيدروجين، فإن القليل جدًا منه يتوفر على كوكبنا بشكله الطبيعي الحر، ولهذا يجب إنتاجه بفصله عن الذرات الأخرى. وتتوفر طرق عدة لإنتاج عنصر الهيدروجين، ويشار إلى كل طريقة وفق اللون الذي يمثل عملية الإنتاج. ينتج معظم الهيدروجين اليوم بالاعتماد على الوقود الأحفوري بعملية تطلق تفاعلًا بين الغاز الطبيعي أو الفحم والبخار، وغالبًا ما توصف بأنّها تنتج «هيدروجين رمادي». يمكن أن تقترن هذه العملية بالتقاط الكربون واستخدامه وتخزينه، حيث يتم التقاط ثاني أكسيد الكربون المنبعث واستخدامه أو تخزينه تحت الأرض. يشار إلى الهيدروجين الناتج من هذه الطريقة باسم «الهيدروجين الأزرق». وينتج الهيدروجين بالكهرلة وباستخدام الكهرباء المولدة من مصادر الطاقة المتجددة، مثل الرياح والطاقة الشمسية - أو من الغاز الحيوي المنتج من الكتلة الحيوية. ويُشار إلى الهيدروجين الناتج من هذه الطرق باسم «الهيدروجين الأخضر»[12]. يمثل إنتاج الهيدروجين من الهيدروكربونات نقطة انطلاق مهمة للانتقال نحو الهيدروجين الأزرق والأخضر.

الشكل 4. طرق إنتاج الهيدروجين

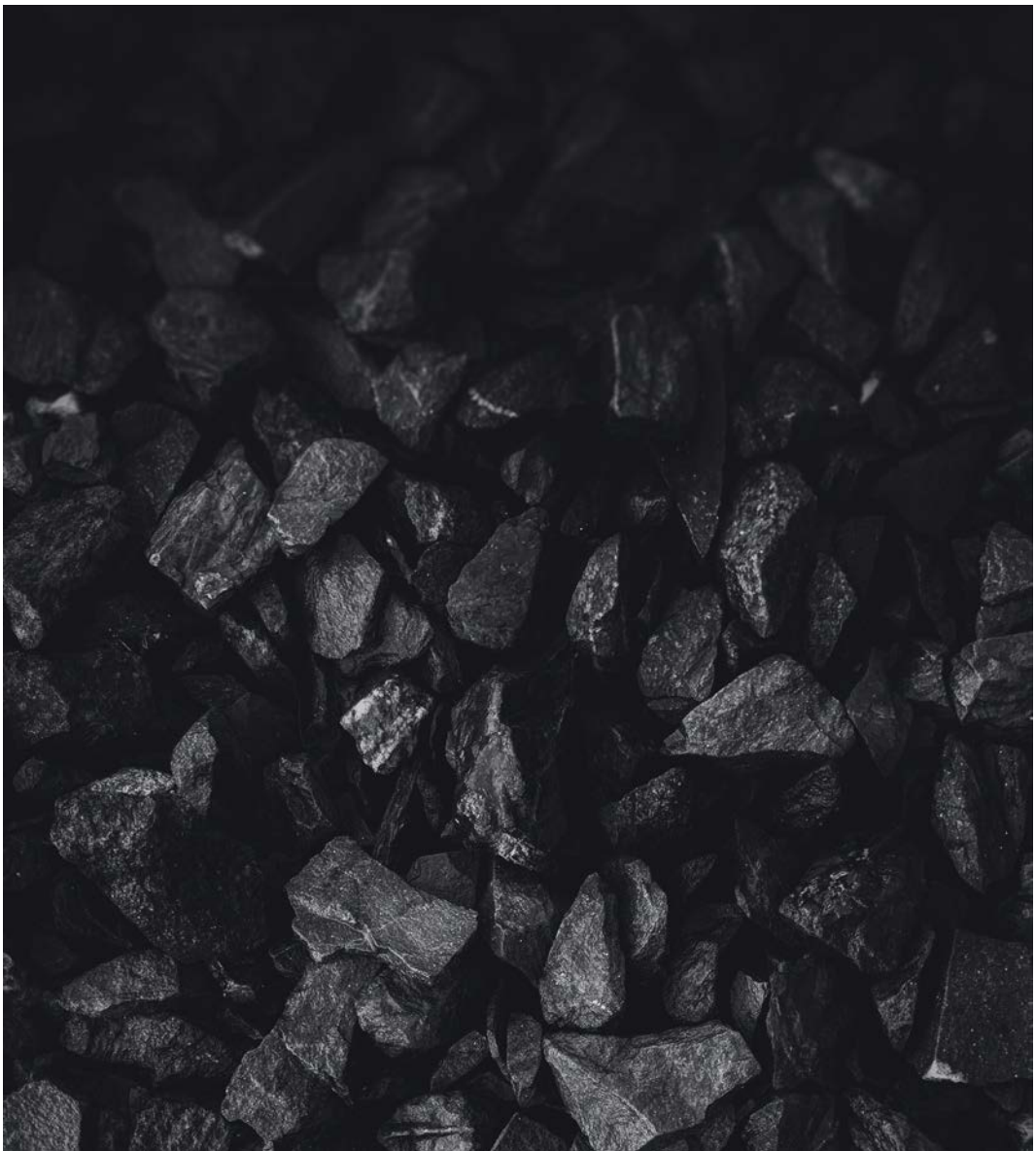


المصدر: شل

الهيدروجين الرمادي

ينتج الهيدروجين الرمادي من الوقود الأحفوري، ولا سيَّما الغاز الطبيعي أو الفحم اللذين يخضعان لمعالجة لإطلاق الهيدروجين من جزيئات الهيدروكربون، وهي عملية تؤدي أيضًا إلى إطلاق ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. يحتوي الغاز الطبيعي على الميثان الذي يستخدم لإنتاج الهيدروجين بعمليات إعادة التشكيل الحراري، مثل إعادة تشكيل بخار الميثان والأكسدة الجزئية.

أما في حالة الفحم، فيستخدم التغويز لإنتاج الهيدروجين وكذلك الطاقة والوقود السائل والمواد الكيميائية الأخرى. وينتج الهيدروجين من تفاعل الفحم مع الأكسجين والبخار تحت ضغط ودرجات حرارة عالية لتكوين غاز مخلَّق، أو «سينغاز»، وهو خليط يتكون أساسًا من أول أكسيد الكربون والهيدروجين، ثم يعالج بالبخار لإنتاج الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون الذي ينتزع الهيدروجين منه بنظام فصل.



الهيدروجين الأزرق

يتحول الهيدروجين الرمادي إلى هيدروجين أزرق عندما تلتقط انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الصادر عن إنتاجه عبر تقنية التقاط الكربون ما يخفض من تأثيره على البيئة.

دولة الإمارات موطن مصنع «الريادة» لالتقاط الكربون واستخدامه وتخزينه، وهو أول مصنع تجاري في العالم لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون المنبعث من تصنيع الحديد والصلب، وأول مصنع تجاري لثاني أكسيد الكربون في الشرق الأوسط. ودولة الإمارات مرشحة للاستفادة من هذه التجربة والخبرة لاستخدام تقنية التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه لإنتاج الهيدروجين الأزرق.

الهيدروجين الفيروزي

ينتج الهيدروجين الفيروزي بعملية تعرف باسم تحليل الميثان حراريًا، وهي تتضمن استخدام الميثان، مثل الهيدروجين الرمادي والأزرق، غير أنَّ التحليل الحراري للميثان يعتمد على الحرارة المولدة بالكهرباء وليس من احتراق الوقود الأحفوري[13]. تنتج هذه الطريقة الكربون أيضًا لكن في صورته الصلبة، ما يعني أنها تتجنب إطلاق الانبعاثات في الغلاف الجوي.

الهيدروجين الأخضر

يُنتج الهيدروجين الأخضر بكهرلة الماء باستخدام الكهرباء المستمدّة من مصادر الطاقة المتجددة، مثل الرياح والطاقة الشمسية. وكهرلة الماء عملية كهروكيميائية معروفة تستخدم معدات تعرف باسم المكهرلات (أو المحللات الكهربائية)، وفيها تفصل الكهرباء المطبقة بين قطبين مغموسين في الماء ذرات الهيدروجين عن ذرات الأكسجين[14] فالماء مكون من هذين العنصرين.

وتوجد طرق أخرى لإنتاج الهيدروجين الأخضر، وفيها يعالج الميثان الحيوي بواسطة البخار، أو تجرى عملية تغويز الوقود الحيوي. وعلى الرغم من أن هذه الطرق تنتج ثاني أكسيد الكربون، يجوز أن تعد «خضراء» أو محايدة كربونيًا لأن ثاني أكسيد الكربون المنبعث منها امتصته النباتات أو الكائنات الحية الدقيقة سابقًا من الغلاف الجوي لصنع كتلتها الحيوية. وربما يُعترض على ذلك والقول بعدم صحة تصنيفها خضراء لأنها تطلق ثاني أكسيد الكربون في الجو، ولهذا فإن المصطلح الأكثر ملاءمة في هذه الحالة: الهيدروجين بصافي انبعاثات كربونية صفرية. وعلى الرغم من إمكانية إنتاج الهيدروجين الأخضر بشكل مباشر كنتيجة للنشاط الميكروبي[15] ما زالت هذه الطريقة محدودة النتائج.

كثيرًا ما تتداخل تعريفات الهيدروجين الأخضر والأزرق والرمادي، ويدور نقاش عالمي حاليّاً لإقرار نظام «ضمان المنشأ» للهيدروجين رسميًا وتطويره. وعمومًا يعد أي نوع من الهيدروجين هيدروجينًا أخضر إن أنتج دون إطلاق ثاني أكسيد الكربون، أو أنتج بصافي انبعاثات صفري.

تنفذ هيئة كهرباء ومياه دبي (ديوا) مشروعًا تجريبيًا رئيسًا لإثبات جدوى إنتاج الهيدروجين الأخضر. وهو أول مشروع تجريبي للهيدروجين الأخضر باستطاعة من رتبة الميجاوات في المنطقة العربية ينتج الهيدروجين بالاعتماد على الطاقة الشمسية. ويمثل هذا المشروع نموذجًا للتعاون الناجح بين الحكومة والقطاع الخاص.

الهدف من مشروع منشأة الهيدروجين الأخضر التجربة العملية لمحطة متكاملة باستطاعة من رتبة الميجاوات لإنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام الطاقة المتجددة. وبدأ المشروع بإنتاج الهيدروجين الأخضر بالتحليل الكهربائي من شهر مايو 2021.

الهيدروجين الأصفر

يقصد بالهيدروجين الأصفر الهيدروجين المستخرج من الماء بالكهرلة على غرار الهيدروجين الأخضر، والفرق الوحيد بينهما أن مصدر الكهرباء المستخدمة هو الطاقة النووية بدلًا من مصادر الطاقة المتجددة.

5.

استخـــدامات الهيدروجـــين الحـالية

يستخدم معظم الهيدروجين المنتج حاليًا في الصناعة لإنتاج الأمونيا والميثانول في المقام الأول. ويستخدم كذلك على نطاق محدود في مجال الطاقة، في التطبيقات الواعدة ذات الإمكانيات مستقبلية كبيرة، مثل توليد الكهرباء وخلايا الوقود والنقل[16].

الاستخدامات الأولية

يستخدم الهيدروجين اليوم أساسًا لإنتاج الأمونيا والميثانول بالاصطناع الكيميائي، ويستخدم كذلك في مصافي النفط لخفض محتوى الكبريت في الوقود. وتفصيلًا، يستخدم نحو 55% من الهيدروجين المنتج عالميًا في تصنيع الأمونيا، و25% في مصافي النفط، ونحو 10% لإنتاج الميثانول، و10% الباقية في الاستخدامات الأخرى[17].

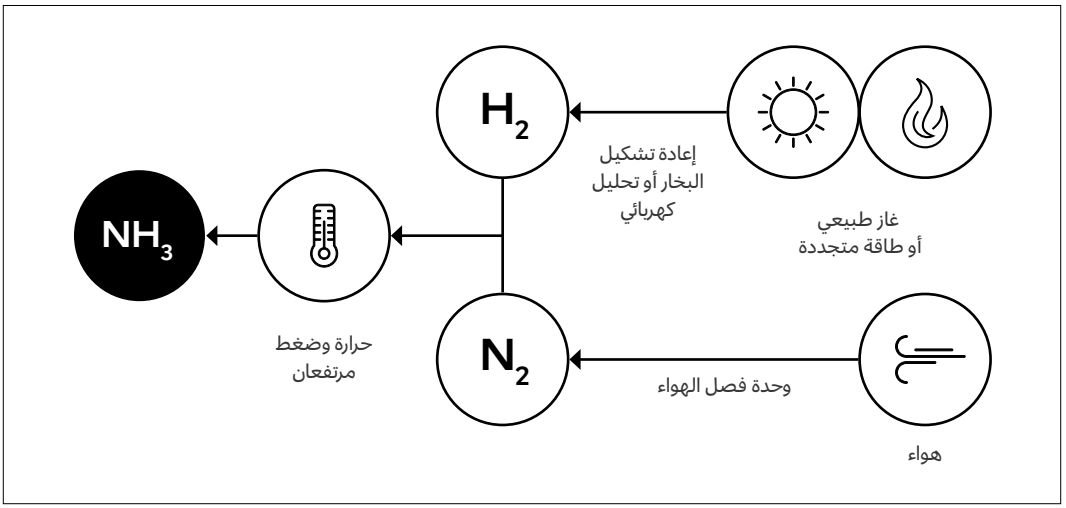
الشكل 5. استخدامات الهيدروجين

المصادر: مؤسسة دبي للمستقبل وهيدروجين يوروب

الأمونيا

يستخدم نحو 90% من الأمونيا (NH3) اليوم لإنتاج الأسمدة. ولأن الأمونيا تتمتع بطاقة تبخر عالية، تُستخدم أيضًا في محطات التبريد كمادة تبريد لا تضر طبقة الأوزون وذات تكلفة إنتاج منخفضة وتسمى R-717[18]. وتستخدم الأمونيا كذلك لتخزين الهيدروجين[19]. تنتج معظم الأمونيا اليوم بعملية هابر-بوش التي تجعل الهيدروجين يتحد بالنيتروجين عن طريق الاصطناع الكيميائي.

الشكل 6. إنتاج الأمونيا



المصادر: مؤسسة دبي للمستقبل والجمعية الأميركية لتقدم العلوم

تكرير النفط

يشكِّل تكرير النفط، أي عملية تحويل النفط الخام إلى منتجات جاهزة للاستخدام مثل الوقود والمواد البتروكيماوية الأوليَّة، أحد أهم استخدامات الهيدروجين الحالية. ويستخدم الهيدروجين في المعالجة المائية التي تزيل الشوائب مثل الكبريت. وتنمو نسبة هذا الاستخدام حاليًا بسبب تشديد القوانين المتعلقة بمحتوى الكبريت. واليوم تزيل المصافي نحو 70% من الكبريت الطبيعي من النفط الخام. وبسبب المخاوف المتزايدة المرتبطة بجودة الهواء، يتزايد الضغط التنظيمي لمواصلة خفض محتوى الكبريت في المنتجات المكررة[20].

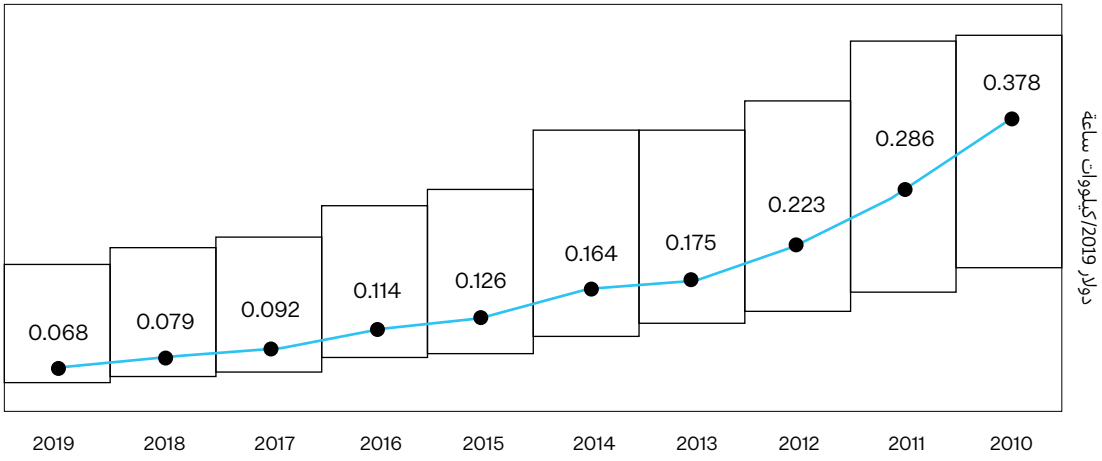
.6

استخدامـــات الهيدروجـــــين المستقبلـــية

صحيح أن العالم ما زال بعيدًا عن تحقيق أهدافه المناخية، إلا أنه قطع شوطًا طويلًا في تطوير تقنيات الاستفادة من مصادر الطاقة المتجددة، مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية. ولهذا انخفضت تكاليف الطاقة الشمسية الكهروضوئية على مستوى العالم بنسبة 82% بين العامين 2010 و2019[21]، بناءً على التكلفة المستوية للكهرباء. لا تأخذ التكلفة المستوية في الحسبان تكاليف المشروع الأولية فحسب، بل تكاليف توليد الكهرباء على مدى عمر المشروع أيضًا. ووفقًا لوكالة الطاقة الدولية «تقدم بعض مشاريع الطاقة الشمسية اليوم الكهرباء الأقل تكلفة على الإطلاق»[22].

انخفضت تكاليف الطاقة الشمسية الكهروضوئية على مستوى العالم بنسبة 82% بين العامين 2010 و2019 ، بناءً على التكلفة المستوية للكهرباء.

الشكل 7. التكلفة المعيارية للكهرباء الطاقة الشمسية الكهروضوئية و النطاقات السنوية



المصدر: الوكالة الدولية للطاقة المتجددة

سجلت دولة الإمارات العربية المتّحدة أرقامًا قياسيّة عالميّة لأقل كهرباء مولدة بالطاقة الشمسيّة تكلفةً في الأعوام الأخيرة. ففي عام 2015، سجلت رقمًا قياسيًا بتكلفة 5.6 سنتًا أمريكيًا لكل كيلووات ساعة، ولاحقًا في عام 2016، بسعر 2.99 سنتًا أمريكيًا لكل كيلووات ساعة، وكلاهما في دبي. أمّا الرقم القياسي الأخير فسجِّل في عام 2020 بقيمة 1.35 سنت أمريكي فقط لكل كيلووات ساعة في أبوظبي لمشروع الظفرة للطاقة الشمسية ذو استطاعة 2 جيجاوات[23].

وانخفضت تكاليف طاقة الرياح والطاقة الشمسية المركّزة كثيرًا أيضًا. في دبي، حقّقت محطّة الطاقة الشمسيّة المركزة بقوة 700 ميجاوات تكلفة مستوية قدرها 7.3 سنتًا أمريكيًا لكل كيلووات ساعة. وعلى الرغم من أنّ تصور مزيج طاقة تهيمن عليه مصادر الطاقة المتجددة في المستقبل القريب بات أمرًا ممكنًا، يبقى ذلك النموذج معيبًا بفجوات عديدة تخلّفها الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، وهنا يأتي دور الهيدروجين ليلعب دورًا أساسيًا في سدّها.

الرقم القياسي الأخير سجِّل في عام 2020 بقيمة 1.35 سنت أمريكي فقط لكل كيلووات ساعة في أبوظبي لمشروع الظفرة للطاقة الشمسية ذو استطاعة 2 جيجاوات.

إزالة الكربون من الصناعات الثقيلة

سيلعب الهيدروجين دورًا خاصًا في إزالة الكربون من الصناعات الثقيلة عالية التلويث مثل إنتاج الإسمنت والصلب، إذ يصعب توفير الحرارة المطلوبة لمثل هذه الصناعات بواسطة الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، وعلى العكس من ذلك، يحترق الهيدروجين بدرجات حرارة عالية جدًا، مما يجعله بديلاً واقعيًا ونظيفًا للوقود الأحفوري[24]. فمثلًا، إنتاج الصلب الذي يطلق نحو 7% إلى 9% من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون العالمية[25]، ممكن بطرق متعددة أخرى يستخدم فيها الهيدروجين الأخضر، بدلًا من ضخ الفحم المسحوق، ما يقلل الانبعاثات بنسبة تصل إلى 20%، وبالإمكان استخدامه كمادة اختزال بديلة لإنتاج الحديد الإسفنجي، ما ينتج فولاذًا شبه محايد كربونياً، إن كانت الكهرباء المستخدمة مولدة من مصادر متجددة[26].

الشكل 8. تصدر الصناعة خمس انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في العالم

المصادر: بلومبرغ ووكالة الطاقة الدولية.

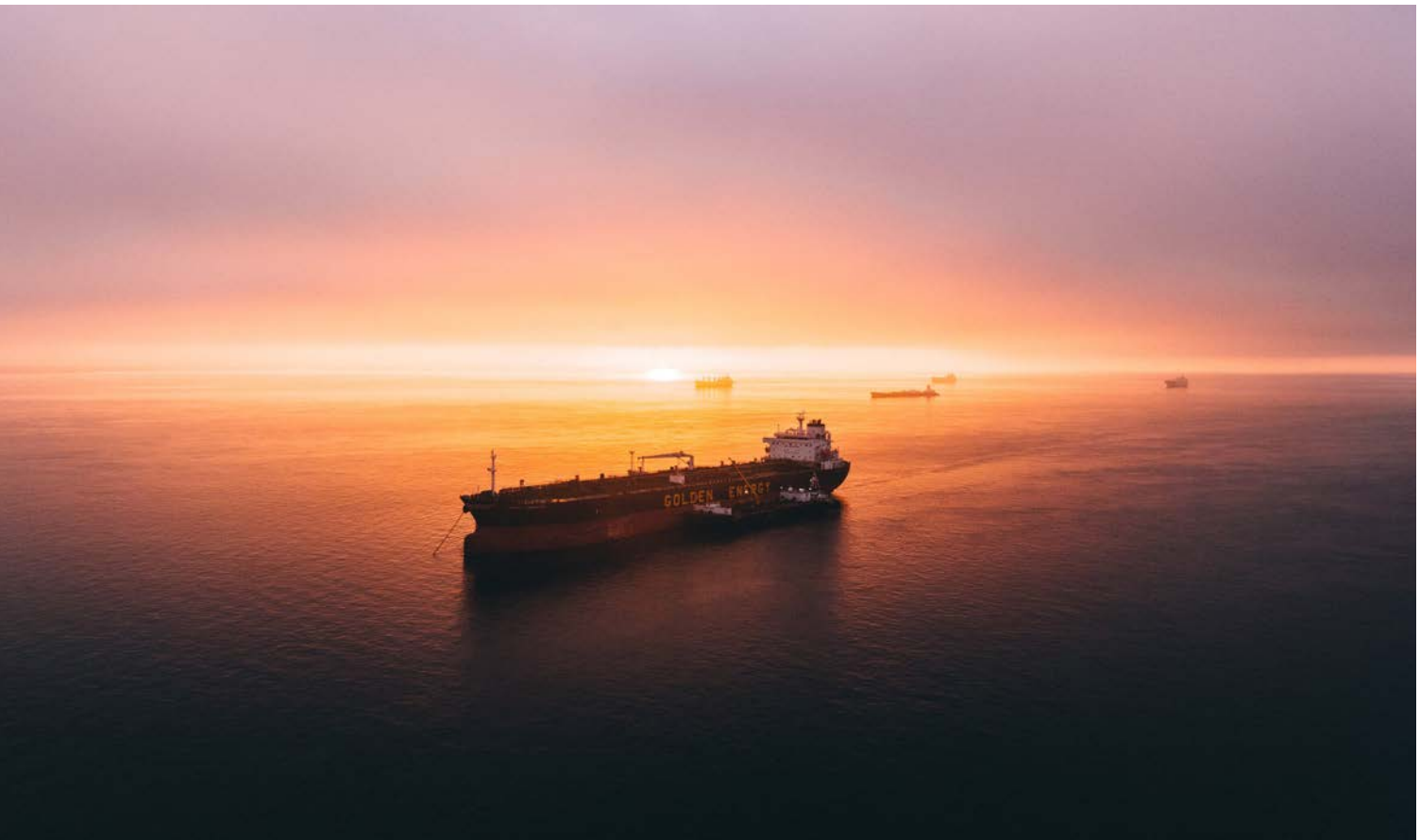
النقل الجوّي والبحري

سيلعب الهيدروجين أيضًا دورًا حيويًا في إزالة الكربون من القطاعات التي يشكل فيها الوزن عاملًا حاسمًا نظرًا لطاقته العالية في واحدة الكتلة. ومنذ عقود، ما زال الهيدروجين الوقود المفضل للصواريخ وصناعة الفضاء، واليوم أمام قطاعات أخرى مثل الطيران والشحن، فرصة التحول إلى الوقود الهيدروجيني لخفض وطأتها على تغير المناخ.

يعد الهيدروجين حلاً واعدًا في قطاع الطيران خصوصًا، لأنه بديل نظيف للكيروسين المستخدم وقودًا للطائرات، وهو يزن أقل منه بكثير إن استثنينا من الحساب خزانات الاحتواء. والواقع أن طاقة الهيدروجين في وحدة الكتلة أعلى بثلاث مرات من وقود الطائرات التقليدي[27]. لكنه من جانب آخر محدود بقيود تقنية أخرى مثل الحجم الكبير الذي تحتاج إليه خزانات الهيدروجين ووزنها الثقيل، بالإضافة إلى ارتفاع تكاليف إنتاجه، وعدم توفر البنية التحتية في المطارات لنقله وتوفيره للطائرات.

يعمل الباحثون اليوم على تطوير استخدام خلايا الوقود الهيدروجينية لإنتاج الكهرباء اللازمة لتشغيل مراوح الطائرات الصغيرة، وتتجه صناعة الطيران إلى استخدامه في تشغيل الطائرات النفاثة الكبيرة، إذ أعلنت شركة إيرباص أنها قد تطلق أول طائرة ركاب تعمل بالهيدروجين بحلول عام 2035[28]. وتقدر إحدى الدراسات أن ما يصل إلى 40% من الرحلات الجوية في أوروبا ستعمل بالهيدروجين بحلول عام 2050[29].
يفيد الهيدروجين أيضًا في تقليل انبعاثات الطيران بدخوله في صناعة وقود الطائرات الاصطناعي الذي يدمج فيه الهيدروجين الأخضر مع ثاني أكسيد الكربون المحتجز.
صحيح أن استخدام وقود الطائرات الصناعي ينتج انبعاثات كربونية، ولكن إن كان ثاني أكسيد الكربون المستخدم في إنتاج هذا الوقود ملتقطًا من الهواء مباشرة، فإن العملية تصبح حلقة صفرية الانبعاثات.

وبصورة مشابهة، بإمكان الهيدروجين أن يلعب دورًا محوريًا في إزالة الكربون من قطاع الشحن، إما باستخدام خلايا الوقود وإما بحرقه وإما باستخدام الأمونيا المصنّعة بالاعتماد على الهيدروجين الأخضر. وحين يُدرس استخدام وقود منخفض الكربون للسفن، غالبًا ما تُفضل الأمونيا على الهيدروجين لعدة أسباب أهمها كثافة الطاقة فيها، وتخزينها السهل قليل التكلفة، واعتمادها على تقنية مجرّبة ومبرهنة الجدوى، وتوفر شبكة توزيع عالمية لها.



تصدير الموارد الشمسية

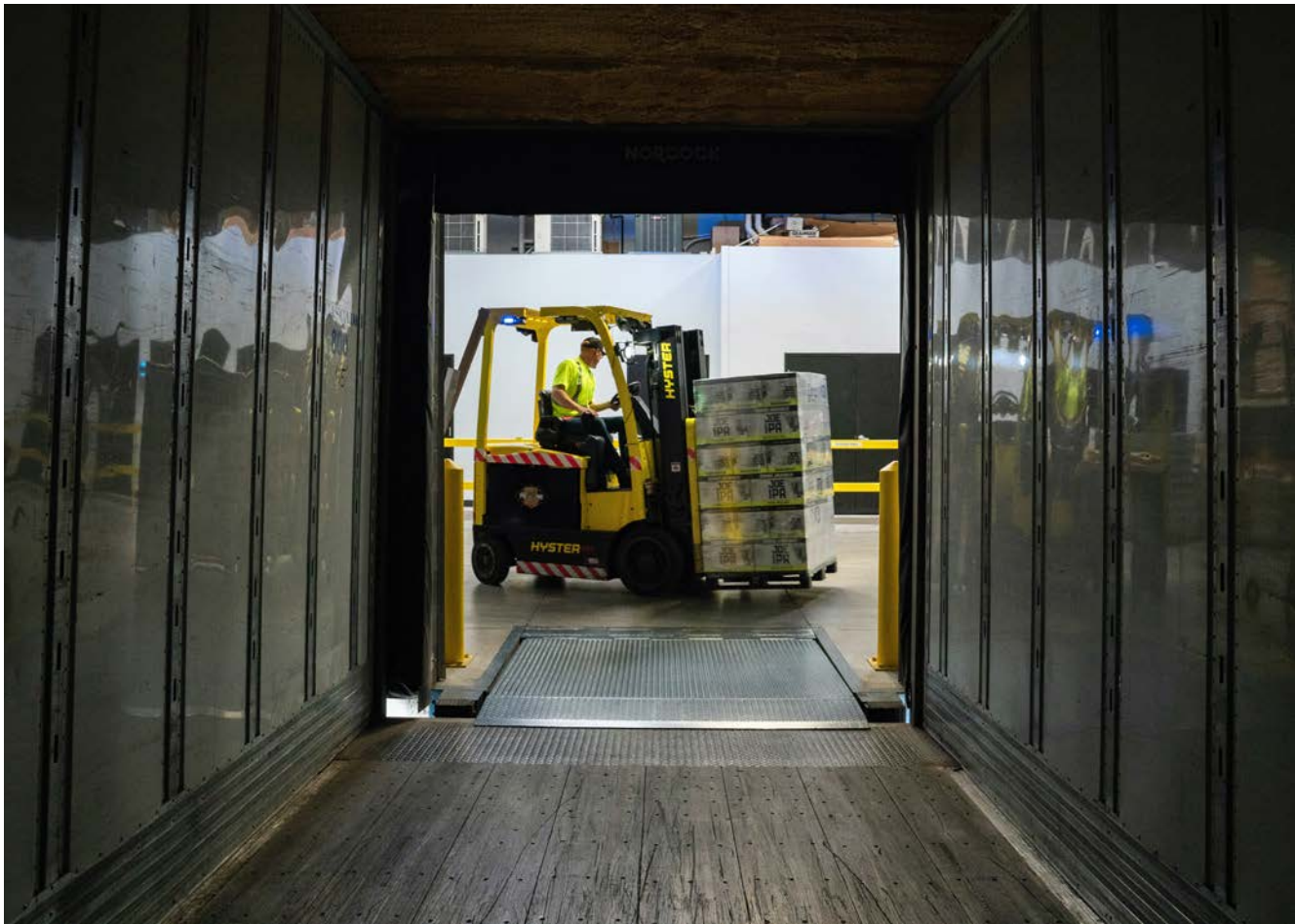
تتمتع دولة الإمارات العربية المتحدة ومعظم الدول العربية بموارد شمسية ممتازة، وانطلقت فعلًا خطواتها الأولى للاستفادة من تلك الميزة، ومن انخفاض تكاليف الطاقة الشمسية الكهروضوئية، بتطوير حدائق شمسية واسعة النطاق. والطاقة الشمسية قابلة للتحويل والتخزين في شكل هيدروجين أخضر، ثم بالإمكان تسييل هذا الأخير وتصديره إلى دول أخرى لتوليد الكهرباء النظيفة. وأثبتت بروناي واليابان واقعية هذه الإمكانية مؤخرًا بإنشاء أول سلسلة إمداد في العالم للهيدروجين المتداول دوليًا. لكن بدلًا من تسييل الهيدروجين بخفض حرارته وضغطه -وهي عملية تستهلك طاقة كبيرة- تعتمدان على تفاعل الهدرجة باستخدام التولوين لإنتاج ميثيلسيكلوهكسان (MCH)، وهو مادة سائلة تحت درجات حرارة الغرفة والضغط الجوي العادي، ما يتيح استخدام المرافق الحالية لتخزينه ونقله. بعد ذلك يستخرج الهيدروجين في اليابان ويستخدم في توليد الكهرباء، ويعاد التولوين مرة أخرى إلى بروناي لاستخدامه مجددًا في عملية الهدرجة[30]. وتجري أستراليا أيضًا -وهي أكبر مصدر للفحم في العالم- محادثات مع اليابان بهذا الخصوص إذ تطمح أن تصبح المصدر الرئيس للهيدروجين لها.

تخزين الطاقة وتوليد الكهرباء

معروف أن مصادر الكهرباء التي تعتمد على الطاقة الشمسية وطاقة الرياح متقطعة بطبيعتها. صحيح أن البطاريات غالبًا ما تكون وسيلة التخزين المفضلة للطاقة المستمدة من هذه المصادر المتقطعة، ليصار لاستخدامها عند الحاجة، إلا أنَّ الهيدروجين قابل أن يلعب دور حامل الطاقة البديل، مع فائدة إضافية تتمثل في إمكانية النقل ما يوفر الموثوقية والاستقرار الضروريين اللذين تفتقر إليهما مصادر الطاقة المتجددة. مثلاً، بالإمكان إنتاج الهيدروجين الأخضر من الطاقة الشمسية الزائدة عندما يتوفر فائض منها، ثم استخدامه لاحقًا لتوفير الكهرباء حينما يتوقف توليد الطاقة المتجددة.

النقل الثقيل

تعمل مجموعة متنوعة من المركبات حاليًا بتقنية خلايا الوقود وهي تقنية اقتصادية أكثر للمركبات الثقيلة وقصيرة المدى مثل الرافعات الشوكية والشاحنات المحلية. ولا ريب أن تطوير اقتصاد الهيدروجين سيجعلها منافسة اقتصاديًا مع كل من السيارات الكهربائية التي تعمل بالبطاريات ومحركات الاحتراق الداخلي.



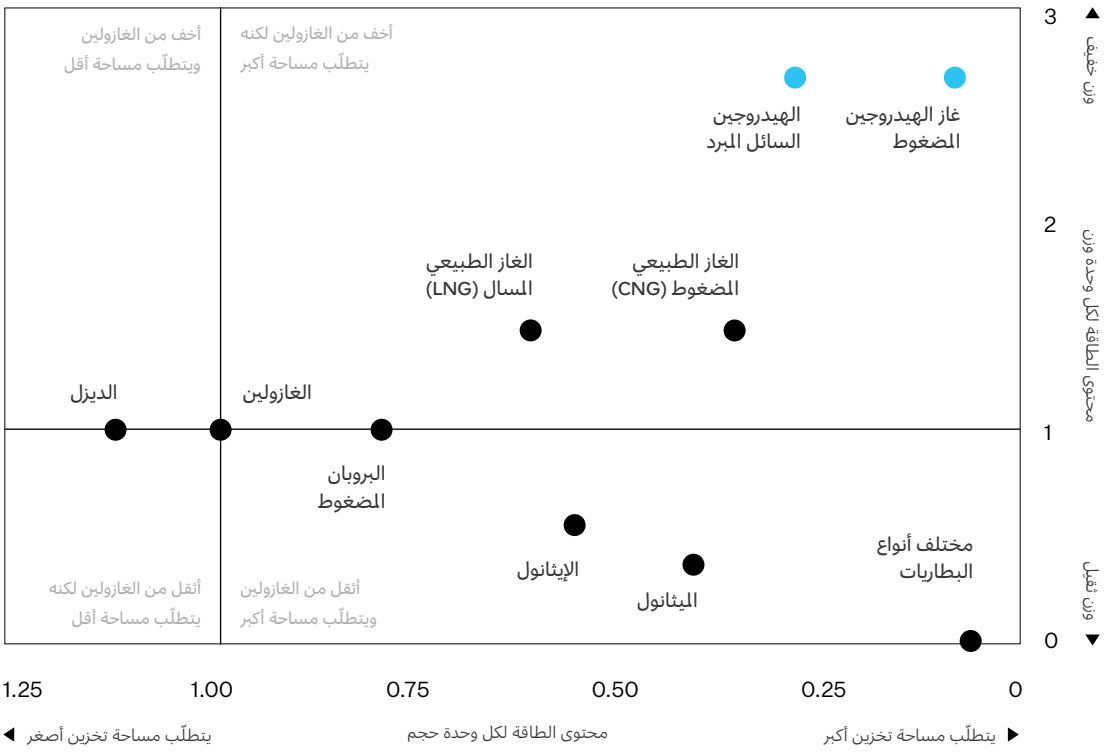
7.

التـــغلُّب على التحديـــات

نقل الهيدروجين

يمتاز الهيدروجين بطاقة نوعية عالية -وهي محتوى الطاقة في وحدة الوزن- وهي أعلى في الهيدروجين بكثير من معظم أنواع الوقود الأخرى. لكن من ناحية أخرى نجد أن كثافة الطاقة في الهيدروجين -أي كمية الطاقة في وحدة الحجم- منخفضة. فإذا كان المطلوب استخدامه في التطبيقات الثابتة، مثل تخزين الطاقة لشبكة كهربائية، فإن كثافة الطاقة لا تقف حجر عثرة، إذ يسهل تخزين الهيدروجين بكميات كبيرة تحت الأرض في كهوف الملح أو في حقول النفط والغاز المستنفدة[31]. أمّا حينما يراد نقل الهيدروجين، سواء للتصدير أو كوقود، فإن الخزانات الكبيرة غير عملية، ولهذا غالبًا ما يُضغط الهيدروجين أو يسيّل لرفع كثافة طاقته.

الشكل 9. مقارنة كثافة الطاقة لعدّة أنواع من الوقود المستخدم في قطاع النقل
(مفهرسة نسبةً إلى الغازولين = 1)



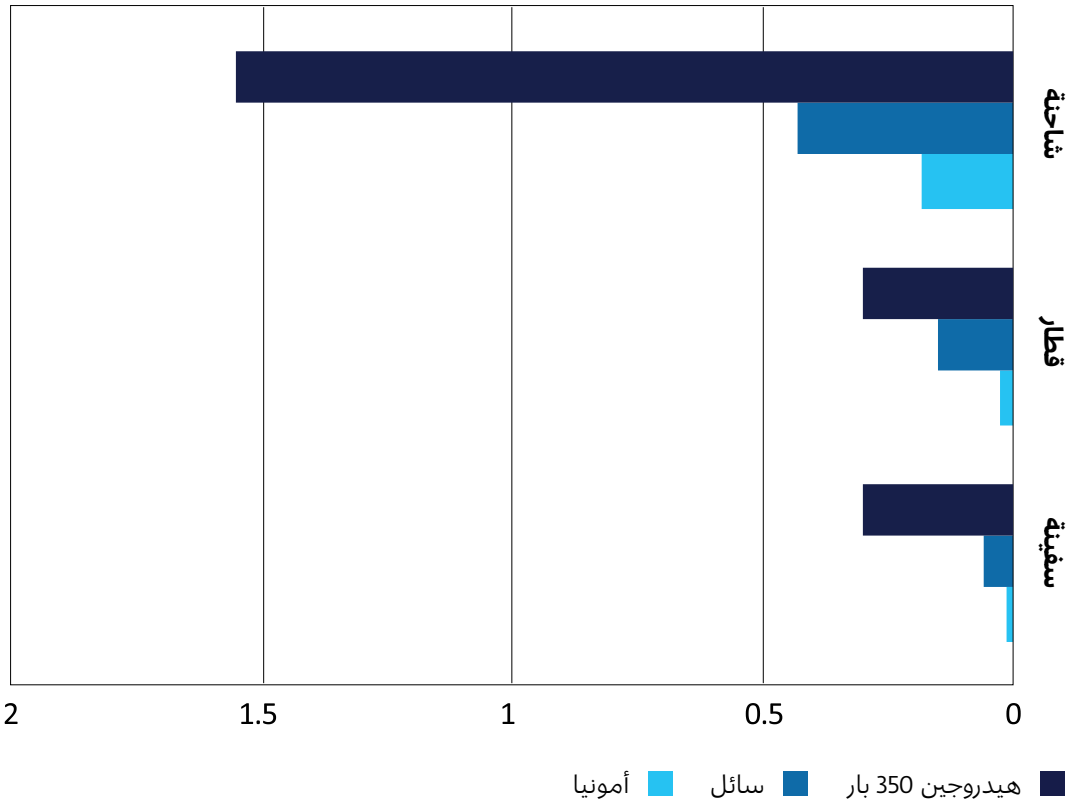
المصدر: إدارة معلومات الطاقة الأميركية

لكن طرق زيادة كثافة طاقة الهيدروجين ما زالت بعيدة تمامًا عن الكفاءة، ما يجل نقل الهيدروجين تحديًا يجب تجاوزه. اليوم تستهلك عملية التسييل 40% من الطاقة التي يحملها الهيدروجين، وتهدر عملية ضغطه نحو 20% أخرى[32]. تشمل التحديات الأخرى الحاجة إلى خزانات قوية قادرة على تخزين الهيدروجين بضغط يعادل 5000 رطل على البوصة المربعة، ولهذا لا بد أن تزن، ما يقدر بنحو 65 ضعفًا ما تستطيع احتواءه من الهيدروجين[33].

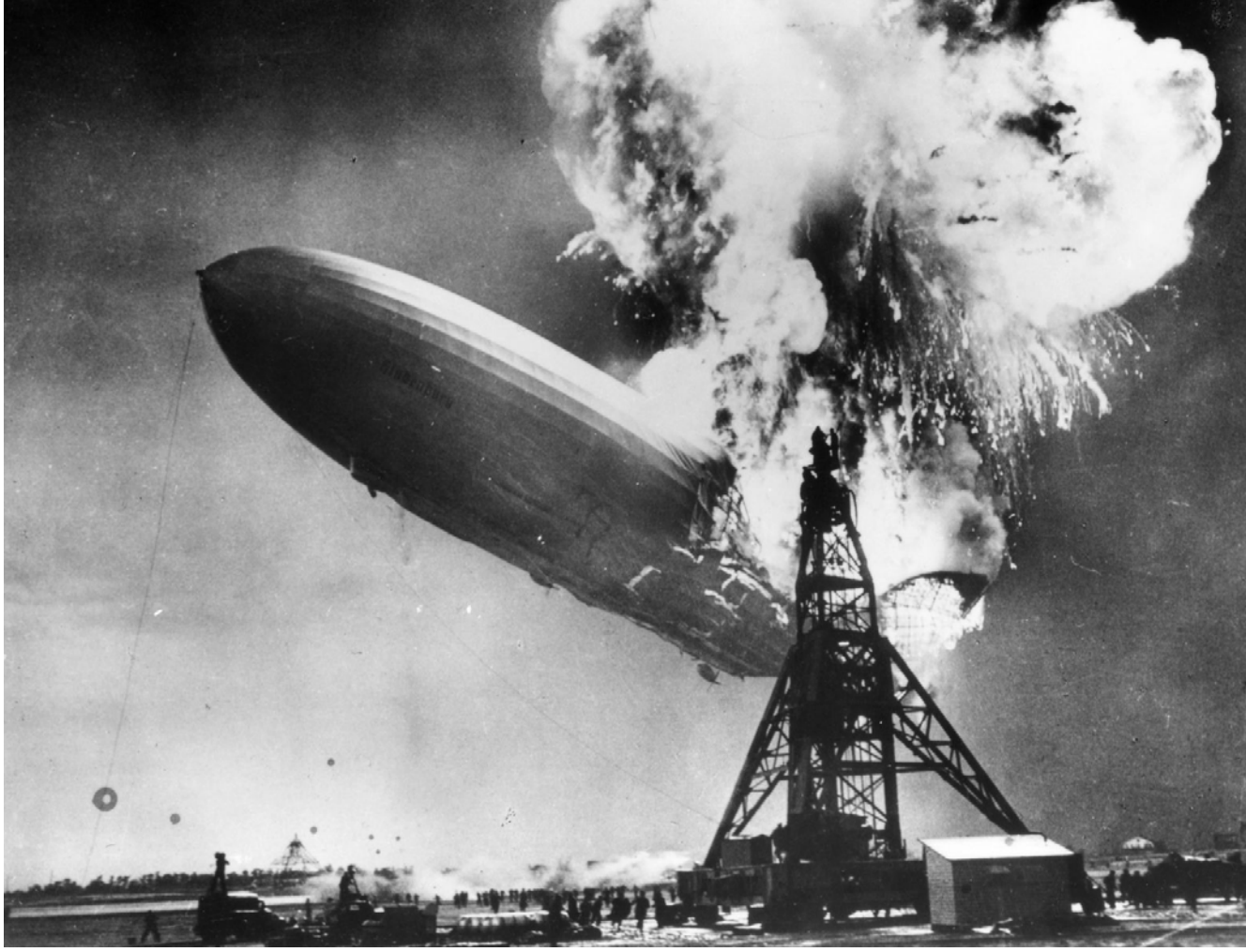
يشكل هذا التحدي فرصة لمزيد من البحث والتطوير، ويختبر العلماء حلولًا جديدة في مختلف أنحاء العالم، ومن أهمها التخزين الكيميائي للهيدروجين في شكل هيدرات[34]، وهدرجة الجزيئات العضوية لاستخدامها بمثابة ناقلات هيدروجين عضوية سائلة[35]، واستخدام الأمونيا بمثابة ناقل للهيدروجين. والطريقة الأخيرة أسهل للتخزين والنقل من الهيدروجين المضغوط أو الهيدروجين السائل وتحتوي على نسبة هيدروجين أعلى بنحو 50% من الهيدروجين السائل[36].

الأمونيا أسهل للتخزين والنقل من الهيدروجين المضغوط أو الهيدروجين السائل وتحتوي على نسبة هيدروجين أعلى بنحو 50% من الهيدروجين السائل.

الشكل 10. التكاليف المقدرة لنقل الهيدروجين والأمونيا بالشاحنة أو القطار أو السفينة



المصدر: الجمعية الملكية



السلامة

لا تكتمل دراسة عن استخدام الهيدروجين دون تذكر كارثة منطاد هيندنبورغ، فهي مأساة دمغت التصور الشائع لاستخدام الهيدروجين في الطيران بعلامة لا تمحى. الكارثة أكثر تعقيدًا بكثير من ظاهرها، لكنها تسلط الضوء على الخصائص الخطرة للهيدروجين، والتي نلخصها في النقاط التالية:

> «يشترك [الهيدروجين] مع الميثان والبروبان بكونه عديم الرائحة واللون والمذاق، وعلى الرغم من أنه غير سام وغير مسرطن، إلا أنه غاز خانق إن انتشر حولك. أما أهم مخاطره المتعلقة بموضوع هذا التقرير فهو قابليته للاشتعال ولهبه غير المرئي ذو الحرارة العالية، وقابليته الشديدة للاحتراق أو تكوين مزيج متفجر مع الهواء.»[37]

وكل ما سبق يبرر المخاوف من مخاطر إنتاج الهيدروجين واستخدامه على السلامة العامة. ويعلم العلماء منذ عقود المخاطر المرتبطة بالهيدروجين ويعملون على معالجتها. كما توضح الفقرة التالية:

«احتمال حدوث آثار مدمرة لانفجار الهيدروجين يعتمد أساسًا على البيئة المادية للإطلاق. والعديد من العوامل الرئيسة المؤثرة في ذلك معروفة فعلًا، وأمامنا عمل كثير، بعضه قيد التنفيذ حاليًا وبعضه الآخر في طور التخطيط، ينصب على استباق نمو اقتصاد الهيدروجين ورسوخ استخداماته. ولهذا متى كان خطر الانفجار معلومًا ومفهومًا ومأخوذا في الحسبان، لا ينبغي أن يشكل احتمال الانفجار عاملًا رئيسيًا في مخاطر الهيدروجين»[38].

يعزز ذلك بالتركيز على «الموارد المالية الكبيرة التي أنفقت على أبحاث الطاقة الهيدروجينية وتطويرها على مستوى العالم»[39] منذ عام 2008 من أجل تحسين ممارسات السلامة والتقدم التقني. لقد رصدت موارد مخصصة لتحسين تصميم خلايا الوقود والنقل - وهو مصدر قلق أول من ناحية السلامة.[40-41]

التصديق والمعايير

يخضع قطاع إنتاج وقود الهيدروجين - خاصة الهيدروجين الأزرق/الأخضر- لخليط أولي من معايير السلامة والجودة والمعايير الفنية، وهذه طبيعة أي تقنية ناشئة. فمثلًا تختلف هيئات التصديق في مختلف أسواق التصدير الرئيسة المحتملة (وتشمل إدارة التقييس الصينية، والمنظمة الدولية للمعايير ومقرها سويسرا، واللجنة الكهروتقنية الدولية) بشكل كبير في معاييرها المتعلقة بتقنية الهيدروجين، وبهذا نجد 93 معيارًا منفصلًا يجب الالتزام به في هذا القطاع، وهي معايير ISO 28 وIEC 17.

في حين أن العديد من هذه المعايير تحدد المواصفات الفنية للمعدات الاستهلاكية، فإن بعضها مهم لمصدري الهيدروجين. يحدد معيار ساك الصيني GB/T 37244-2018 متطلبات النقاء للهيدروجين المستخدم في مركبات خلايا الوقود، بأن لا يتعدى التلوث بالأمونيا عتبة الجزء الواحد لكل عشرة ملايين جزء، ونقاء إجمالي بنسبة 99.97%. ما زالت معايير الاتحاد الأوروبي قيد الصياغة، لكن المصنعين الإيطاليين يضغطون لإقرار متطلبات نقاء الهيدروجين بنسبة 99.999%.[42]

الشكل 11. معايير الهيدروجين وفق إدارة التقييس الصينية والمنظمة الدولية للمعايير واللجنة الكهروتقنية الدولية

المصدر: إدارة التقييس الصينية

بالإضافة إلى معايير النقاء، فإن لمعايير السلامة أيضًا تأثيرها على منتجي الهيدروجين وناقليه. وتعمل وزارة الطاقة الأمريكية حاليًا على صياغة الإرشادات والشروط والمواصفات لوقود الهيدروجين، ومنها إمكانية إضافة الروائح والملونات لتسهيل اكتشاف تسرب الوقود، ويعود بعض أسباب ذلك إلى مخاوف السلامة التي أثارها انفجار الهيدروجين عام 2019 في موقع التزويد بالهيدروجين في سانتا كلارا.
أما الاتحاد الأوروبي فقد عقد ندوة خاصة بسلامة الهيدروجين لاقتراح معايير لمشاريع الهيدروجين وخلايا الوقود، في حين أن لدى المنظمة الدولية للمعايير 15 معيارًا متعلقًا بالهيدروجين قيد التطوير من خلال ISO/TC 197، اللجنة الفنية لتقنيات الهيدروجين. (لم تمثل دولة الإمارات العربية المتحدة في أي من الهيئتين كعضو أو مراقب.) ستحدد هذه المعايير الوصول إلى أسواق الاقتصادات الرئيسة وقد تكون بمثابة حواجز غير جمركية لمنع وقود الهيدروجين غير المطابق للمعايير من دخول الأسواق الوطنية.

سيؤدي تعاظم أهمية إزالة الكربون لمستهلكي وقود الهيدروجين، إلى ضرورة إدخال شهادات الطاقة الخضراء إلى الأسواق. وأصدر الاتحاد الأوروبي فعلًا توجيهين بشأن تعزيز مصادر الطاقة المتجدّدة - RED I وRED II - مع متطلبات لمنتجي الطاقة لتقديم ضمانات شهادات المنشأ التي توثّق مصدرها المتجدد أو المنخفض الكربون. من خلال عملية CertifHy، يطبق نظام الاعتماد هذا على الهيدروجين الأزرق والأخضر. وعلى أي منتِج للهيدروجين الأزرق أو الأخضر في دولة الإمارات ضمان قدرته على الامتثال لمتطلبات الاعتماد لأنه من دون شهادات منشأ مناسبة، لن يحصل الهيدروجين الخاص به على رصيد خفض الانبعاثات، وسيكون معرضًا لتكبد رسوم إضافية أو الاستبعاد من سوق الاتحاد الأوروبي.

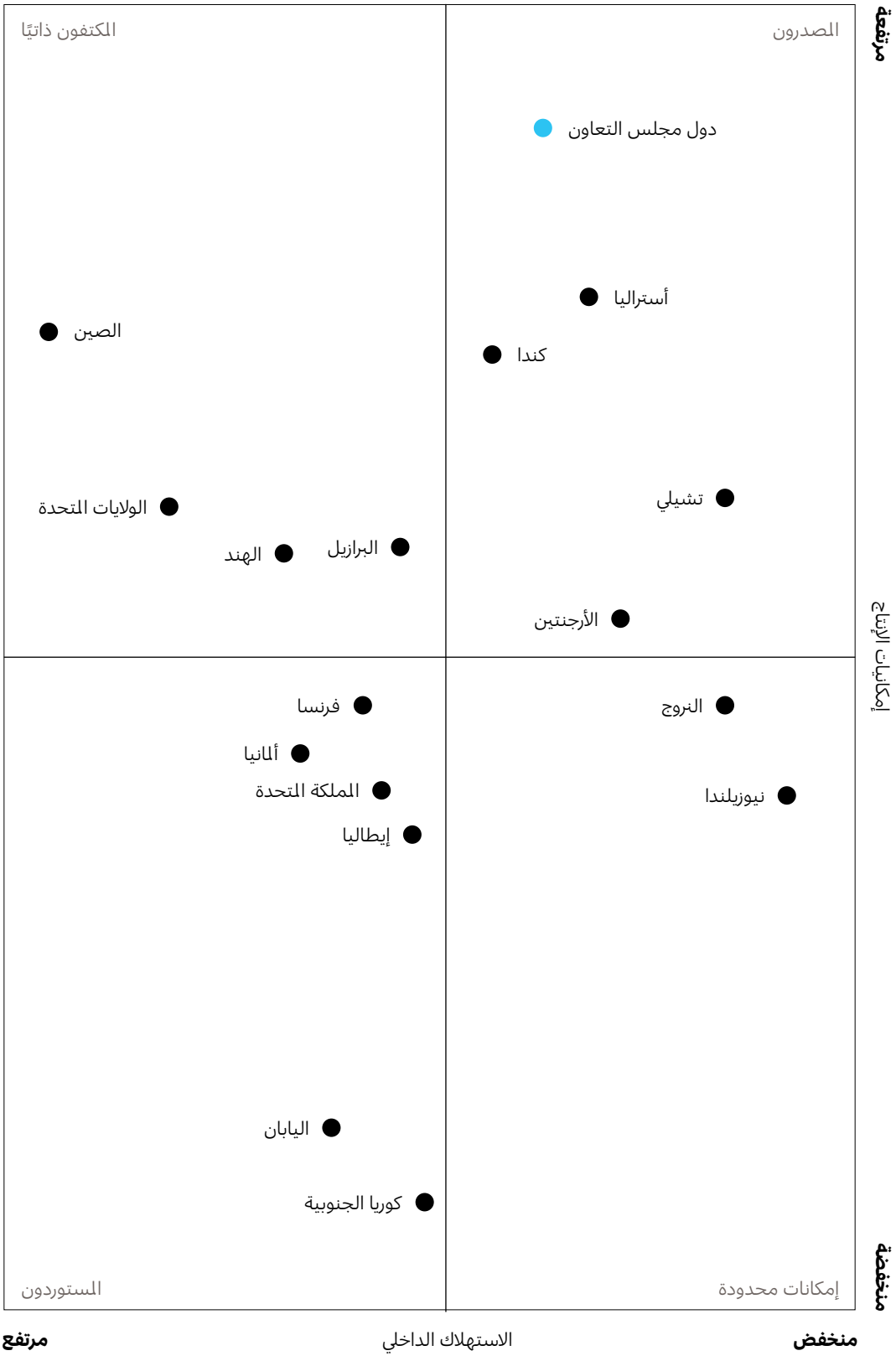
8.

استراتيـــجيات الهيدروجـــين عالمـــيّا

باتت مجموعة واسعة من الحكومات الوطنية والشركات الكبرى مقتنعة بالإمكانات الاقتصادية والتقنية والبيئية للهيدروجين. وفي حين ما زال القطاع - وخاصة إنتاج الهيدروجين الأخضر من مصادر الطاقة المتجددة – نظريًا إلى حد كبير، لا يضم سوى قليل من المرافق القائمة المخصصة غالبًا للأبحاث أو العرض. وطورت عدد من الدول ذات الاقتصادات المهمة خططًا تفصيلية وطموحة لإنتاج الهيدروجين على نطاق واسع. وستشكل هذه الاقتصادات قوى السوق الأساسيّة، ومصادر المنافسة المحتملة لدولة الإمارات في اقتصاد الهيدروجين العالمي، إذ من المتوقع أن يظهر سوق تداول تنافسي على المدى القريب إلى المتوسط. ويظهر في الشكل عرض مفصّل للأسواق المحتملة.

لدى دول مجلس التعاون الخليجي إمكانات تصدير ضخمة

الشكل 12. إنتاج الهيدروجين الأخضر، الاستهلاك المحلي وإمكانيات التصدير



المصدر: استراتيجي آند

القائمة أدناه ليست شاملة ولكنها تلخص الخطط المعلنة للدول الأكثر صلة بتنمية قطاع الهيدروجين في دولة الإمارات العربية المتحدة.

المملكة العربية السعودية

أدركت المملكة العربية السعودية هشاشة اعتمادها الاقتصادي على صادرات النفط، فتوجهت نحو الاستفادة من خبرتها في تجارة الطاقة العالمية للانتقال بقوة إلى إنتاج الهيدروجين الأزرق والأخضر مع تمتعها بظروف مواتية للإنتاج، منها امتلاكها خامس أكبر احتياطيات محلية من الغاز الطبيعي في العالم، وبعض المواقع الأكثر ملاءمة لطاقة الرياح والطاقة الشمسية، إضافة إلى بنية تحتية واسعة للطاقة ومجموعة واسعة من العلاقات التجارية.

بدأت المملكة العربية السعودية بالفعل في التحول إلى الهيدروجين. في سبتمبر 2020، نقلت أرامكو السعودية أول شحنة دولية من الهيدروجين الأزرق، إذ صدّرت بحرًا 40 طنًا من الأمونيا الزرقاء إلى اليابان من منشآت الإنتاج في الخليج العربي. يعد هذا المشروع التجريبي جزءًا من شراكة سعودية يابانية أكبر لتطوير مصادر طاقة خضراء لتغذية الاقتصاد الياباني الذي يعمل على إزالة الكربون ولكنه ما زال كثيف الاستخدام للطاقة.

تشكل مدينة نيوم المخطط لبنائها على ساحل البحر الأحمر في شمال غرب المملكة العربية السعودية حجر الزاوية في استراتيجية الهيدروجين الأخضر السعودية. يهدف المشروع الذي تبلغ تكلفته 500 مليار دولار إلى تطوير منطقة حضرية بطول 170 كيلومترًا في منطقة صحراوية خالية، باعتماد طاقة الهيدروجين كمصدر رئيس للوقود للنقل والبنية التحتية، ويتضمن موقعًا لإنتاج الهيدروجين الأخضر بقدرة 4 جيجاوات، وهو مشروع هيليوس للوقود الأخضر المصمم لإنتاج حوالي 240 ألف طن من الهيدروجين سنويًا، علمًا أنه سيبدأ بالإنتاج في عام 2025.[48]

تستفيد نيوم من موقعها أيضًا، فتقدم مناطق مناسبة للطاقة المتجددة غير مرتبطة بالبنية التحتية النفطية الحالية. بعد بناء نيوم، ستبدأ المملكة العربية السعودية في نقل مركز إنتاجها من الطاقة المعدة للتصدير من الخليج العربي إلى البحر الأحمر، ما يخفض مسافات الشحن إلى أوروبا بمقدار 2000 ميل بحري[49].

لا ريب أن الخطط السعودية طموحة، إلا أن البناء في مشاريع هيليوس للوقود الأخضر لم يبدأ بعد وما زال مشروع نيوم بأكمله في مراحل التخطيط. وفي حين تتمتَّع المملكة العربية السعودية بإمكانات كبيرة، فإن استراتيجيتها تظل عرضة للتحولات الاقتصادية أو السياسية الفجائية. علاوة على ذلك، وتبعًا لسرعة تطور نيوم ونموها، قد يؤدي الطلب المحلي على الهيدروجين إلى إضعاف قدرة الدولة على التصدير مثلما حدث بعد تطوير مواردها من الغاز الطبيعي.

أستراليا

نظرًا لاتساع مناطق أستراليا الصحراوية وقحلها، فإن فيها عددًا من أكثر المواقع ملاءمة لإنتاج الطاقة الخضراء في العالم، بالإضافة إلى أنها تستفيد أيضًا من اقتصاد متقدم تقنيًا في مجالات الطاقة واستخراج الموارد، ما يؤهلها جيدًا لتطوير قطاع الهيدروجين الأخضر سريعًا. ولدى أستراليا مخزونات غاز طبيعي محلية مؤاتية لإنتاج الهيدروجين الأزرق، لكن موقعها البعيد في الساحل الشمالي الغربي ذي الكثافة السكانية المنخفضة والمتخلف نسبيًا، يجعل إنتاج الهيدروجين الأزرق أقل جاذبية من الناحية الاقتصادية بسبب التكلفة العالية ونقص البنية التحتية.

نشرت أستراليا استراتيجيتها الوطنية للهيدروجين في عام 2019، وتوقعت أن تمر فترة دراسة وتوسّع حتى عام 2025 قبل بدء الإنتاج التجاري للهيدروجين وتصديره. وكما في المملكة العربية السعودية، فإن تكاليف الإنتاج المنخفضة في أستراليا جذّابة لتطوير صناعة تصدير واسعة النطاق. المواقع المثلى لإنتاج الهيدروجين الأخضر وفيرة في جميع أنحاء أستراليا، لكن معظم المشاريع تتركز في شمال غرب البلاد بعيدًا عن المراكز السكانية في أستراليا، إلا أنها أقرب إلى أسواق التصدير الرئيسة في آسيا. عقدت أستراليا شراكة فعّالة مع اليابان، وبدرجة أقل، مع كوريا الجنوبية لتطوير قدرات إنتاج الهيدروجين الأسترالية لتلبية الطلبين الياباني والكوري المتوقعين.

يقع أكبر مشروع هيدروجين أخضر منفرد في العالم في شمال غرب أستراليا. ويقع مركز آسيا للطاقة المتجددة في بيلبارا، وهي منطقة محددة ضمن ولاية أستراليا الغربية أكبر بخمس مرات من مساحة دولة الإمارات العربية المتحدة (510.000 كم 2 مقابل 83.600 كم 2) ولا توجد فيها مدن رئيسة وعدد سكانها أقل من 70 ألف نسمة. تبلغ القدرة المخططة لمركز آسيا للطاقة المتجددة 26 جيجاوات بإنتاج يتوقع أن يصل إلى 1.75 مليون طن من الهيدروجين سنويًا، ستحوَّل إلى أمونيا خضراء لشحنها إلى المشترين الآسيويين. من المشاريع الأخرى الموجهة للتصدير، مشروع مرشيسون رنيووبل هيدروجين، ويقع غرب أستراليا أيضًا (5 جيجاوات، ونحو 300 ألف طن من الهيدروجين)، وباسيفيك سولر هيدروجين في كوينزلاند (3.6 جيجاوات، 200 ألف طن من الهيدروجين)، وإتش تو هب غلادستون، في كوينزلاند أيضًا (3 جيجاواط، 160 ألف طن). وتوجد مشاريع صغيرة قيد التطوير في نيو ساوث ويلز هي مخصصة أساسًا لتلبية الطلب المحلي.

يتمتع إنتاج الهيدروجين الأسترالي بدعم قوي من الحكومة الفيدرالية والولايات، بما يصب في قناة الأولويات الوطنية لإزالة الكربون والتنويع الاقتصادي بعيدًا عن التصدير إلى الصين حصرًا مع تحقيق التنمية الإقليمية. ما زالت معظم هذه المشاريع في مراحل التخطيط بانتظار موافقة الحكومة والتمويل النهائي، إذ يتعين على مركز آسيا للطاقة المتجددة مراجعة خططه بعد الرفض الأولي. على الأرجح لن تتخلى أستراليا عن استراتيجيتها لقطاع الهيدروجين، لكنها قد تجد أيضًا أن الخطط والجداول الزمنية الأولية كانت مفرطة التفاؤل.

الصين

تختلف الصين عن المملكة العربية السعودية وأستراليا بأنها تتبنى استراتيجية هيدروجين تركز أكثر على استهلاك وقود الهيدروجين واستخدامه في السوق المحلية كبديل للوقود الأحفوري. صحيح أن إنتاج الهيدروجين يمثل أولوية في نهج الصين، إلا أن تركيزها الأكبر منصب على تطوير ونشر تقنية خلايا وقود الهيدروجين واستخدام وقود الهيدروجين في الصناعات الثقيلة.

وسيكون من الصعب على الصين -على الرغم من إمكاناتها الكبيرة في مجال إنتاج الهيدروجين، وبخاصة الهيدروجين الأخضر في شينجيانغ والتيبت ومنغوليا الداخلية- أن تلبي الطلب المحلي المتوقع، مما سيخلق عجزًا في الهيدروجين على المدى القصير إلى المتوسط على الأقل.

كانت الصين من أوائل المنادين بجدوى الاعتماد على الهيدروجين. وأدرجت خطط تطوير تقنيات الهيدروجين وخلايا الوقود في مخططها الوطني لتطوير العلوم والتقنية (2006-2020) ودمجها في الخطة الوطنية لتقنية الطاقة الصادرة في عام 2016. ويرد الهيدروجين باستمرار في التخطيط الاقتصادي الاستراتيجي للصين. ومن المتوقع أن يشكِّل بحلول عام 2050 نحو 10% من إجمالي إمداد الطاقة، مع طلب يقدر بنحو 60 مليون طن، ما يمثل إنفاقًا يزيد عن تريليون يوان (154 مليار دولار أمريكي) سنويًا[50]. ولدى الصين خطط لنشر الهيدروجين عبر قطاعات اقتصادها. ففي قطاع النقل تستهدف إنشاء أكثر من 10 آلاف محطة وقود لتشكل شبكة على مستوى الدولة، مع بيع 5.2 مليون سيارة تعمل بخلايا الوقود سنويًا، وإنتاج 5.5 مليون بطارية تعمل بخلايا الوقود سنويًا. بالإضافة إلى الأهداف على المستوى الوطني، تؤكد سياسات المقاطعات أيضًا على تطوير الهيدروجين وإنشاء مناطق صناعية مخصصة لمنتجات الهيدروجين تتمركز 17 منها حول مدينة شنغهاي. تسعى الصين إلى الاستفادة من الأسواق الدولية لمنتجات الهيدروجين أكثر من وقود الهيدروجين ذاته.

من المقرر أن يكون أكبر موقع إنتاج صيني، وهو مصنع شركة بيجين جينغنغ باور في منغوليا الداخلية، أول مصنع أخضر للمحللات الكهربائية بقدرة تقاس بالجيجاوات، ويتوقع بدء الإنتاج خلال عام 2021. ومن المقرر في النهاية أن يعمل المعمل باستطاعة 5 جيجاوات مع إمكانية إنتاج تبلغ نحو 500 ألف طن من الهيدروجين سنويًا. سيشكل نجاحه بداية لاقتصاد هيدروجين جديد، وسيرسخ مكانة الصين كرائدة مبكرة. على الرغم من حجم هذا المشروع الأخضر، تخطط الصين لمواصلة إنتاج الهيدروجين الرمادي والبني على المدى المتوسط لتلبية الطلب المتوقع.

أظهرت الصين قدرتها على متابعة مشاريع تنمية طموحة وخصصت رأسمالاً كبيرًا لنجاح قطاع الهيدروجين. ويضاف إلى ذلك، أن حجم الاقتصاد الصيني ومكانته يؤثر على دول مهمة أخرى متقدمة في هذا القطاع، كاليابان وكوريا الجنوبية - وكلاهما جاران آسيويان يسعيان للحفاظ على تقدمهم التقني - وكبار المصدرين الداخلين إلى السوق الصينية. سيؤدي نجاح الصين المبكر إلى الضغط على دبي للتحرك بسرعة في استراتيجيتها الخاصة بالهيدروجين بالإضافة إلى زيادة احتمال حدوث تحول عالمي واسع النطاق نحو الهيدروجين كحامل للطاقة.

الاتِّحاد الأوروبي

أسوة بالصين، يسعى الاتحاد الأوروبي حثيثًا إلى التحول نحو الهيدروجين ليكون بديلًا رئيسًا محايدًا كربونيًّا للوقود في النقل والصناعة. إلا أنَّه خلاف الصين لا يتمتع بموارد جذابة لإنتاج الهيدروجين. الاتحاد الأوروبي مستورد رئيس للوقود التقليدي، إذ يعتمد خصوصًا على واردات الغاز الطبيعي من روسيا ودول الاتحاد السوفياتي السابق. وإنتاج الهيدروجين الأزرق سيتطلب واردات إضافية من الغاز كمادة وسيطة، ما يخفض فوائد إنتاج الهيدروجين المحلي. أما في قطاع إنتاج الهيدروجين الأخضر، فنجد أن معظم القارة ضعيفة الإمكانيات نسبيًا في إنتاج الطاقة من مصادر متجددة مقارنة بدولة الإمارات العربية المتحدة. تلعب طاقة الرياح والطاقة الشمسية دورًا متزايدًا في توليد الكهرباء، لكن مناخ القارة الأوربية يحد من نموهما. وفي الوقت ذاته، فإن الطلب المحلي على الطاقة، لا سيما في سياق الضغط المتزايد على الوقود الباعث للكربون، يحفز الاستخدام المباشر للطاقة المتجددة لا تحويلها إلى هيدروجين أخضر. ولكل هذه الأسباب يدرك الاتحاد الأوروبي أنه سيحتاج إلى استيراد الهيدروجين لتلبية الطلب الذي أوجدته خططه لإزالة الكربون[51].

حدد الاتحاد الأوروبي شمال إفريقيا وأوكرانيا كشريكين في الإنتاج لتلبية احتياجاته للاستيراد لأسباب اقتصادية بحتة. فالجزائر خصوصًا تتمتع بالظروف المثلى لإنتاج الهيدروجين الأخضر والأزرق. وهي حاليًا مورد رئيس للغاز الطبيعي إلى الاتحاد الأوروبي، ولديها بنية تحتية من خطوط الأنابيب التي تربط حقولها بأسواق الاتحاد الأوروبي.

أضف إلى ذلك أنَّ الطاقة الشمسية التي تسقط على أرض الجزائر قادرة على جعلها إحدى الدول المنتجة للهيدروجين الأخضر الأقل تكلفة في العالم، بعد توسيع نطاق النقل وتسهيله من خلال البنية التحتية القائمة للغاز. أما أوكرانيا فلا تمتلك إمكانات الهيدروجين الخضراء التي للجزائر، لكنها مؤهلة لتصبح منتجًا مهمًا للهيدروجين الأزرق باستغلال الحقول البحرية ومخزونات الغاز الصخري. وعلى الرغم من تحديد هذه المصادر المحتملة لواردات الاتحاد الأوروبي من الهيدروجين لا يبدو مؤكدًا أنها ستؤدي هذا الدور، إذ لم تنفذ أي من الجزائر وأوكرانيا مشاريع إنتاج للهيدروجين على نطاق واسع سابقًا، وسيحتاج كلا البلدين إلى استثمارات كبيرة لتطوير قطاع الهيدروجين وتحديث البنية التحتية قبل تمكنهما من التصدير بالكميات المأمولة إلى الاتحاد الأوروبي. ويرتبط اختيارهما بأولويات الاتحاد الأوروبي السياسية في المنطقة - إذ إنّه سيستفيد بشكل كبير من الاستقرار والنمو الاقتصادي في محيطه - أكثر من ارتباطه بالجدوى العملية لتزويد الجزائر وأوكرانيا لسوق الاتحاد الأوروبي.

يتأثر اعتماد الاتحاد الأوروبي لتقنية الهيدروجين للتقلبات السياسية كما في البلدان الأخرى، إلا أنَّ إزالة الكربون تمثل أولوية مشتركة بين القادة السياسيين على امتداد الطيف الأيديولوجي للاتحاد الأوروبي. أضف إلى ذلك أن حجم التخطيط والتمويل على مستويي الاتحاد والدول الأعضاء يعني التزامًا راسخًا بهذه التقنية. وسيؤدي تبني الاتحاد الأوروبي الناجح للهيدروجين أيضًا إلى تشكيل ضغوط على جيرانه الإقليميين والاقتصادات المتقدمة الأخرى لتحذو حذوه، وإلى تقليل تكاليف فرض تسعير الكربون مع انخفاض تكلفة التقنية منخفضة الكربون والهيدروجين الأخضر. وقد يفتح ذلك الآفاق للإسراع بتوسيع نطاق استخدام الهيدروجين إلى البلدان النامية من خلال دمج التقنية في استراتيجيات التنمية الدولية للاتحاد الأوروبي. من المرجح أن يكون التبني الناجح في كل من الاتحاد الأوروبي والصين كافيًا لفرض تحول عالمي حتى إن تخلفت الاقتصادات الكبرى الأخرى أو قاومت التحول إلى الهيدروجين.

الولايات المتحدة

أعلنت الولايات المتحدة مؤخرًا، أنها تستهدف خفض تكلفة إنتاج الهيدروجين النظيف إلى دولار واحد لكل كيلوغرام بحلول عام 2030[52]. لكن بسبب الجغرافيا وحدها، حتى مع الاستيعاب السريع لتقنية الهيدروجين، ليس مرجحًا أن تصبح الولايات المتحدة سوقًا مهمًا للهيدروجين الإماراتي، إذ يرجح أن تلبي معظم احتياجاتها من الهيدروجين من الإنتاج المحلي وتستورد العجز من المنتجين الإقليميين الأقرب في الأمريكيتين، ولا سيما كندا وتشيلي والأرجنتين. في الولايات المتحدة العديد من المناطق المناسبة لإنتاج الهيدروجين الأخضر بالإضافة إلى مخزون غاز طبيعي كافٍ لإنتاج الهيدروجين الأزرق.

كندا وتشيلي والأرجنتين

تعد الولايات المتحدة أهم سوق محتمل لوقود الهيدروجين في نصف الكرة الغربي. أما الاقتصادات الرئيسة الأخرى في الأمريكيتين فهي إما أقل تطورًا نسبيًا من الناحية التقنية والاقتصادية (البرازيل والمكسيك) أو تمتلك إمكانات إنتاج هيدروجين محلية وفيرة (كندا). وضعت كل من تشيلي وكندا استراتيجيات إنتاج الهيدروجين للاستفادة من ميزاتها الذاتية والجغرافية، لكن من غير المحتمل أن يكون لها تأثير على بيئة دبي الاستراتيجية والاقتصادية، إذ حددت تكلفة النقل والقيود المفروضة على مرحلة الإنتاج المبكر بما يضمن توجيه الإنتاج نحو السوق الأمريكية.

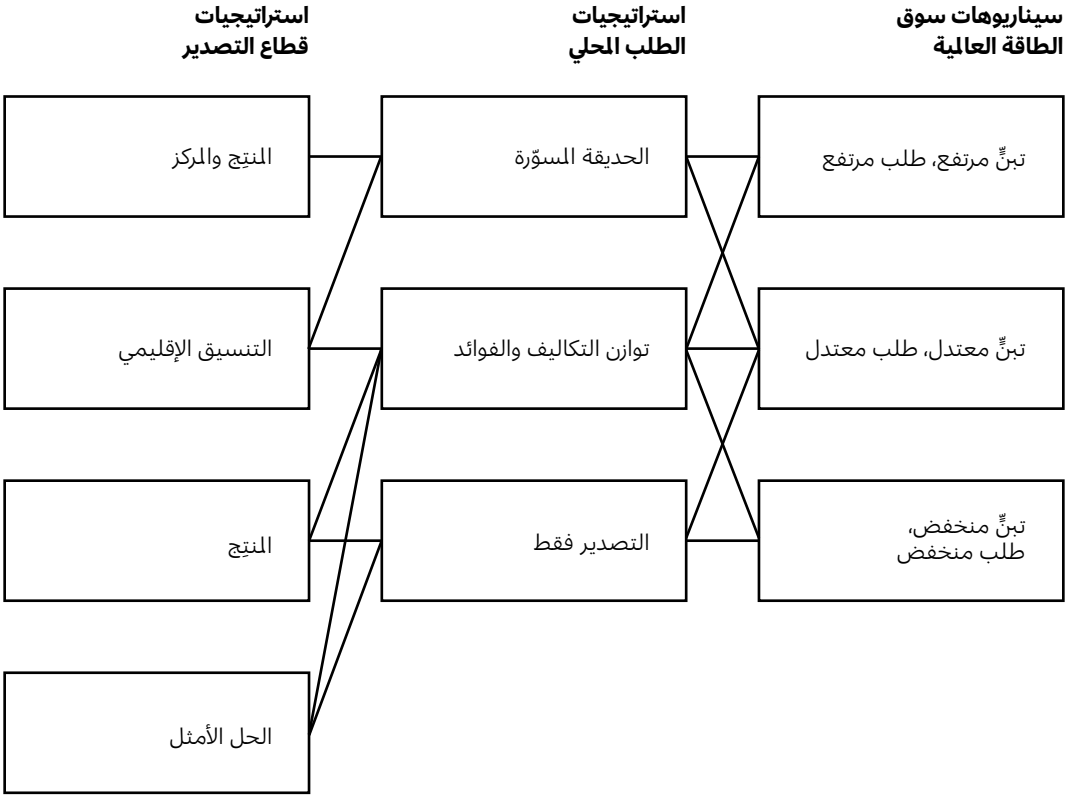
9.

مستقبل الهيدروجين في دولة الإمارات العربية المتحدة

إذ يهدف هذا التقرير إلى فهم إمكانات إنتاج الهيدروجين وتجارته في دولة الإمارات العربية المتحدة، فهو يجمع بين نمذجة البيانات ونهج السيناريو لتبويب النتائج المحتملة وتقديرها وتقييمها. يتكون إطار الدراسة من ثلاث طبقات: الأولى تمثل سيناريوهات مختلفة للاقتصاد العالمي، أما الثانية فتظهر أساليبًا مختلفة للسياسات في قطاع الهيدروجين المحلي في دولة الإمارات العربية المتحدة، وأخيرًا تظهر الثالثة أساليبًا سياسية مختلفة لاستراتيجية تصدير الهيدروجين في دولة الإمارات العربية المتحدة. وبهذا تحدد الطبقتان العلويتان السياق الدولي والمحلي وشروط الاستثمارات ومبادرات السياسة التي تشكل استراتيجية التصدير لدولة الإمارات العربية المتحدة، وهي عناصر أساسية في تحديد دور الدولة في اقتصاد الهيدروجين العالمي المستقبلي.

تمثّل الخطوط التآلفات بين السيناريوهات والاستراتيجيات، وحُسّنت الاستراتيجيات وفقاً لظروف السوق المتوقَّعة، علمًا أنَّ ظروفًا معينة ترتب استراتيجيات معينة، في حين أن ظروفًا أخرى تخفض كثيرًا احتمال تحقيق أهداف الاستراتيجية.

الشكل 13. سيناريوهات تبني الهيدروجين والطلب عليه



سيناريوهات سوق الطاقة العالمية

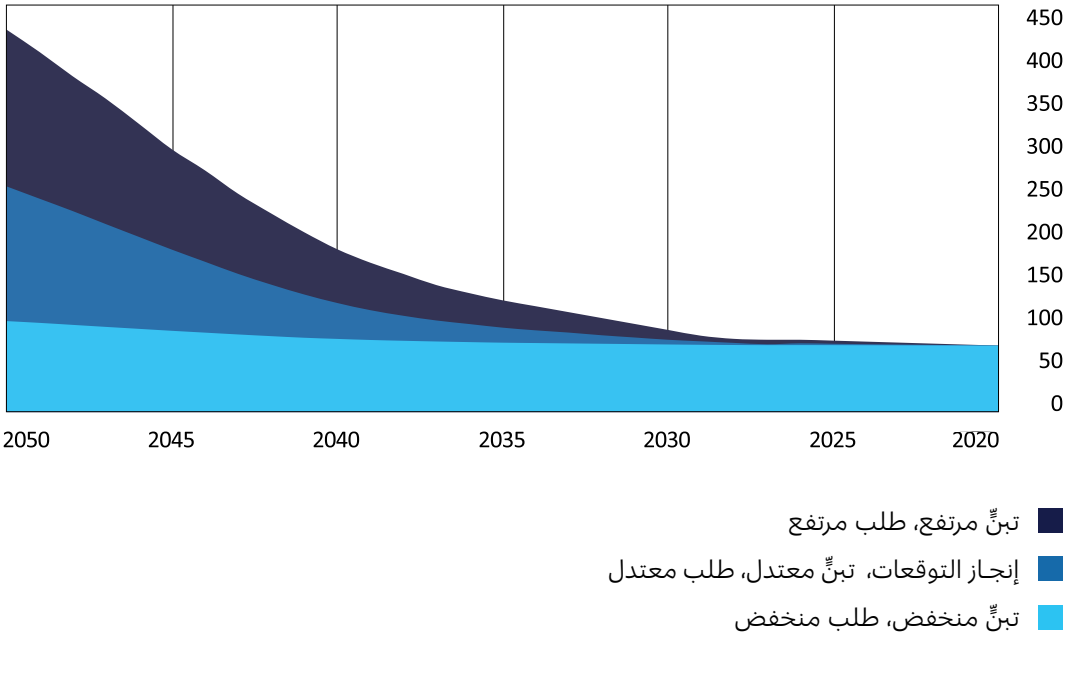
تصف هذه السيناريوهات تطور سوق الطاقة الدولية من ناحية استهلاكها للهيدروجين. وظروف السوق هذه خارجية بالنسبة لاقتصاد دولة الإمارات العربية المتحدة ولا تتأثر إلا قليلًا بأداء دولة الإمارات الدبلوماسي أو السياسي. إنَّها افتراضات أساسية مدمجة في النموذج الكمي من ناحية الطلب على الهيدروجين وتسعيره الدوليين. تمثل السيناريوهات الثلاثة المستقبل متشائمًا ومعتدلًا ومتفائلًا بما يخص اعتماد الهيدروجين. وتحول عوامل مجهولة كثيرة دون تعيين احتمالات دقيقة لكل سيناريو، وليس محبذًا لدولة الإمارات انتظار انقشاع الضباب كي تصوغ سياستها الخاصة، لأن الوقت سيكون قد تأخر كثيرًا. وكما في معظم الحالات سيتعين على صنّاع القرار الاعتماد على معلومات غير كاملة لتحديد ما يرونه المسار الأرجح لتطور اقتصاد الهيدروجين عالميًا.

يمثل وضع الاستراتيجية الفضلى لإدارة نشوء قطاع الطاقة الهيدروجينية تحديًا هائلاً. إذ إنَّ التقنيات الجديدة تشكل انقطاعًا عن النماذج والاتجاهات الحالية، ولها تأثيرات غير خطية على السعر والإنتاج.

ستعتمد الكفاءة على مدى التبني وحجم الاستثمار، واتساع قابلية التشغيل البيني، لكن ما زالت الشكوك تحيط بنجاح جهود الأبحاث والتطوير وتحقيق الأهداف الاقتصادية. الوضوح التام بمسار التطورات المستقبلية أمر مستحيل ولهذا يجب وضع افتراضات عن السياق الاقتصادي المستقبلي الذي ستطبق فيه استراتيجيات الهيدروجين في دولة الإمارات.

لا بد لأي استراتيجية هيدروجين فعالة من الارتكاز إلى مكانة دبي ودولة الإمارات العربية المتحدة كمركز مالي وتجاري ولوجستي دولي، إضافة إلى تكييف ميزاتها الذاتية مع الاحتياجات الخاصة لاقتصاد الهيدروجين الناشئ. ستعتمد الفوائد الاقتصادية لدولة الإمارات على تصدير الهيدروجين إلى السوق العالمية، ويشمل ذلك الهيدروجين الذي تنتجه دولة الإمارات وربما اقتصادات الشركاء في دول مجلس التعاون الخليجي. وهنا يجب أن ندرك أن صادرات الطاقة ليست سوى جانب واحد من المكاسب المحتملة من قطاع الهيدروجين، فقد تتيح خيارات السياسة الاستراتيجية أيضًا لدولة الإمارات العربية المتحدة الاستفادة من تطوير البنية التحتية للهيدروجين والتمويل والأبحاث والتطوير. لكن كل هذه المكاسب ستعتمد على التكيف الناجح مع البيئة الاقتصادية العالمية وتعزيز العلاقات ذات المنفعة المتبادلة مع المنتجين المجاورين ومستوردي الطاقة والدول الرائدة في تقنية الهيدروجين.

الشكل14. الطلب على الهيدروجين حسب سيناريو السوق



المصدر: مؤسسة دبي للمستقبل

لتوضيح الخيارات المتاحة لدولة الإمارات العربيّة المتّحدة في الاستجابة لنضج صناعة الطاقة الهيدروجينيّة عالميًا، نعرض أدناه ثلاثة سيناريوهات محتملة لمسارات الصناعة المذكورة:

تبنٍّ مرتفع، طلب مرتفع

في هذا السيناريو، تؤدي الطفرات العلمية في تقنية الهيدروجين على مستويي الإنتاج والتطبيق حينما تقترن بالجهود العالمية المنسقة لإزالة الكربون، إلى تسريع تبنِّي اعتماد الهيدروجين على المدى القصير وحتى المتوسط، ما يعيد تشكيل أسواق الطاقة العالمية لتعتمد على مصادر طاقة الهيدروجين. ولا يكتفي السيناريو الأكثر تفاؤلًا المستند إلى توقعات مجلس الهيدروجين[53] بتنفيذ الاستراتيجيات الوطنية المعتمدة حاليًا فحسب، بل يفترض تبني المستهلكين وصناعات القطاع الخاص لها أيضًا. وتسرِّع المرافق العامة والحكومات بمستوياتها كافة استثماراتها في البنية التحتية للهيدروجين، وسواء هدفت من ذلك إلى معالجة مخاوف تغير المناخ أو الاستفادة من الكفاءات الاقتصادية طويلة الأجل، فهي تسهم بإدخال خيارات المستهلكين في حلقة حميدة. تغدو طاقة الهيدروجين سلعة استراتيجية ذات أهمية عالمية، من خلال التكامل مع البنية التحتية للكهرباء المتجددة، ويصبح التخلص التدريجي واسع النطاق من استهلاك الوقود الأحفوري أمرًا ممكنًا. وبتنامي اقتصاد الهيدروجين عالميًا يصبح ممكنًا استيعاب أي حجم من الصادرات.

تبنٍّ معتدل، طلب معتدل

يفترض هذا السيناريو أن معظم الخطط الموضوعة وفق استراتيجيات الهيدروجين الوطنية المعتمدة تسير على قدم وساق، وأن الطفرات التقنية تؤدي إلى زيادة الكفاءة، وأنَّ سياسة الكربون العالمية تتطور إيجابيًا لمصلحة الهيدروجين، وأن اعتماد تقنية الهيدروجين يتزايد وفق المعدلات المتوقعة، وقد سهلته الحوافز الحكومية في الأسواق الرئيسة. وتحقق الحكومات الوطنية أهدافها

بشراء مركبات تعمل بخلايا الوقود، في حين أن التفويضات للمصنعين والحوافز للمستهلكين تزيد مبيعات القطاع الخاص كثيرًا.
تستجيب الصناعة الثقيلة لضغط إزالة الكربون من خلال الاستثمار في الهيدروجين كمصدر للحرارة والطاقة للعمليات الصناعية، وتتحول المدن والمناطق تدريجيًا إلى بنية تحتية للتدفئة قائمة على الهيدروجين. ويمثل الهيدروجين وسيلة تنافسية لتخزين الطاقة للطاقة الشمسية وطاقة الرياح. وينضج الهيدروجين كمصدر رئيس للطاقة العالمية، على الرغم من أن الوقود الأحفوري ما زال يلعب دورًا مهمًا مع تنافس التقنيات البديلة الأخرى معًا. وبانخفاض تكلفة الوقود الهيدروجيني يزداد استهلاكه في السوق العالمية.

تبنٍّ منخفض، طلب منخفض

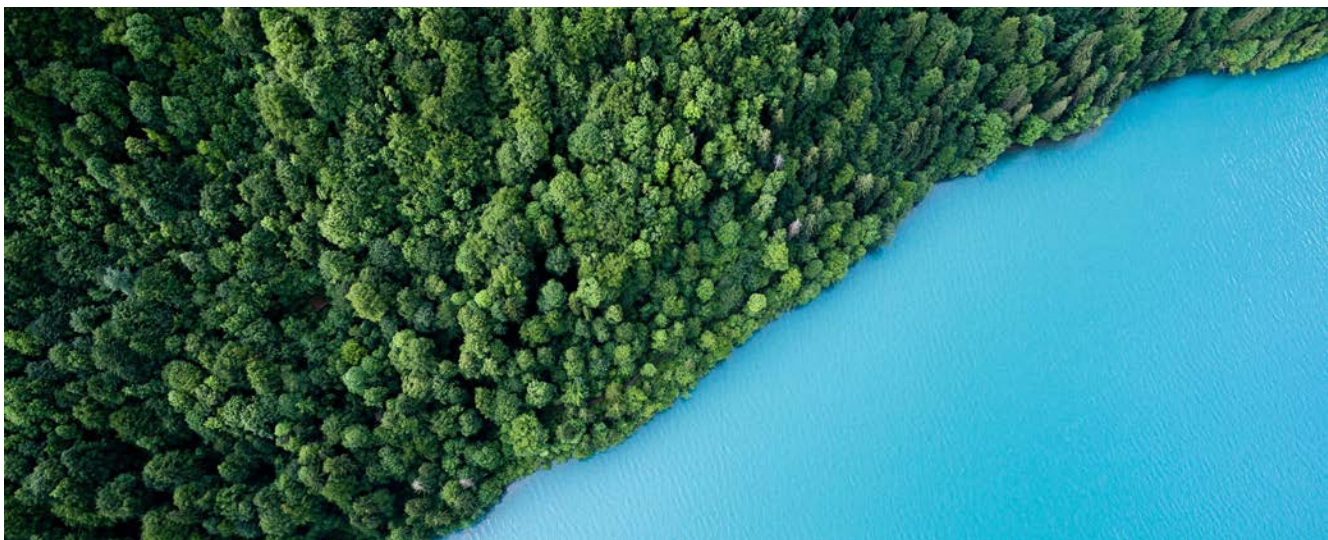
يستقصي هذا السيناريو احتمال أنّه على الرغم من تطوير العديد من الاقتصادات الكبرى ذات الثقل العالميّ مثل الصين واليابان والاتحاد الأوروبي، استراتيجيات الهيدروجين ذات الأهداف المزدوجة المتمحورة حول إزالة الكربون من اقتصاداتها وتعزيز تقنية الطاقة الجديدة، وبدئها في تنفيذ تلك الاستراتيجيات، فإنَّ القطاع يتأخر في بلوغ نقطة الانعطاف التي تجعل نجاح قطاع الهيدروجين حتميًا.
قد تؤدّي تحدّيات سياسيّة واقتصاديّة وتقنية من داخل قطاع الهيدروجين وخارجه، إلى تأخير اعتماد الهيدروجين كمصدر للطاقة أو تقويض جدواه. في هذا السيناريو، يظلّ الهيدروجين وقودًا متخصصًا وتقنية تجريبية مع مصادر طاقة أخرى - تقليدية و/أو بدائل أخرى – مهيمنة على السوق العالمية.

المتغيرات - محركات الطلب العالمي:

سيعتمد المسار الفعلي لاقتصاد الهيدروجين على قرارات السياسات في عدد قليل من المجالات الرئيسة لأسواق الطاقة:

تسعير الكربون

أصبح تأثير تغير المناخ واضحًا، وبتزايد الأدلة على أن احترار الكوكب بشري المنشأ، تواجه المنظمات الدولية والحكومات في الاقتصادات الرائدة ضغوطًا متزايدة للسيطرة على انبعاثات الكربون وتثبيت درجات الحرارة العالمية. وفي حين عوَّلت الاتفاقات الدولية الحالية على البلدان المتقدمة التي تحدد طواعية أهدافًا لخفض الانبعاثات، فقد أدخلت أيضًا بعض العناصر الأساسية لسعر عالمي لانبعاثات الكربون. وتسمح الآليات المرنة المتضمّنة في بروتوكول كيوتو للبلدان بتبادل أرصدة انبعاثات الكربون، بما يتيح لمصدر صافٍ تعويض بصمته الكربونية من خلال أرصدة خفض الكربون التي تشترى عن طريق دعم مشاريع قائمة في بلد آخر، ومنها إعادة تحريج الغابات وخفض الانبعاثات في الأنشطة الحالية واستبدال الصناعات الملوثة بتقنية منخفضة الانبعاثات. وتبنت بعض الحكومات الوطنية برامج تداول الانبعاثات التي تحد من انبعاثات الكربون عند مستويات محدَّدة وتسمح للصناعات بالتداول بأرصدة الانبعاثات. تسعى هذه البرامج إلى وضع قيود على إجمالي انبعاثات الكربون من خلال آليات السوق التي تحدد الانبعاثات ديناميكيًا. وإضافة إلى ذلك تم تطوير سوق دولية لتعويضات الكربون في القطاع الخاص حيث تمول الشركات أو المنظمات مشاريع تخفيف الكربون للمساعدة في تحقيق أهدافها لخفض الانبعاثات.



الالتزامات بتصفير صافي الانبعاثات

أعلنت 28 دولة حتى الآن عن خطط لتصفير صافي الانبعاثات الكربونية على المدى المتوسط. اثنتان منهما - سورينام وبوتان اللتان تتمتعان بخصائص بيئية وديموغرافية فريدة - حققتا صافي انبعاثات صفري، وست دول أدرجت خططها لتصفير صافي الانبعاثات في قوانينها الوطنية، واقترحت ست أخرى تشريعات لهذا الغرض، وما زالت الدول الأربعة عشرة الأخرى تطور خططًا لتحقيق الأهداف المعلنة. تشمل الدول المعنية قوى اقتصادية عظمى مثل الصين والاتحاد الأوروبي واليابان بالإضافة إلى الاقتصادات المتقدمة الرئيسية مثل كوريا الجنوبية وكندا. وعلى الرغم من أن الصين تمنح ذاتها مهلة حتى عام 2060، فإن معظم الالتزامات بتصفير صافي الانبعاثات تعتمد عام 2050 كموعد لتحقيق التزاماتها على الرغم من أن بعضها أكثر طموحًا وتعتمد مواعيد أقرب. إن تعامَل نصف هذه الدول مع التزاماته بجدية، فإن أفعاله ستثبت صحة التوقعات الأكثر جرأة لاعتماد تقنية الهيدروجين كمصدر أساسي للطاقة النظيفة على المدى القريب إلى المتوسط من الناحية الاقتصادية والتقنية. بالإضافة إلى إحداث ضغط تنافسي على البلدان التي لم تلتزم بعد بخطط الصفر الصافي (على الرغم من أن عدم وجود خطة أمريكية يشكل عيبًا صارخًا) فإن اعتماد طاقة الهيدروجين على نطاق واسع لبلوغ أهداف التصفير، ينتج حتميَّة استراتيجية لتبني تقنية جديدة أو مواجهة تقادم الطاقة.

البحث والتطوير العامّان في مجال الهيدروجين

ستحدد المخاوف البيئية وأهداف التكيف التقني مستويات الطلب العالمي على وقود الهيدروجين، ولكن أيا تكن الرغبة في اعتماد وقود الهيدروجين، فإن انتشاره الواسع سيعتمد على الابتكار التقني في جميع مراحل اقتصاد الهيدروجين، ويشمل ذلك تطوير المكهرلات الأكثر كفاءة والطاقة الشمسية الأرخص لإنتاج الهيدروجين الأخضر، وتقنيات فعالة لنقل الهيدروجين بشكل آمن وكفوء اقتصاديًا (خاصة عبر المسافات الطويلة) وريادة التطبيقات الجديدة لوقود الهيدروجين، ليس كبديل لتقنية الوقود الأحفوري فحسب، بل للاستخدامات الاستهلاكية والصناعية الجديدة أيضًا. وفي حين يصعب التنبؤ بمسارات الابتكار بسبب التأثيرات اللاخطّية للطفرات التقنية والمستقبل المجهول الملازم للأبحاث والتطوير، فإن التقدم يعتمد على التمويل المتزايد للأبحاث والتطوير.

يشكل البحث والتطوير المموَّلان من القطاع العام عاملًا أساسيًا في نضوج تقنية الهيدروجين. يتخصص القطاع الخاص في التقنية السهلة التسويق لأنها قريبة من النضج وكذلك في الابتكار المتكرر للتقنيات المدمجة بالفعل في سلاسل إنتاج الشركات. أما البحوث الأساسية وغيرها من الابتكارات الأولية التي تتسبب في خسائر فتعتمد على التمويل العام. صحيح أن مستوى البحث والتطوير المعلن عنه في استراتيجيات الهيدروجين على المستوى الوطني كافٍ لإحراز تقدم في هذا القطاع، إلا أنَّ التراجع عن الالتزامات يبقى أمرًا ممكنًا. وقد يحدث لمجموعة متنوعة من الأسباب - كالانكماش الاقتصادي المفاجئ، والأزمات المالية، والتغييرات في القيادة السياسية أو في اقتصاديات الطاقة. لقد انهار التمويل العام للبحث والتطوير للهيدروجين من قبل، إذ أدى الانخفاض المفاجئ في أسعار النفط، إلى جانب الأزمة المالية العالمية في 2009-2008 إلى انخفاض البحث والتطوير في مجال بالهيدروجين، بدأ باقتطاعات أولية معتدلة أعقبها في عام 2011 انخفاض حاد ناجم إلى حد كبير عن سياسة الميزانية الأمريكية. ولما كانت دبي تعتمد تقليديًا على الأبحاث الأجنبية للابتكار التقني فلن تتمكن وحدها من تخفيف وطأة انخفاض حاد في البحث والتطوير في مجال الهيدروجين على مستوى العالم. صحيح أن الصدمات الجيوسياسية أو الاقتصادية قد تؤدي إلى مثل هذا التراجع، إلا أنه أقل احتمالًا اليوم مقارنة بالعقد الماضي نظرًا لالتزامات الحكومات وحجم الاستثمارات التي رصدتها الحكومات والشركات.

أيا تكن الرغبة في اعتماد وقود الهيدروجين، فإن انتشاره الواسع سيعتمد على الابتكار التقني في جميع مراحل اقتصاد الهيدروجين.

التخطيط لدمج الهيدروجين

تسعى الاستراتيجيات الوطنية إلى تحقيق أهداف طموحة لشراء تقنية الهيدروجين وإدخالها في مختلف القطاعات والاقتصادات، إذ تضم خطط الاتحاد الأوروبي والصين وكوريا الجنوبية واليابان إدخال الهدروجين لتطوير الكهرباء الخضراء، وإزالة الكربون من الصناعات الثقيلة، وتوفير الحرارة والطاقة للمنازل والمباني العامّة، واستخدامه بديلًا للوقود الأحفوري في النقل من القطارات والمركبات الثقيلة إلى سيارات الركاب. وتجري كوريا الجنوبية تجارب لاستخدام الهيدروجين على مستوى المدن والبلدات في إطار خطط تطويرها، وتواصل الصين إدخال المركبات الكهربائية على نطاق واسع في أساطيلها للنقل العام. وحدّدت العديد من الاقتصادات الكبرى أهدافًا طموحة من رتبة الملايين للمركبات الكهربائية التي تعمل بخلايا الوقود على المدى المتوسط. ويعتمد ازدهار اقتصاد طاقة الهيدروجين المستقبلي على التنفيذ الناجح لهذه الخطط وتحقيق نتائج قوية للمحافظة على زخم اعتماد الهيدروجين.

ساعد الانتشار العالمي لتخطيط قطاع الهيدروجين على خفض مخاطر الفشل عبر تجنب الاعتماد على مصدر واحد للطلب، لكن الالتزامات الجريئة بالتقنيات الجديدة - والهيدروجين على وجه التحديد - أخفقت في تحقيق تغيير عملي على نطاق واسع. فمثلًا، في عام 2004، أطلقت كاليفورنيا مبادرة لتطوير «طريق هيدروجين سريع» لمحطات التزود بالوقود على مستوى الولاية، وما زالت تقدم خصمًا يصل إلى 7000 دولار للمستهلكين الذين يشترون مركبات خلايا الوقود الهيدروجينية.

وأطلق الحاكم في ذلك الوقت، الممثل السابق أرنولد شوارزنيجر، البرنامج باستخدام سيارة هامر إتش تو إتش تعمل بالهيدروجين التي اتخذها سيارته الشخصية، واستثمر رأسمالاً سياسيًا كبيرًا في البرنامج. لكن حتى اليوم - وبعد أكثر من 16 عامًا من إطلاق طريق الهيدروجين السريع – لم تبن سوى 44 محطة وقود في جميع أنحاء كاليفورنيا، ولم يتخطَّ عدد المركبات الشخصية التي تعمل بالهيدروجين 8000 مركبة. في أعقاب الأزمة المالية العالمية لعام 2008، كاد الهيدروجين أن يصبح تقنية يتيمة في كاليفورنيا، على الرغم من قيادتها المبكرة المتحمسة واستثماراتها الكبيرة في هذا القطاع. واليوم أصبحت الالتزامات الحكومية أكثر اتساعًا، على الرغم من أن التنفيذ العملي ما زال محدودًا. ويعني هذا أن قطاع تصدير الهيدروجين في دبي سيعتمد على الحكومات الأجنبية لمتابعة التزاماتها بإطلاق الهيدروجين في اقتصاداتها - سواء من خلال مشتريات القطاع العام أو الحوافز للمشترين من القطاع الخاص – إذ إنَّ التراجع السياسي يمثل خطرًا على الطلب العالمي على الهيدروجين.

قطاع تصدير الهيدروجين في دبي سيعتمد على الحكومات الأجنبية لمتابعة التزاماتها بإطلاق الهيدروجين في اقتصاداتها.

استراتيجيات الطلب المحلي على الهيدروجين

تصف استراتيجيات الطبقة الوسطى خيارات السياسة المحتملة لاعتماد اقتصاد الهيدروجين وتعزيزه وتنظيمه في دولة الإمارات العربية المتحدة. وهي خلافًا لسيناريوهات سوق الطاقة الدولية، نتائج القرارات السياسية لدولة الإمارات العربية المتحدة. وهي مستمدة من دراسات حالة عن سياسات صناعية ناجحة في بلدان أخرى (آسيا خصوصًا)، ومن المستحسن النظر إليها كحزم من الحوافز والاستثمارات والإصلاحات المتعلقة بقطاع إنتاج الهيدروجين والتي تتيح تنميته وتعززها. ولأن نطاق الخيارات في كل استراتيجية أوسع من أن يندرج ضمن النموذج؛ يجب التفكير فيها كوسائل لزيادة إمكانية تحقيق نتائج ناجحة لاستراتيجيات تنمية قطاع تصدير الهيدروجين.

في التجارب السابقة كان التطور الناجح للصناعات الجديدة مدعومًا بسياسة صناعية تقودها الحكومة في السوق المحلية لتسريع التطور التقني واعتماده، وتشجيع الاستثمار، وخفض مستوى الغموض المحيط بنمو السوق، والتغلب على التحديات التشغيلية. صحيح أن أفضل الأمثلة المعروفة مستمدة من دول شرق آسيا - السيارات والإلكترونيات الاستهلاكية في اليابان وكوريا، ومؤخرًا أنظمة تقنية المعلومات في الصين – إلا أن الأمثلة الناجحة منتشرة في مختلف أنحاء العالم، ومنها الرعاية الأوروبية لشركة إيرباص العملاقة في مجال الطيران التجاري. لكن من جهة أخرى نجد أن الإخفاقات المكلفة شائعة بالقدر ذاته وتنطوي على مخاطر هدر الموارد على صناعات غير تنافسية مع عواقب سلبية خطيرة على الاقتصاد كاملًا.

تصف استراتيجيات الطبقة الوسطى خيارات السياسة المحتملة لاعتماد اقتصاد الهيدروجين وتعزيزه وتنظيمه في دولة الإمارات العربية المتحدة.

صياغة استراتيجية قطاع الهيدروجين في دولة الإمارات العربية المتحدة تتطلب النظر في مجموعة من الخيارات لإدارة القطاع وتوجيه السوق المحلية. ويقدم نموذج السياسات الناجحة في بلدان أخرى بعض التصورات الإجمالية عن تنمية قطاعات صناعية جديدة:

1. يؤدي نمو الصناعات الجديدة إلى ترابطات معقدة، ولذلك يجب تجميع السياسات بشكل مناسب لتكون فعالة.

2. يجب أن تواكب السياسة الصناعية المحلية استراتيجيات التنافسية الدولية، ولا سيَّما في الاقتصادات المفتوحة.

3. يتطلب تنفيذ السياسة هيئات عامة تتمتع بمهارات عالية وموارد وفيرة، مع تنسيق بين مختلف مستويات الحكومة والوزارات.

4. يفيد تنفيذ الاستراتيجيات المناسبة على النحو الأمثل الدول التي ستتعلم من المحاولات المبكرة وتعزز سياساتها لسد الفجوات التقنية سريعًا والتقدم لتصبح من الدول القائدة للقطاع.

تشمل أدوات السياسة الرئيسة التي يجب مراعاتها ما يلي:

- إدارة الطلب من خلال أهداف وحوافز موثوق بها
- استثمار القطاع العام في البنية التحتية وشراء المعدات
- التنسيق بين المنتجين المحليين والمستهلكين
- المرونة التنظيمية ووضع المعايير

إدارة الطلب

تتمثل الأداة الرئيسة للسياسة الصناعية المحلية في وضع أهداف ذات مصداقية للناتج المطلوب في الصناعات الاستراتيجية، مدعومة بحوافز اقتصادية لتوجيه سلوك القطاع الخاص والمستهلك. بإمكان دبي تشكيل قطاع الهيدروجين من خلال تحديد أهداف الإنتاج لأنواع مختلفة من الهيدروجين - الأزرق أو الأخضر غالبًا- واستخدامات الهيدروجين - مثل الصناعة أو النقل – مع ربطها بمهل وأهداف متوسطة محددة. ولا ريب أن دعم الحكومة لقطاع ناشئ يعد إشارة قوية للمستثمرين ورجال الأعمال بأن التقنية المستهدفة ستحقق عائدات بمرور الوقت، علماً أنَّ المستثمرين الأوائل سيحظون بفرصة اكتساب مركز مهيمن. شكّلت أهداف الإنتاج واستراتيجيات التنمية أساس الانتعاش الاقتصادي في أوروبا بعد الحرب العالمية الثانية، وصعود اليابان واقتصادات النمور الآسيوية الجديدة، وظهور الصين كقوة اقتصادية عظمى (لا تختلف الصين عن الباقين سوى في تسمية أهدافها بشكل مباشر: خططًا خمسية). تتمثّل إحدى نقاط القرار الرئيسة المرتبطة بترويج دبي لتقنية الهيدروجين المحلية في استعدادها للإعلان عن هدف للاستخدام المحلي للهيدروجين. ولا ريب أن وجود خطة محلية لتقنية الهيدروجين يرسل إشارة واضحة إلى الشركات والمستثمرين، وعدم وجودها يرسل رسالة معاكسة بالقوة ذاتها.

قد تمتدّ الحوافز إلى أبعد من المنتجين والمستثمرين لتشمل المستهلكين، سواء كانوا أسرًا أو شركات. فمثلًا، قدمت العديد من الحكومات الغربية حسومات وحوافز ضريبية لتركيب الألواح الشمسية على الأسطح. ولكي تكون الحوافز فعّالة، يجب ضبطها بعناية لتتناغم مع ظروف السوق وذلك لاستقطاب عدد كاف من المستهلكين لتشكيل قاعدة للقطاع. قد تتكبّد برامج الحوافز التي تدار بطريقة اعتباطية تكاليف كبيرة من دون تقديم فوائد دائمة.

استثمار القطاع العام ومشترياتُه

قد تعمد الحكومات أيضًا إلى رعاية الأسواق المحلّيّة لبعض الصناعات الناشئة مباشرة بتوجيه جزء من مشتريات القطاع العام واستثماراته نحو الصناعة المستهدفة. يمثل القطاع العام مستهلكًا رئيسًا لمجموعة واسعة من السلع والخدمات ولاعبًا مهمًا في أي اقتصاد، فمعظم إنفاقه قابل للتوقع، بمتطلبات وأنماط تتكرّر عامًا بعد عام. وإنفاقه مؤكد أيا تكن الظروف، لذا فإنّ تفضيل منتجات الصناعات المستهدفة على نظيراتها التقليدية يمثّل طريقة فعّالة لتوليد طلب دائم على منتجات قطاع ناشئ، حتّى إن تكبّدت المشتريات الأوّلية زيادات سعرية، نظرًا لاستمرار الصناعة في التوسّع والابتكار.

Michael Habana Coronel / Shutterstock.com

التنسيق بين المستهلك والمنتج

بإمكان دُبي أيضًا دعم إنتاج الهيدروجين المحلّيّين من خلال التنسيق مع العملاء، من الشركات التجارية واسعة النطاق والشركات الصغيرة والأُسر، فضلاً عن مؤسّسات البحث المحلّيّة والدوليّة. يحدث الابتكار والتغيُّر التقني بسرعة في الصناعات الناشئة، مع حاجة المنتجين إلى جمع المتطلّبات من المستهلكين، وتثقيف القطاع الخاصّ بشأن تبنّي التقنيات الجديدة، والاطّلاع دائم على الطفرات في أبحاث الهيدروجين. غالبًا ما تفتقر الشركات الناشئة إلى الموارد اللازمة لإجراء هذه الأنشطة بفعالية بشكل فردي وتلك التي تتعامل مع النتائج كمعرفة مملوكة تستفيد منها ضدّ المنافسين في القطاع. بتنسيق دبي لهذه الوظائف ضمن اتّحاد صناعي أو مجموعة تضمُّ القطاعين العام والخاص، بإمكانها توزيع الموارد بفعالية أكبر. وبهذا تلعب المجموعة الصناعيّة دور وسيلة للأعضاء لتبادل معلومات السوق، وكذلك أداة لحكومة دبي لتأمين تراخيص الملكيّة الفكريّة على المستوى الوطني (لا على مستوى شركة). ويمكنها أن تتيح الوصول الشامل إلى براءات الاختراع والأبحاث الجارية في الإمارة. تستفيد الشركات المشاركة من تبنٍّ أسرع لتقنية الهيدروجين محليًا، ومن انخفاض تكاليف البحث والتطوير على مستوى الشركة، ومن تحسين قدرتها التنافسية على المستوى الدولي.

تلعب المجموعة الصناعيّة دور وسيلة للأعضاء لتبادل معلومات السوق، وكذلك أداة لحكومة دبي لتأمين تراخيص الملكيّة الفكريّة على المستوى الوطني. ويمكنها أن تتيح الوصول الشامل إلى براءات الاختراع والأبحاث الجارية في الإمارة.

السياسة التنظيمية والمعايير

من منظور تنظيمي، لدى دُبي أولويّتين: 1) إنشاء بيئة حاضنة لإنتاج الهيدروجين المحلّي و2) ضمان مطابقة المعايير المحلّيّة إلى أقصى حدّ ممكن المعايير المعتمدة في أسواق التصدير الرائدة. تشتهر دبي فعلًا ببيئتها التنظيمية المبسّطة للأعمال عمومًا، إذ تحتلّ الإمارات المرتبة 16 من بين 190 اقتصادًا عالميًا في مؤشر سهولة مزاولة الأعمال التابع للبنك الدولي، والذي يحدّد نقاط الضعف الرئيسة في بيئة الأعمال مثل التجارة عبر الحدود (المرتبة 92)، وحلّ الإعسار (المرتبة 80)، والحصول على الائتمان (المرتبة 48) ودفع الضرائب (المرتبة 30).

وبإمكان دُبي أن تعالج العوائق الماليّة التي تحول دون احتضان الأعمال بواسطة استراتيجيّة هيدروجين محلية، وأن تقلّل من تأثير التجارة عبر الحدود من خلال استراتيجية تصدير (بشكل مستقلّ عن أبوظبي أو بالتنسيق معها). وقد يساعد استخدام المناطق الاقتصاديّة الحرّة أيضًا بعض الشركات المرتبطة بقطاع الهيدروجين المحلّي على العمل بكفاءة أكبر.

ستؤدي السياسة العامّة الموجّهة نحو مواءمة المعايير المحلّيّة مع معايير أسواق التصدير الرئيسة أيضًا إلى تحفيز شركات إنتاج الهيدروجين وتجارته في دُبي لتطوير عملياتها الداخليّة لإنشاء منتجات طاقة مناسبة للبيع المباشر في الخارج. وكما فصَّلنا أعلاه، ما زالت لوائح الجودة والسلامة للطاقة الهيدروجينيّة في مهدها – إذ أن لدى بعض البلدان معايير نقاء لخليّة الوقود والهيدروجين الصناعيّ مع شروط خاصّة بمستويات الشوائب القصوى، لكنّها تختلف كثيرًا من بلد إلى آخر. وتمثّل معايير السلامة مشكلة رئيسة لم تُحل نظرًا لقابليّة الهيدروجين للاشتعال. لقد أدّى انفجار في منشأة هيدروجين في كاليفورنيا عام 2019 إلى الإغلاق المؤقّت لنظام توزيع الهيدروجين في منطقة خليج سان فرانسيسكو مع نقص توفر وقود الهيدروجين لأشهر، ممّا أثّر كثيرًا على اعتماد تقنية الهيدروجين في الولاية. إنّ وضع معايير سلامة فعّالة لاستخدام المستهلك للهيدروجين وضمان الاعتراف الدولي بها سيمثّلان ميزة رئيسة لقطاع الهيدروجين في دبي.

نقدم أدناه ثلاثة مناهج محتملة لسوق الهيدروجين المحلي في دولة الإمارات، ونجمع السياسات معًا لتحسين فعاليتها. تختلف التكاليف والمخاطر والتأثير الاقتصادي الكلّي كثيرًا بين الأساليب الثلاثة ولا تتوافق جميعًا مع كلّ استراتيجية تصدير لقطاع الهيدروجين واردة في هذا التقرير. علاوة على ذلك، لا ينفصل نجاح الهيدروجين في دولة الإمارات عن تطور اقتصاد الهيدروجين العالمي – إنَّ الافتراضات المتشائمة المتعلقة بالطلب العالمي أو البيئة التنظيمية العالمية، تمنع الرهان على المقاربات الأكثر جرأة لكلّ من قطاعي الهيدروجين المحلي والتصدير في دولة الإمارات. وينبغي أيضًا الحرص على مواءمة استراتيجيات تطوير قطاع الهيدروجين مع الأهداف الاستراتيجية الأخرى لدولة الإمارات. بالإضافة إلى التأثير الاقتصادي والبيئي لقطاع هيدروجين قوي، فإنّ ظهور هذه الصناعة الجديدة في دولة الإمارات سيؤثّر على أنماط التوظيف في اقتصادها، والطلب على العمالة والخدمات عالية المهارات فيها، وكذلك على شبكتها من العلاقات الدولية.

لا ينفصل نجاح الهيدروجين في دولة الإمارات عن تطور اقتصاد الهيدروجين العالمي – إنَّ الافتراضات المتشائمة المتعلقة بالطلب العالمي أو البيئة التنظيمية العالمية، تمنع الرهان على المقاربات الأكثر جرأة لكلّ من قطاعي الهيدروجين المحلي والتصدير في دولة الإمارات.

سيناريو الحديقة المسوَّرة

قد يتمثّل النهج الأقصى للقطاع المحلّي في تطوير سوق محلّية كبيرة وآمنة، أي «حديقة مسوَّرة» للهيدروجين المنتَج محلّيّاً من خلال استثمارات القطاع العامّ أو حوافز لاعتماد القطاع الخاصّ للهيدروجين. ستكون السوق المحلّيّة بمثابة المصدَر الرئيس للطلب الموثوق والآمن للإنتاج الهيدروجين، ممّا يقلّل من المخاطر التي تتعرّض لها الشركات المستثمرة. بالإضافة إلى الميزة الماليّة للسوق المحلّي المحتكر، سيستفيد إنتاج الهيدروجين والصناعات المرتبطة به (التوزيع والبنية التحتيّة وما شابه ذلك) من وجود بيئة يمكن فيها تجربة نماذج تشغيليّة مختلفة بالإضافة إلى الممارسات والتقنيات والعمليّات الجديدة مع آماد زمنية أطول وضغوط إيرادات أقلّ مما قد تواجهه في حالة تعرُّضها بشكل أساسيّ لأسواق دوليّة تنافسيّة. يوفّر هذا فرصة وحافزًا للابتكار، على أن تُدخَل التطويرات الناجحة لاحقًا إلى أسواق التصدير لتعزيز الكفاءة والقدرة التنافسيّة.

إنَّ سوقاً حرة عاديَّة قد تؤدّي إلى منافسة ضارة في دولة الإمارات وإلى تشتيت مفرط للحوافز. بدلاً من ذلك، يجب أن يعمل منتِجان أو ثلاثة عن كثب مع الحكومة لتنسيق نموّ القطاع ووضع خطط لتحقيق أهداف الإنتاج والاعتماد، مع استمرار خضوعهم لانضباط الأسعار من خلال بعض المنافسة في الأسواق العالمية. يجدر بدولة الإمارات إنشاء جمعيّات تجارية لربط قطاع الهيدروجين بمستهلكي الطاقة لتسهيل أبحاث السوق والتواصل مع العملاء.

سيكون لسياسة صناعية جريئة للطلب المحلي على الهيدروجين في دولة الإمارات التأثير الأكبر في تسريع نموّ قطاع الهيدروجين واحتضان صناعة التصدير. وسيشمل ذلك التزامًا أكبر بالموارد، من النواحي المالية ونواحي تخطيط تنمية السوق المحلّيّة وإدارتها أيضًا.

سيناريو توازن التكاليف والفوائد

يتيح اعتماد نهج متوازن إلى المحافظة على بعض عناصر الحديقة المسوَّرة على نطاق أصغر، ما يخفض مستوى التنسيق دون التخلّي عنه تمامًا. يتيح هذا النهج تفادي استخدام استراتيجيّات اقتصاديّة صارمة في أماكن جديدة على التخطيط الاستراتيجي الذي تنسّقه الحكومة والتي غالبًا ما تكون مكلفة وصعبة التنفيذ. بالإضافة إلى التكاليف المباشرة المتكبَّدة من خلال استثمارات البنية التحتيّة والمشتريات، فإنّ التمويل التفضيليّ يتكبَّد تكلفة الفرصة الضائعة، وينتج عن التنسيق بين الصناعة والحكومة احتكاكًا، إذ تعطّل ترتيبات العمل الجديدة الأنماط القديمة وتضطر الحكومة لتحسين قدراتها كي تؤدي دورها. يترافق هذا مع زيادة خطر تأخير تنفيذ البرامج المقررة، وانخفاض الحماية للصناعة، وتقلص تأثير الحكومة على التخطيط المؤسسي.

وعلى الرغم من ذلك، فإنّ سوقًا محلّيّة أصغر توفّر بعض الحماية من الضغط التنافسي الدولي وتسمح بالابتكار والتجريب، مع حاجة أكبر إلى مبادرة القطاع الخاص. إنّ تنظيمًا أقلّ تشدُّدًا للقطاع يخفِّض تكلفة الإدارة الاقتصاديّة – وبالإمكان الاستفادة من قلق التنافسيّة المتشارَك، لفرض اتّحاد عام لكبار المنتجين في دولة الإمارات مع بعض الحوافز لمشاركة الابتكار. وينبغي الاستمرار في رعاية الاتّحادات التجاريّة وتشجيعها لتسهيل تبنّي تقنية الهيدروجين، وأبحاث السوق، والتواصل مع العملاء.

يقدّم النهج المتوازن فوائد للصناعة ويتيح النتائج المثلى، لكنّ نجاحه الفعلي يعتمد على قيادة الشركة أكثر من اعتماده على التوجيه الحكومي. ويتطلّب تخصيص موارد أقلّ ولكن مع زيادة خطر التخلُّف عن المنافسين العالميين.

قطاع مقتصر على التصدير

إنّ أحد بدائل التدخُّل الاستراتيجي النشط في سوق وقود الهيدروجين المحلّيّ هو نهج «عدم التدخّل»، و«التصدير فقط»، ويبقى ممكنًا إصدار أهداف خاصة بتبنّي الهيدروجين، ولكنّها تصاغ كمبادئ توجيهيّة ليتبناها القطاع الخاص طوعيًا. بدلاً من العمل النشط على تشبيك المنتجين مع المستهلكين المحتملين لوقود الهيدروجين، قد تختار دولة الإمارات السماح لسوق الطاقة المحلّيّ بتطوير توازنه الخاصّ، معتمدة على دافع الربح لحثّ المنتجين على الترويج الهيدروجين.

وبالمثل، قد يشجّع منتجو الهيدروجين على التنظيم الذاتيّ، وعلى تحديد مدى تجميع الموارد والمعرفة داخل القطاع. سيكون تبنّي الهيدروجين في القطاع العام من خلال الاستثمار في البنية التحتية وشراء المعدّات مرتبطاً كليًا بالأسعار، ومتكلًا على خفض تكلفة المنتج لتقديم أداء اقتصاديّ متفوّق على البدائل التقليدية. ستقتصر الحوافز على الشهادات دون فوائد، وهو إجراء رمزي إلى حدّ كبير ما لم يكن من الممكن ربطه بفوائد من البرامج الدولية. سيعتمد المنتجون إلى حدّ كبير على مزايا التكلفة في السوق العالميّة لتحقيق الأرباح، مع زيادة ضغط الربح خلال الفترة المبكرة من الصناعة المعرضة للخطر. يبقى من الممكن تقديم الدعم من خلال آليات استراتيجية التصدير، ولكن بالنسبة للطلب المحلي، تلتزم دولة الإمارات بنهج «عدم التدخّل».

يتطلّب نهج «التصدير فقط»، قليلًا من الجهود والموارد الإضافية من خارج استراتيجية التنمية المعتمدة. وهذا يقلل التكاليف لكنه يترك الصناعة الناشئة من دون حماية، ويترك الحكومة بلا قدرة على تحفيز أو فرض أهدافها المتعلّقة بالهيدروجين.

يتيح الامتناع عن وضع سياسة صناعيّة لقطاع الهيدروجين المحلّي للحكومة خفض نفقاتها ويمكّن القطاع من التطوُّر بناءً على ظروف السوق، مع احتمال عدم التطوّر على الإطلاق في حال تحرّك المنتجون المنافسون بقوّة للاستحواذ على حصة السوق وظلت صناعة إنتاج الهيدروجين في دولة الإمارات غير ناضجة وبدت غير قادرة على تعويض دخولها المتأخر. وعلى الرغم من ذلك فإن قطاع التصدير سيكون مربحًا بدءًا من مراحله الأولى ممّا يتيح تفادي إنشاء صناعة تعتمد على الدعم الطويل الأجل.

استراتيجيات تطوير قطاع تصدير الهيدروجين

تتضمّن الطبقة السفليَّة من استراتيجيات قطاع تصدير الهيدروجين في دولة الإمارات مقاييس مُنمذجة كميّاً، ويشمل ذلك تحديد حجم الإنتاج المستهدف، واختيار أنواع الهيدروجين المنتج، وتحديد مستويات الاستثمار لتلبية أهداف الإنتاج، وتوقُّع الأسواق النهائيّة للهيدروجين المنتج في الدولة. وبناءً على هذه المقاييس، أعدت نماذج توقُّع مختلفة للتأثير الاقتصادي والبيئي والاجتماعي على دولة الإمارات. وتتضمّن الاستراتيجيات أيضًا تعديلات السياسة الخارجية اللازمة لنجاحها.

أكبر الفوائد المحتملة من اقتصاد الهيدروجين العالمي لدولة الإمارات، تأتي من إمكانيات التصدير إلى كبريات الأسواق الخارجية. ولأن التقنية لمّا تنضج بعد، وطفرة تقنية الهيدروجين للاستخدامات الرئيسة – الحرارة/الطاقة الصناعية وتوليد الكهرباء والنقل - ما زالت منتظرة، فإنَّ شكوكًا كبيرة تحيط باتّجاه اقتصاد الطاقة العالمي، والسرعة التي تتقدّم بها تقنية الهيدروجين، ونموّ سوقه حتى عام 2050، ومدى قدرته على أن يصبح بديلًا لمصادر الطاقة التقليدية. إن العوامل التي تحكم تطوير الهيدروجين العالمي واعتماده تتجاوز إلى حد كبير قدرة دولة الإمارات على التحكُّم (على الرغم من أنّها قد تكون قادرة على التأثير عليها من خلال التعاون الدولي)، لكنّ اقتصاد الهيدروجين العالمي سيكون بمثابة البيئة التي يجب أن يعمل فيها قطاع الهيدروجين في دولة الإمارات. ولقد ناقشت هذه الدراسة ثلاثة سيناريوهات محتملة لاقتصاد الهيدروجين الدولي في الأقسام السابقة.

تتصوّر الأقسام أدناه الآفاق المستقبلية المحتملة لقطاع تصدير الهيدروجين في دولة الإمارات واستراتيجيات تحقيق تلك التصورات. تعكس مجموعة الاستراتيجيات جزئياً السيناريوهات التي وصفناها بما يخص اقتصاد الهيدروجين العالمي. فمثلًا، تلائم الاستراتيجية الدنيا الموضحة أدناه سوقًا دوليًا منخفض الطلب، ممّا يقلل التعرُّض الاقتصادي لاقتصاد الهيدروجين، ويتواءم مع سياسة محلّيّة لا تولي إنتاج الهيدروجين سوى أولويَّة متدنية. أمّا استراتيجيات قطاع التصدير الأكثر طموحًا فنجاحها مشروط بحدٍّ أدنى من سيناريو الهيدروجين العالمي الناضج وهو يفضي إلى ارتفاع الاحتمالات الإيجابية فيما يخصُّ المرونة الاقتصاديّة، وتطوير التقنية، وإعادة التوازن البيئي.

تصف الدراسة في القسم التالي أربع استراتيجيات مختلفة لتطوير تصدير الهيدروجين في دُبي وتتوقع مفاعيلها:

استراتيجية المنتج والمركز

يخلق الاقتصاد العالمي بتسريعه إزالة الكربون واعتماده المتزايد على الهيدروجين فرصة لاعتماد استراتيجيّة طموحة لترويج تصدير الهيدروجين بهدف الفوز بقيادة القطاع. وهذا لا يعني الاستحواذ على حصّة وافرة من السوق العالمية وحسب، بل تطوير الصناعات المرافقة أيضًا والتحوُّل إلى مركز للبحث والابتكار. وفي حين أنّ استراتيجية المنتِج الصارمة ستجعل دولة الإمارات في وضع يمكنها من الحصول على حصّة من عائدات تصدير الهيدروجين العالمية، فإن استراتيجية المنتج والمركز تهدف إلى الوصول بحصّة دولة الإمارات من السوق العالمية إلى الحد الأقصى – ويشمل ذلك الصادرات الكبيرة على المدى القريب إلى آسيا - وتطوير البلاد كدولة ابتكار للقطاع.

تتطلب هذه الاستراتيجية نهجًا حازمًا لزيادة الإنتاج إلى الحدّ الأقصى على المدى القريب من أجل منافسة الدول الرائدة الأخرى وترسيخ ميزة سوقيَّة دائمة. لا تحصل دولة الإمارات على أرباح متزايدة من عائدات تصدير الهيدروجين فحسب، بل من القدرة على ربط قطاع الهيدروجين ببيئتها التقنية أيضًا، وبشكل حيوي، بقطاع الخدمات المالية، ما يؤدي إلى إنشاء تبادل للأصول والمشتقات المالية المرتبطة بالهيدروجين. وبهذا يتعزز كثيرًا دور دولة الإمارات في استقطاب المواهب وابتكار الوظائف ذات المهارات العالية. لكن استراتيجية كهذه ستتطلّب من الاستثمارات ما يتخطى بأشواط استراتيجيّة المنتِج فقط، مع ما يترتّب على ذلك من تعرُّض أكبر للتقلُّبات أو لاحتمال أن يأتي الاعتماد العالميُّ لتقنية الهيدروجين دون المتوقَّع.

استراتيجيَّة المنتِج

تتمتَّع دولة الإمارات بمزايا كبيرة في إنتاج الهيدروجين – كتوفر الطاقة الشمسيّة وطاقة الرياح، وخزّانات الغاز الطبيعي المناسبة للهيدروجين الأزرق، والبنية التحتيَّة القائمة للطاقة، والشراكات التجارية. وبإمكان دولة للإمارات أن تستغلّ هذه المزايا في سياق سوق هيدروجين عالميّة آخذة بالنضوج، ومن خلال استراتيجيّة المنتِج لتصبح دولة مصدّرة منافسة للهيدروجين، وتطوّر قطاعاً جديداً عالي التقنية والمهارات في اقتصادها وتسهم في قيادة التحوّل نحو موارد الطاقة المستدامة. تسخّر هذه الاستراتيجية موارد دولة الإمارات وعلاقاتها وموقعها لتطوير قطاع هيدروجين تنافسي دوليًا يضاهي مستوى جيرانها من دول مجلس التعاون الخليجي.

وفي ظلّ هذه الاستراتيجيّة، وبمرور الوقت، تتباعد الاستثمارات لتحسين السعة والتكاليف مقابل عائدات التصدير، مع التركيز على الأسواق التي تصل إليها بأقل تكلفة، ولا سيما الاتّحاد الأوروبي والدول العربية والإقليمية الفقيرة بالطاقة. وهي تحسّن مزيج أنواع الهيدروجين من أجل أداء اقتصاديّ أفضل (من خلال عائدات التصدير وتعويضات الكربون)، مع استخدام الهيدروجين الأزرق على المدى القصير إلى المتوسط، والتحوّل التدريجي إلى الهيدروجين الأخضر على المدى الطويل. في حين تتسم هذه الاستراتيجية بمخاطر أكبر من استراتيجية النهج الأدنى، فإن التركيز على الجدوى الاقتصادية سيتيح لدولة الإمارات بالاستحواذ على حصة أكبر من أسواق الهيدروجين العالمية، وإنشاء قطاع عالي التقنية لاستكمال تنوع خدماتها واقتصادها القائم على التجارة.

استراتيجية التنسيق الإقليمي

إنَّ مزايا دولة الإمارات في إنتاج الهيدروجين مشتركة مع جيرانها، إذ تمثّل دول مجلس التعاون الخليجي إحدى أكثر المناطق ملاءمة للإنتاج الاقتصادي لكلّ من الهيدروجين الأزرق والأخضر. وتعمل اقتصادات إقليميّة رئيسة عدّة - مثل عُمان والمملكة العربيّة السعوديّة - على تطوير قطاعات الهيدروجين الخاصَّة بها، وهي متقدمة في ذلك على دولة الإمارات. قطر المصدِّر الرئيس للغاز الطبيعي، ومنها تأتي أغلب واردات الغاز لدولة الإمارات. وفي أي سيناريو أقلّ من سيناريو التبنّي المرتفع/الطلب المرتفع، ستشكل الدول المجاورة لدولة الإمارات من دول مجلس التعاون الخليجي مصادر منافسة هائلة على مستوى سوق التصدير العالمي، وحتى في الظروف المثلى، ستكون منافسة على الريادة الإقليمية في التمويل والخدمات المتعلقة بالهيدروجين والابتكار.

وعلى الرغم من ذلك إن كانت دولة الإمارات مستعدة للتعاون في تطوير قطاع الهيدروجين من خلال دول مجلس التعاون الخليجي، فالإمكانات كبيرة لإنشاء تكتّل هيدروجين على مستوى المنطقة بدلاً من الانخراط في منافسة مدمرة بين دول مجلس التعاون الخليجي. بإمكان تكتّل المنتجين هذا أن يتأقلم مع تطور الإمارات داخله كمركز حليف للصناعات والبحوث. بالنسبة لدولة الإمارات وحدها، فإن تطوير قدرة كافية لتحريك الأسواق العالمية من خلال استراتيجية المنتج دون وجود عنصر المركز سيتطلب استثمارات أولية كبيرة بما يكفي للمخاطرة بمستقبل الدولة الاقتصادي على المدى الطويل. من خلال التنظيم الجماعي للإنتاج، بإمكان دول مجلس التعاون الخليجي مجتمعة تحقيق مركز مهيمن للهيدروجين، مشابه (وإن لم يكن بالقوة ذاتها) لمكانتها في أسواق النفط العالمية. ويمكن الاستثمار في مشاريع الهيدروجين بشكل مشترك من خلال مؤسسات مثل مؤسسة الخليج للاستثمار، التي تملكها بالتساوي حكومات دول مجلس التعاون الخليجي الست. إن توزيع الاستثمار على اقتصادات متعددة من شأنه أن يقلل من المخاطر على الدول الأعضاء، بينما سيتيح تنسيق تطوير البنية التحتية والمرافق بالاستثمار والتشغيل بكفاءة أعلى مع تقليل المخاطر والتكرار. صحيح أن دولة الإمارات قد تضطر للتنازل عن بعض استقلال سياستها الهيدروجينية من أجل التنسيق بين دول مجلس التعاون الخليجي، إلّا أنَّ بنيتها التحتية، وأسواقها المالية المتطورة، وميزتها كنقطة جذب للمواهب الإقليمية ستتيح لها الاستفادة من بعض مزايا تولي دور المركز لقطاع الهيدروجين في الخليج العربي.

الحل الأمثل

صحيح أن تطوير تقنية الهيدروجين كمصدر بديل للوقود قد اجتذب اهتمامًا كبيرًا وأنَّ اقتصادات كبرى طورت خططًا لتعزيز طاقة الهيدروجين، إلا أنَّ دراسات أجريت على هذا الموضوع عرضت مجموعة من النتائج المحتملة، ومنها سيناريوهات يفشل فيها الهيدروجين في التطور كما هو متوقَّع، فتؤخر الخطط الوطنيَّة أو يتخلّى عنها. إنَّ الدخول إلى القطاع سيرتِّب تكلفة كبيرة وستتعرَّض الاستثمارات لمخاطر الأسواق العالمية. حتّى في أفضل السيناريوهات، سيستغرق الأمر سنوات أو عقودًا لتحقيق منافع اقتصاديّة.
تسعى استراتيجيّة الحل الأمثل الدنيا إلى تقليل تعرُّض دولة الإمارات للمخاطر السلبيّة من خلال الحدّ من الاستثمار في قطاع الهيدروجين، مع اغتنام الفرص للاستفادة من نجاحه من خلال خدمات الطاقة والبنية التحتيّة التي يسهل تطويرها أو تكييفها بسرعة وبتكلفة زهيدة.

إن بقي الهيدروجين وقودًا متخصصًا/محدوداً، سيبقى بإمكان دولة الإمارات أن تتقدّم في تلك الخدمات ومن خلال صفقات البنية التحتيّة، وحينما تتكبَّد الاقتصادات التي تراهن بشدّة على الهيدروجين خسائر كبيرة. لكن إن عملت على الحد من المخاطر فهي تحدُّ أيضًا من حصّتها في أيّ مكاسب من صادرات الهيدروجين، ماّ يفقدها فرصة لتعميق اقتصادها وتنويعه بينما تستفيد الدول المجاورة والمنافسة من تحوّل تقني من النوع الذي يحدث مرّة واحدة في القرن.

.10

الخاتـــمة والتوصـــيات

سيعتمد حجم نمو اقتصاد الهيدروجين المستقبلي في دولة الإمارات إلى حدٍّ كبير على عوامل خارجية لا تخضع لسيطرتها. إذ إنَّ المستويات المختلفة لتبني الهيدروجين والطلب عليه عالميًا ستشكل سياقات مختلفة للطلب المحلي ولمسارات قطاع التصدير التي تتبعها دبي ودولة الإمارات العربية المتحدة.

وعلى الرغم من ذلك تشير العديد من المؤشّرات إلى أن العوامل الخارجية ستؤدي إلى نمو قطاع الهيدروجين. نظرًا لانخفاض تكاليف إنتاج الهيدروجين الأخضر والأزرق، لا بدَّ أن يتوسع اقتصاد الهيدروجين إلى ما وراء أسواقه الرئيسة الحالية المقتصرة على إنتاج الأمونيا وإنتاج الميثانول وتكرير النفط. لا ريب أنَّ تجاوز التحديات المذكورة في هذا التقرير يتطلَّب جهودًا كبيرة، لكن الهيدروجين يبقى واعداً كحل لإزالة الكربون من العديد من الصناعات التي يصعب تقليصها، مثل إنتاج الحديد والصلب والإسمنت، فضلاً عن صناعات الطيران والبحرية. وبالإضافة إلى ذلك قد يلعب الهيدروجين أيضًا دورًا مهمًا في تخزين الطاقة، بسبب قابليّته للنقل التي تفوق قابلية البطاريات.

وضعت العديد من الحكومات أهدافًا لاستخدام الهيدروجين، وأنفقت أموالًا طائلة على البحث والتطوير والبرامج التجريبيّة في هذا المجال. تعد هذه العوامل مجتمعة بأن ينمو الهيدروجين بسرعة كمصدر للطاقة منخفضة الكربون. صحيح أنّ بعض المخاطر ما زالت قائمة، إلا أنَّ الصحيح أيضًا أنّ الفرصة كبيرة أمام دولة الإمارات العربية المتّحدة لتضمن لذاتها ميزة الريادة.

التوصية بالاعتماد الدائم على الهيدروجين يرتبط بتوفر الأراضي والقيود اللوجستية والآثار المالية لدعم الطلب المحلي. ولهذا لا بد من إجراء دراسة تقنية اقتصادية مفصلة قبل التوصية باتباع مسار استراتيجي محدد في هذه المرحلة. أما مستقبلاً وبعد التخلص من هذه القيود، فإن المنفعة الكبرى لدولة الإمارات من اقتصاد الهيدروجين العالمي ستنتج عن إنشاء سوق تصدير قوي للهيدروجين المنتج محلياً، والذي يوصف في هذا التقرير بأنه تطوير استراتيجية قطاع «المنتِج والمركز». تنفيذ هذه الاستراتيجية أمر ممكن في ظل طلب عالمي ومحلي مرتفع أو معتدل على الهيدروجين.

يتوقع أن تضيف استراتيجية «المنتج والمركز» ما يصل إلى 32 مليار درهم سنويًا إلى الناتج المحلي الإجمالي لدبي بحلول عام 2050، وأن توفّر أكثر من 120 ألف فرصة عمل من الآن وحتّى عام 2050، إضافة إلى تعويض الكربون بما يعادل 84 يومًا في السنة من إنتاج النفط الخام في دولة الإمارات، وذلك بحلول عام 2050.

يضيف ما يصل إلى 32 مليار درهم

سنويًا إلى الناتج المحلي الإجمالي لدبي بحلول عام 2050

يوفّر أكثر من 120 ألف فرصة عمل

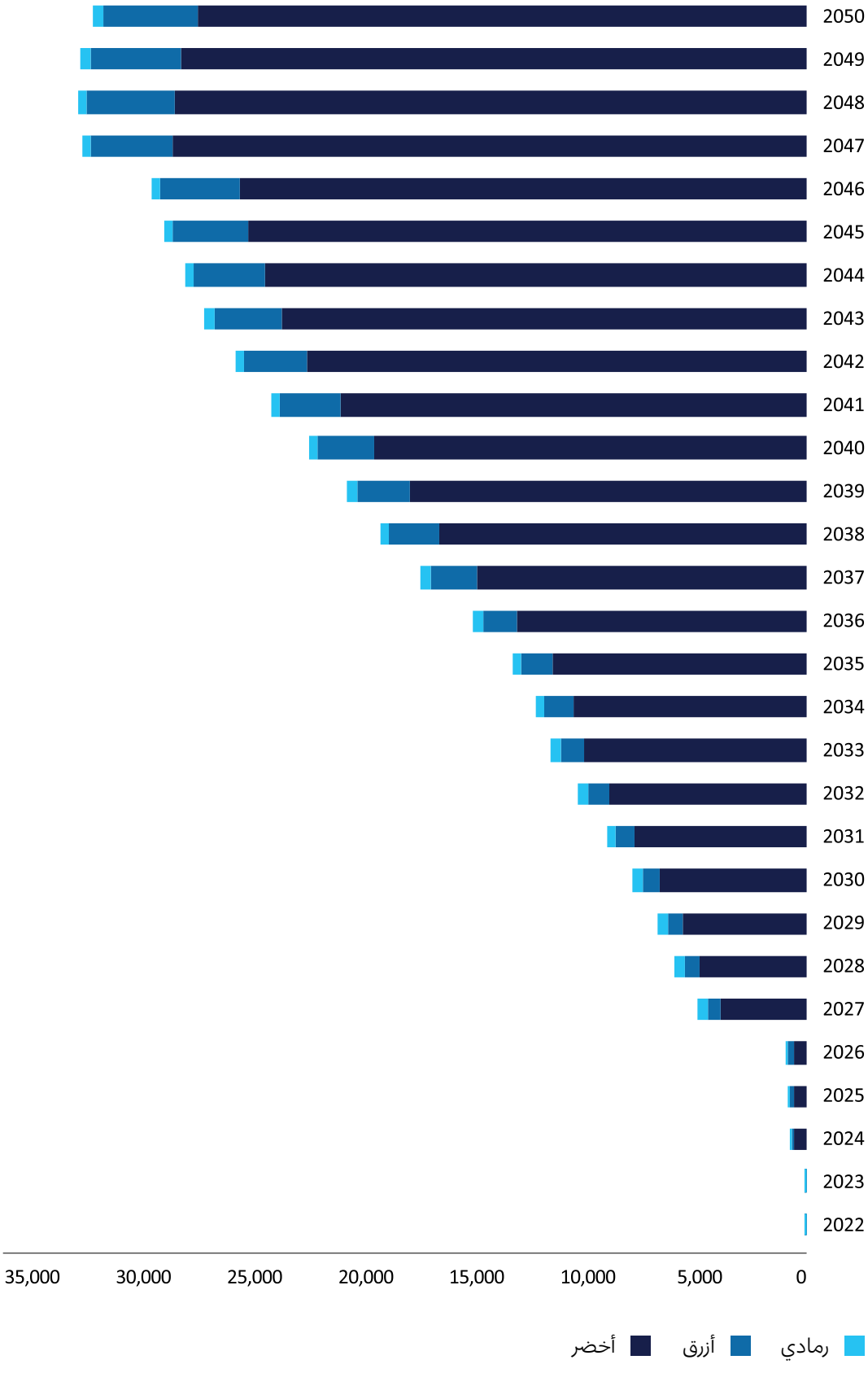
من الآن وحتّى عام 2050

يعوض إصدار ثاني أكسيد الكربون لمدة 84 يومًا

في السنة من إنتاج النفط الخام في دولة الإمارات بحلول عام 2050

الأثر الاقتصادي (على دبي):[54]

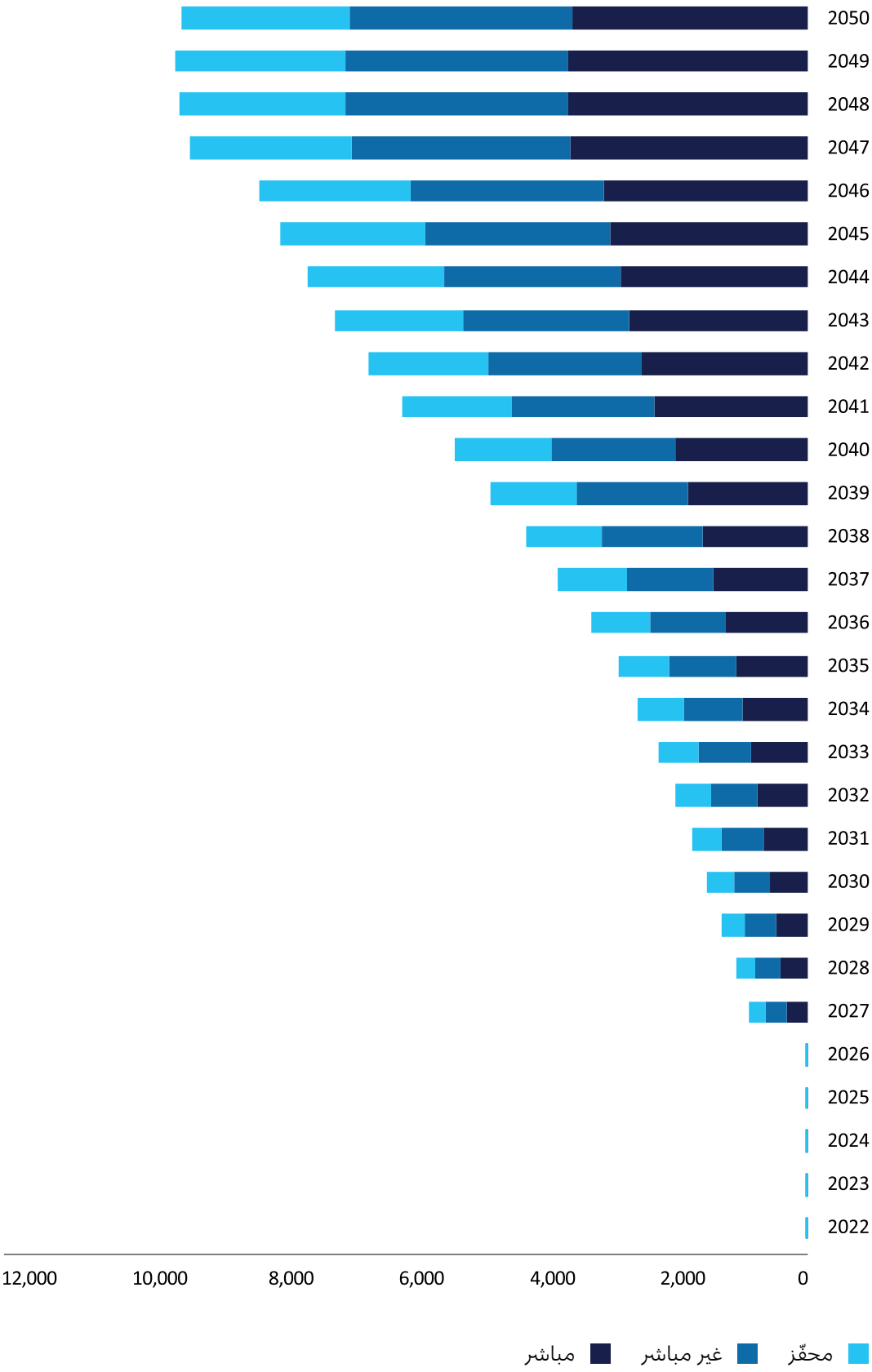
الشكل 15: دبي: نسبة الإضافة إلى الناتج المحلي الإجمالي (مباشر + غير مباشر + محفّز) (مليار درهم)



المصدر: مؤسسة دبي للمستقبل

الأثر الاجتماعي (على دبي):

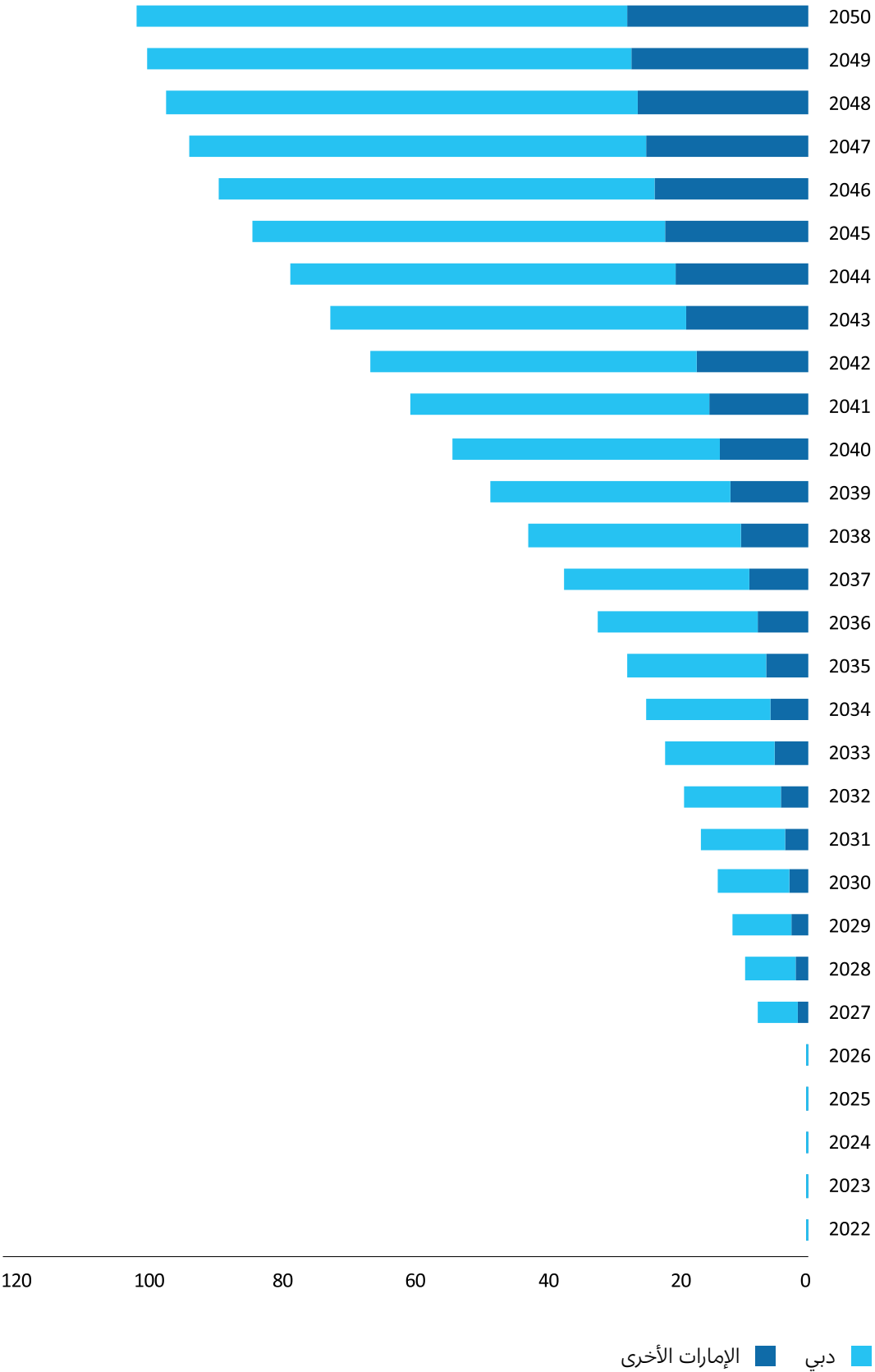
الشكل 16: دبي: فرص الوظائف المضافة كل عام (دوام كامل)



المصدر: مؤسسة دبي للمستقبل

الأثر البيئي (على دولة الإمارات العربية المتحدة):

الشكل 17. تعويض يوم في السنة عن إصدار ثاني أكسيد الكربون في إنتاج النفط لدولة الإمارات



المصدر: مؤسسة دبي للمستقبل

تقدم مؤسسة دبي للمستقبل وشركاؤها والمساهمون الخبراء التوصيات التالية لتطبيق هذا المسار الاستراتيجي على المديين القصير والمتوسط:

1. **صياغة «إثباتات مفهوم» تعرض حالات استخدام مستقبليّة تشمل الوقود الاصطناعي الأخضر القائم على الهيدروجين.** وبالإمكان إنتاج مثل هذا الوقود الاصطناعي بطريقة نظيفة ما يخفض كثيرًا التأثير البيئي لمركبات النقل البري والطائرات والسفن. وتنتج هذه الأنواع من الوقود بطريقة تلائم مع المحركات الحاليّة، مّا يعني أنّ الفوائد البيئية قد تأتي بتكلفة إضافيّة قليلة أو معدومة على المالكين بناء على تكلفة الوقود الاصطناعي.

2. **تطوير نماذج أوّليّة تبيِّن القدرة على التغلُّب على التحدّيات، مثل النماذج الأوّليّة لمكهرلات مياه البحر للتغلُّب على تحدّي ندرة المياه العذبة.** تعمل جامعة ستانفورد وجامعة هيوستن حاليًا على تطوير هذه النماذج الأوّليّة، ولكن الهدف سيكون إثبات جدواها التجاريّة وقابليّتها للتوسّع بالإضافة إلى التحقّق من تقنيتها.

3. **تنفيذ مشروع تجريبي يبيِّن كيفيّة التحقق من نظافة الهيدروجين.** بالنظر إلى أنّ الفائدة الأساسيّة للهيدروجين هي قدرته على التصدّي لتغيّر المناخ، فمن المرجّح أن تصرّ الدول المستورِدة على استيراد الهيدروجين المنتج بشكل نظيف. لا وسيلة للتمييز المادّيّ بين الهيدروجين المنتَج بشكل نظيف والهيدروجين الرمادي، ولكن بالإمكان استخدام تقنية البلوكتشين للتحقُّق من مصدر إنتاج الهيدروجين المستورَد.

4. **تقييم مشروع خط أنابيب مموّل بشكل مشترك يربط دول مجلس التعاون الخليجي بأوروبا وشرق آسيا لتصدير الهيدروجين، ودراسة جدواه.** تمتلك دول مجلس التعاون الخليجي القدرة على إنتاج الهيدروجين الأخضر والأزرق والأصفر على نطاق واسع، مع قدرة كبيرة على تصدير الهيدروجين النظيف إلى البلدان التي تفتقر إلى الموارد المطلوبة لإنتاجه. يمكن لدول مجلس التعاون الخليجي التشارك على تمويل المشروع.

5. **مواءمة الكيانات الحكوميّة الرئيسة في جميع أنحاء دولة الإمارات العربيّة المتّحدة لإدارة وتنسيق إنتاج الهيدروجين الأزرق والأخضر وتوريدهما.** ستضمن المنافسة المنسّقة توزيعًا فعّالاً للموارد على المستوى الوطني.

6. **تقديم حوافز مالية لمنتجي الهيدروجين،** فالحوافز مثل حصص الملكية العامة، والمنح المباشرة، والعقود الطويلة الأجل من الهيئات الحكومية لشراء الهيدروجين تسرع تطوير اقتصاد الهيدروجين المستقبلي في دولة الإمارات.

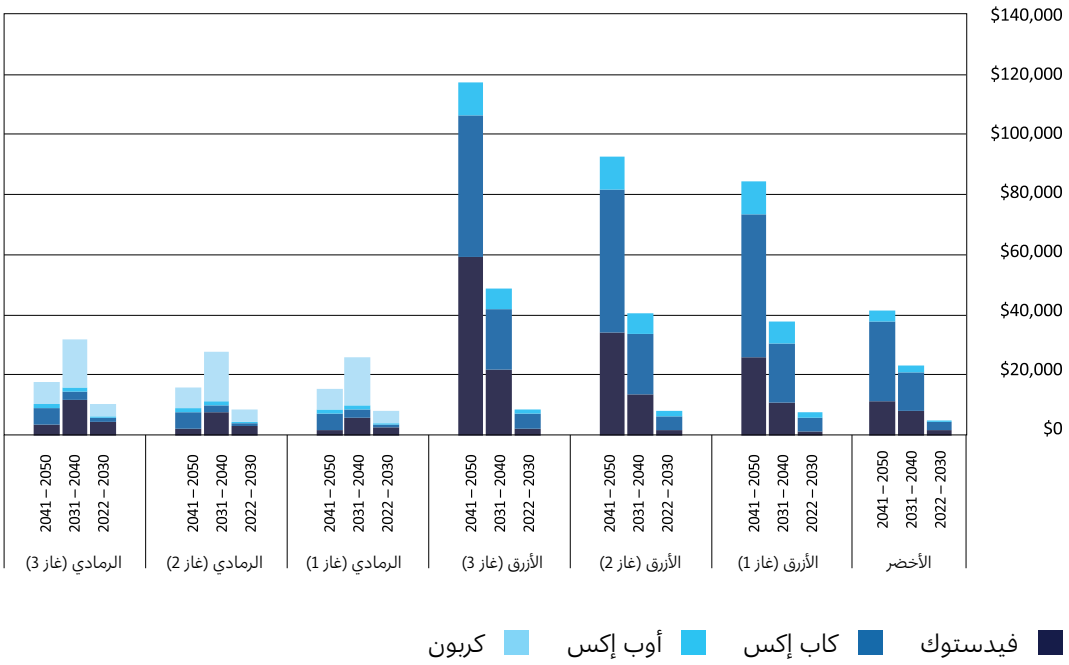
7. **إدخال تدابير هادفة لدعم البحث والتطوير في مجال الهيدروجين في دولة الإمارات.** ويشجّع البحث من خلال تحديد فرص البحث والتطوير الخاصّة بالهيدروجين والإعلان عنها لدى المؤسّسات ذات الصلة والجهات المعنية الأخرى في الدولة، وتسهيل تجميع البحث والتطوير التعاونيّين.

8. **تحويل ما يصل إلى 50% من جميع الأساطيل العامة للمركبات الثقيلة إلى مركبات الهيدروجين (مركبات كهربائية تعمل بخلايا الوقود) بحلول عام 2050.** يمثل القطاع العام مستهلكًا رئيسًا لمجموعة واسعة من السلع والخدمات ولاعبًا مهمًا في أي اقتصاد. وهذا الإنفاق سيحدث على أي حال، لذا فإن تفضيل المنتجات من الصناعات المستهدفة على البدائل التقليدية يمثل طريقة فعالة لخلق طلب دائم للقطاع الناشئ.

9. **إنشاء مئة محطّة للتزويد بوقود الهيدروجين في دولة الإمارات بحلول عام 2050.** بالإضافة إلى كونها حاجة أساسيّة للمركبات الكهربائية العاملة بخلايا وقود الهيدروجين، فإنّ التطوير الواضح للبنية التحتيّة للهيدروجين في الدولة يرسل إشارة قويّة للمستثمرين ورجال الأعمال بأنّ الاستثمار في الهيدروجين سيدرُّ أرباحاً في المستقبل.

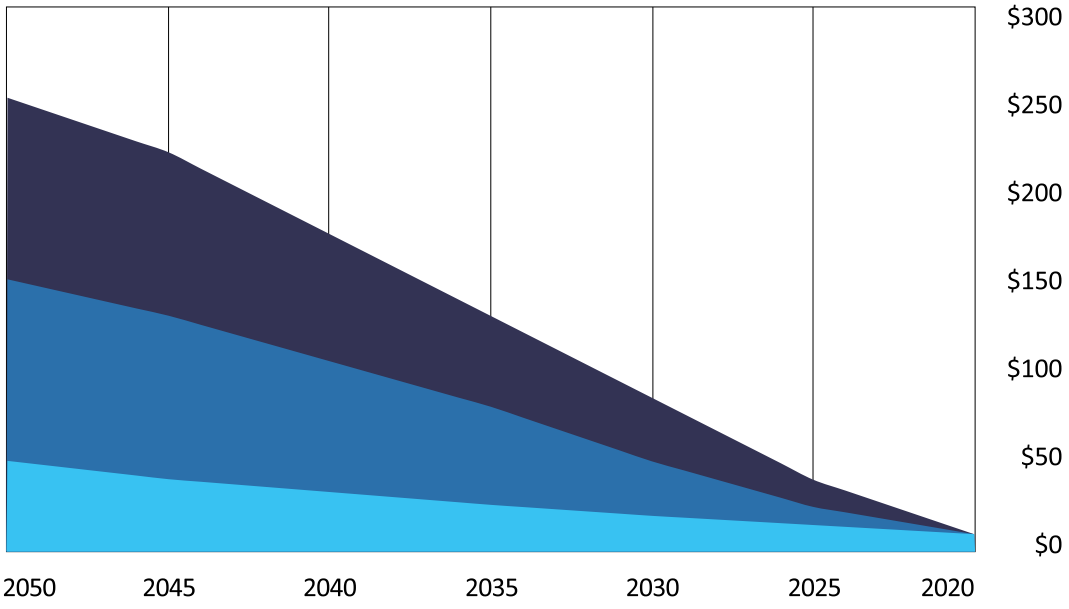
ملحق: افتراضات تحليل الأثر

الشكل 18: تكاليف إنتاج الهيدروجين في دولة الإمارات حسب لونه، 2022-2250: سيناريو السوق 2 (مليار دولار)



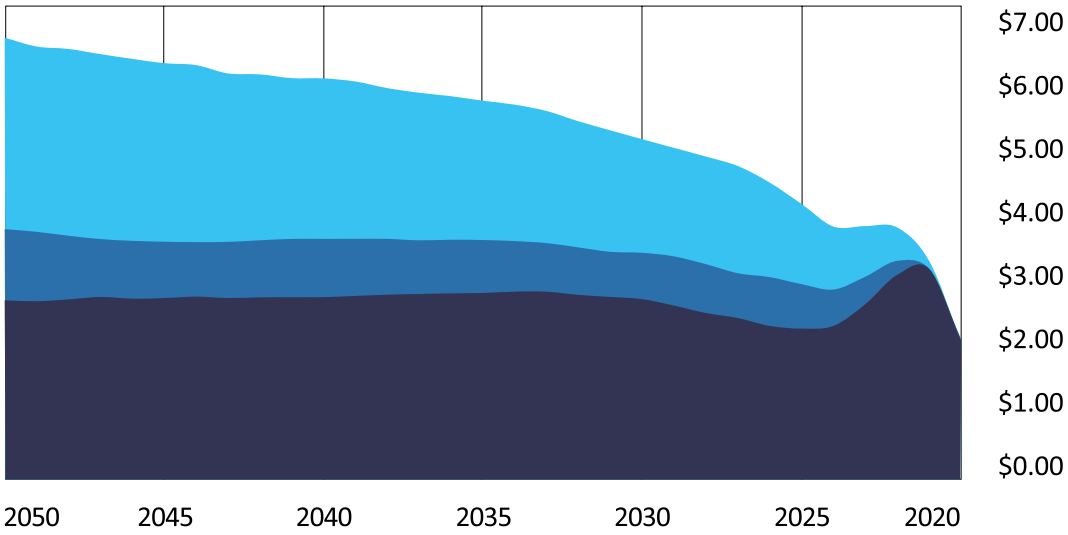
المصدر: مؤسسة دبي للمستقبل

الشكل 19: أسعار الكربون المتوقعة حسب سيناريو السوق (دولار لكل طن ثاني أكسيد الكربون)



المصدر: مؤسسة دبي للمستقبل

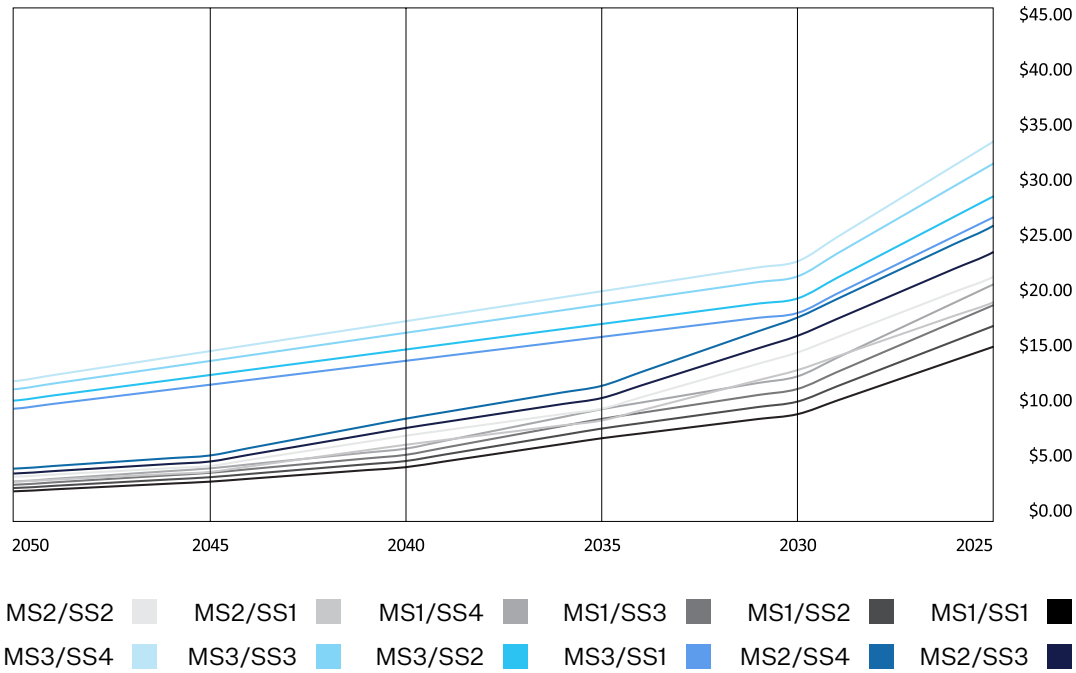
الشكل 20: السعر المتوقع للغاز الطبيعي (هينري هب، دولار/ مليون وحدة حرارية بريطانية، دولار 2020)
تقديرات إدارة معلومات الطاقة الأمريكية



- السيناريو 1: سعر منخفض للغاز الطبيعي (لارتفاع إمدادات النفط والغاز)
- السيناريو 2: الحالة المرجعية
- السيناريو 3: سعر مرتفع للغاز الطبيعي (لانخفاض إمدادات النفط والغاز)

المصدر: مؤسسة دبي للمستقبل

الشكل 21: سعر الكهرباء الخضراء المحلية لإنتاج الهيدروجين محليًا (توقعات 2025-2050)



المصدر: مؤسسة دبي للمستقبل

الشكل 22: أسعار مبيعات الهيدروجين المتوقعة في دولة الإمارات العربية حسب اللون
(دولار/كيلوجرام هيدروجين، تسليم في الإمارات)

سيناريو السوق	اللون	2020	2035	2050
سريع	أخضر	2.87	1.64	0.90
سريع	أزرق	2.32	1.74	1.48
سريع	رمادي	1.32	1.48	1.37
معتدل	أخضر	3.32	1.85	1.16
معتدل	أزرق	2.53	1.99	1.80
معتدل	رمادي	1.43	1.58	1.69
بطيء	أخضر	4.21	2.27	1.48
بطيء	أزرق	2.64	2.32	2.32
بطيء	رمادي	1.53	1.69	2.22

المصدر: مؤسسة دبي للمستقبل

المراجع

1. Bimbo, N. (2019) 'The Unbearable Lightness of Hydrogen'. The Chemical Engineer, 16 August. Online. www.thechemicalengineer.com/features/the-unbearable-lightness-of-hydrogen/

2. Sampson, J. (2020) 'Maritime Hydrogen and Marine Energy Conference: Shipping hydrogen from Brunei to Japan'. Hydrogen View, 15 October. Online. www.h2-view.com/story/maritime-hydrogen-and-marine-energy-conference-shipping-hydrogen-from-brunei-to-japan/

3. IEA (2019) 'The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities'. Technology Report, June. Online. www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen (accessed 4 November 2020)

4. IRENA (2020a) 'Hydrogen from Renewable Power'. International Renewable Energy Agency. Online. https://irena.org/energytransition/Power-Sector-Transformation/Hydrogen-from-Renewable-Power (accessed 25 June 2021)

5. IEA (2020) 'World Energy Outlook 2020'. Flagship Report, October. Online. www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020 (accessed 18 October 2020)

6. Partridge, J. (2020) 'World's biggest fund manager vows to divest from thermal coal'. Guardian, 14 January. Online. www.theguardian.com/business/2020/jan/14/blackrock-says-climate-crisis-will-now-guide-its-investments
Johansmeyer, T. (2021) 'How the Insurance Industry Could Bring Down Fossil Fuels'. Harvard Business Review, 27 May. Online. https://hbr.org/2021/05/how-the-insurance-industry-could-bring-down-fossil-fuels

7. Mathis, W. and Rathi, A. (2020) 'Big Oil's Long Bet on Hydrogen Offers a Climate Lifeline'. Bloomberg, 25 June. Online. www.bloomberg.com/news/articles/2020-06-25/big-oil-s-long-bet-on-hydrogen-offers-a-climate-lifeline?sref=D1PomzGK

8. NASA (n.d.) 'Climate Change: How do we know?' Global Climate Change: Vital Signs of the Planet. Online. https://climate.nasa.gov/evidence/ (accessed 21 October 2020)

9. UNEP (2019) 'Emissions Gap Report 2019: Global progress report on climate action'. UN Environment Programme. Online. www.unep.org/interactive/emissions-gap-report/2019/

10. Saadi, D. (2021) 'ADNOC, Korea's GS Energy to explore opportunities in blue hydrogen, carrier fuel export'. S&P Global Platts, 4 March. Online. www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/oil/030421-adnoc-koreas-gs-energy-to-explore-opportunities-in-blue-hydrogen-carrier-fuel-export

11. Mubadala (2021) 'Mubadala and Siemens Energy sign MoU to accelerate green hydrogen'. 18 January. Online. www.mubadala.com/en/news/mubadala-and-siemens-energy-sign-mou-accelerate-green-hydrogen-capabilities-abu-dhabi

12. Shell (n.d.) 'Shell opens Europe's largest PEM electrolyser'. Online. www.shell.com/energy-and-innovation/new-energies/hydrogen.html (accessed 13 June 2020)

13. Canestrini, C. (2021) 'Between Green and Blue: a debate on turquoise hydrogen'. Florence School of Regulation, 18 March. Online. https://fsr.eui.eu/between-green-and-blue-a-debate-on-turquoise-hydrogen/ (accessed 4 May 2021)

14. Kolodziejczyk, B. (2019) 'Unsettled Issues Concerning the Use of Fuel Cells in Electric Ground Vehicles'. SAE International, 29 October. Online. www.sae.org/publications/technical-papers/content/epr2019002/

15. OEERE (n.d.) 'Hydrogen Production: Microbial biomass conversion'. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Online. www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-microbial-biomass-conversion (accessed 27 June 2020)

16. US Department of Energy (2001) 'Hydrogen Use'. Online. www.energy.gov/sites/default/files/2014/03/f10/fcm02r0.pdf

17. Forsythe, L. (2020) 'Hydrogen Applications in Industry'. WHA International, Inc., 1 October. Online. https://wha-international.com/hydrogen-in-industry/

18. Drägerwerk (2021) 'Cooling with Ammonia: What you should keep in mind'. Drägerwerk AG & Co. Online. www.draeger.com/Library/Content/ammoniak-fa-pdf-8110-en.pdf

19. Ghavam, S., Vahdati, M., Wilson, I.A.G. and Styring, P. (2021) 'Sustainable Ammonia Production Processes'. Frontiers in Energy Research, 9. https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.580808

20. IEA (2019) 'The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities'. Technology Report, June. Online. www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen (accessed 4 November 2020)

21. IRENA (2020b) 'Renewable Power Generation Costs in 2019'. International Renewable Energy Agency, June. Online. www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019

22. IEA (2020) 'World Energy Outlook 2020'. Flagship Report, October. Online. www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020 (accessed 18 October 2020)

23. Crider, J. (2020) 'Abu Dhabi To Have Cheapest Solar Power Ever: 1.35 cents per kilowatt-hour'. CleanTechnica, 6 May. Online. https://cleantechnica.com/2020/05/06/abu-dhabi-will-have-the-cheapest-solar-farm-ever-built/

24. Mathis, W. and Rathi, A. (2020) 'Big Oil's Long Bet on Hydrogen Offers a Climate Lifeline'. Bloomberg, 25 June. Online. www.bloomberg.com/news/articles/2020-06-25/big-oil-s-long-bet-on-hydrogen-offers-a-climate-lifeline?sref=D1PomzGK

25. World Steel Association (2017) 'Steel's Contribution to a Low Carbon Future and Climate Resilient Societies'. Online. www.worldsteel.org/en/dam/jcr:66fed386-fd0b-485e-aa23-b8a5e7533435/Position_paper_climate_2018.pdf

26. Hoffmann, C., Hoey, M. and Zeumer, B. (2021) 'Decarbonization challenge for steel'. McKinsey & Company, 17 January. Online. www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/decarbonization-challenge-for-steel

27. Airbus (2020) 'Hydrogen in Aviation: How close is it?' 8 October. Online. www.airbus.com/newsroom/stories/hydrogen-aviation-understanding-challenges-to-widespread-adoption.html

28. BBC News (2020) 'Airbus looks to the future with hydrogen planes'. 21 September. Online. www.bbc.com/news/business-54242176

29. O'Callaghan, J. (2019) 'Quiet and Green: Why hydrogen planes could be the future of aviation'. Horizon, 16 July. https://horizon-magazine.eu/article/quiet-and-green-why-hydrogen-planes-could-be-future-aviation.html

30. Kumagai, T. (2020) 'AHEAD launches Brunei-Japan hydrogen supply chain for power generation in Tokyo Bay'. S&P Global Platts, 25 June. Online. www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/natural-gas/062520-ahead-launches-brunei-japan-hydrogen-supply-chain-for-power-generation-in-tokyo-bay

31-34. Bimbo, N. (2019) 'The Unbearable Lightness of Hydrogen'. The Chemical Engineer, 16 August. Online. www.thechemicalengineer.com/features/the-unbearable-lightness-of-hydrogen/

35. Sampson, J. (2020) 'Maritime Hydrogen and Marine Energy Conference: Shipping hydrogen from Brunei to Japan'. Hydrogen View, 15 October. Online. www.h2-view.com/story/maritime-hydrogen-and-marine-energy-conference-shipping-hydrogen-from-brunei-to-japan/

36. Royal Society, The (2020) 'Ammonia: Zero-carbon fertiliser fuel and energy store'. Policy briefing. Online. https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/green-ammonia/green-ammonia-policy-briefing.pdf

37-38. Ricci, M., Newsholme, G., Bellaby, P. and Flynn, R. (2006) 'Hydrogen: Too dangerous to base our future upon?' ICHEME NW Branch Symposium, Symposium Series (151). Online. www.icheme.org/media/9792/xix-paper-04.pdf

39. Kolodziejczyk, B. and Wee-Liat, O. (2019) 'Hydrogen Power is Safe and Here to Stay'. World Economic Forum, 25 April. Online. www.weforum.org/agenda/2019/04/why-don-t-the-public-see-hydrogen-as-a-safe-energy-source/

40. Forsythe, L. (2019) 'Safety in the Fast-Growing Hydrogen Economy'. WHA International, Inc., 29 May. Online. https://wha-international.com/safety-in-the-fast-growing-hydrogen-economy/

41. Tae, C. (2021) 'Hydrogen Safety: Let's clear the air'. NRDC. 14 January. Online. www.nrdc.org/experts/christian-tae/hydrogen-safety-lets-clear-air

42. HyLaw (n.d.) 'Quality Requirements'. HyLAW Online Database. Online. www.hylaw.eu/database/italy/hydrogen-as-a-fuel-and-refueling-infrastructure-for-mobility-purposes/fuel-quality/quality-requirements (accessed 14 June 2021)

43-44. Ameen, F., Stagner, J.A. and Ting, D.S.K. (2017) 'The Carbon Footprint and Environmental Impact assessment of desalination'. International Journal of Environmental Studies, 75(1), 45–58. Online. https://doi.org/10.1080/00207233.2017.1389567

45. UAE (n.d.) 'Water'. Online. https://u.ae/en/information-and-services/environment-and-energy/water-and-energy/water- (accessed 5 May 2021)

46. Ameen, F., Stagner, J.A. and Ting, D.S.K. (2017) 'The Carbon Footprint and Environmental Impact assessment of desalination'. International Journal of Environmental Studies, 75(1), 45–58. Online. https://doi.org/10.1080/00207233.2017.1389567

47. Urquhart, J. (2021) 'Seawater-splitting System Could Scale-up Renewable Hydrogen Production'. Chemistry World, 12 March. Online. www.chemistryworld.com/news/seawater-splitting-system-could-scale-up-renewable-hydrogen-production/4013332.article

48. MEED (2021) 'Saudi Arabia Moves on $5bn Hydrogen Project'. Power Technology, 9 April. Online. www.power-technology.com/comment/saudi-arabia-hydrogen-project/ (accessed 13 June 2021)

49. Motorship, The (2021) 'Supply Chain Dynamics in Optimal Choice of Hydrogen Carrier'. 8 April, Online. www.motorship.com/news101/alternative-fuels/supply-chain-dynamics-in-optimal-choice-of-hydrogen-carrier

50. Integral (2020) 'Hydrogen and Fuel Cell Industry in China'. Integral, 6 August. Online. www.integralnewenergy.com/?post_type=products&page_id=25720

51. FCH (n.d.) 'Hydrogen Roadmap Europe: A sustainable pathway for the European Energy Transition'. Fuel Cells and Hydrogen: Joint Undertaking. Online. www.fch.europa.eu/news/hydrogen-roadmap-europe-sustainable-pathway-european-energy-transition (accessed 14 June 2021)

52. NS Energy (2021) 'US Aims to Slash Cost of Clean Hydrogen Production 80% by 2030'. June. Online. www.nsenergybusiness.com/news/industry-news/cost-clean-hydrogen-production-earthshot/?utm_source=newsletter&utm_medium=email&utm_campaign=nsenergy_oilgas&utm_content=&utm_content=20210609 (accessed 25 June 2021)

53. Bauer, E. (2021) 'Hydrogen Insights 2021'. Hydrogen Council, 17 February. Online. https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2021/#:%7E:text=On%20a%20company%20level%2C%20members,16%2Dfold%20increase%20through%202030

54. Dubai Statistics Center (2015) 'Economic Input–Output Model 2015' (in Arabic). Online. www.dsc.gov.ae/Report/IO%202015_Dubai.xlsx

شكر وتقدير

فريق المشروع

فيصل كاظم، مدير مشروع أوّل،
مؤسسة دبي للمستقبل

د. باتريك نوك، مدير تنفيذي – الاستشراف وتخيل المستقبل، مؤسسة دبي للمستقبل

منى العمودي، مدير إدارة،
وزارة الطاقة والبنية التحتية

فاطمة أبو الهول الفلاسي، رئيس قسم استراتيجيات وسياسات الطاقة بالإنابة،
وزارة الطاقة والبنية التحتية

فاطمة الحبشي، كبيرة مهندسي الاستدامة، وزارة التغير المناخي والبيئة

قيس السويدي، مدير إدارة التغير المناخي،
وزارة التغير المناخي والبيئة

شايما مبوانا، محللة تغير المناخ،
وزارة التغير المناخي والبيئة

د. ديبتي ماهاجان ميتال، خبير في سياسات تغير المناخ، وزارة التغير المناخي والبيئة

المساهمون والمراجعون

أحمد شهم شريف، مدير - ضبط جودة المحتوى، مؤسسة دبي للمستقبل

أروى القاسم، مدير مشاريع،
مؤسسة دبي للمستقبل

كريس شاو، مساهم معتمد،
مؤسسة دبي للمستقبل

د. بارت كولودزيجيكزيك، مساهم معتمد،
مؤسسة دبي للمستقبل

ديفيد فيجار، محرر استشاري

مريم آل ثاني، مؤسسة دبي للمستقبل

نوام بوسيدان، أمين منصة الطاقة،
المنتدى الاقتصادي العالمي

نوره الحثبور، مدير - الاتصال المؤسسي،
مؤسسة دبي للمستقبل

أوركون كيرلي، استشاري،
مؤسسة دبي للمستقبل

بول ديفيس، كبير مستشاري السياسات بالجمعية الملكية

سعيد القرقاوي، مدير إدارة – أكاديمية دبي للمستقبل، مؤسسة دبي للمستقبل

سلطان الحلامي، عضو الفريق الوطني،
الفريق الوطني لخطة الاستعداد للخمسين

سوندار رامان، مدير إدارة – التقنية،
متحف المستقبل

سهيلة البهندي، مؤسسة دبي للمستقبل

د. هبة شحادة، قائد فريق الاستشراف، مؤسسة دبي للمستقبل

ضاري المعود، مدير أول،
مؤسسة دبي للمستقبل

د. دولف جيلين، مدير مركز الابتكار والتقنية،
الوكالة الدولية للطاقة المتجددة

علي الزعابي، مؤسسة دبي للمستقبل

د. سامي محروم، مدير إدارة – البحوث والاستراتيجية، مؤسسة دبي للمستقبل

د. لوردس فيجا, أستاذة الهندسة الكيميائية ومديرة مركز البحوث والابتكار في ثاني أكسيد الكربون والهيدروجين (مركز ريتش)، جامعة خليفة

شركة ستانزيك انترناشونال ستراتجي

شركة كالدر اكونومك امباكت انالسس

اللجنة التقنية للهيدروجين في الإمارات

ائتلاف أبوظبي للهيدروجين

هيئة كهرباء ومياه دبي (ديوا)

نبذة عن مؤسسة دبي للمستقبل

مؤسسة دبي للمستقبل أطلقها صاحب السمو الشيخ محمد بن راشد آل مكتوم، نائب رئيس الدولة رئيس مجلس الوزراء حاكم دبي «رعاه الله» في عام 2016 لتسهم في مسيرة استشراف وتصميم وتنفيذ المستقبل في دبي.

تتعاون المؤسسة مع مختلف الجهات الحكومية والخاصة في دبي ودولة الإمارات والعالم بهدف مواكبة التغيرات المتسارعة في مختلف القطاعات الاستراتيجية والاستعداد لها عبر تبني التكنولوجيا الحديثة مثل الذكاء الاصطناعي والروبوتات والطباعة ثلاثية الأبعاد والبلوك تشين وإنترنت الأشياء وغيرها من أدوات الثورة الصناعية الرابعة.

تشرف مؤسسة دبي للمستقبل على العديد من المشاريع والمبادرات الرائدة مثل متحف المستقبل ومنطقة 2071 ومركز الثورة الصناعية الرابعة ومسرعات دبي المستقبل ومليون مبرمج عربي ومرصد المستقبل وغيرها الكثير من المبادرات المعرفية ومراكز تصميم المستقبل.

تهدف المؤسسة من خلال هذه المبادرات إلى إعداد أجيال الغد من الكوادر الوطنية لمتطلبات المستقبل وتمكينهم بالمهارات الضرورية للمساهمة في مسيرة التنمية المستدامة في الدولة.

كما تسهم المؤسسة بتعزيز مكانة دبي كوجهة عالمية لأفضل العقول وحاصنة لأصحاب الابتكارات الواعدة والشركات الناشئة والمؤسسات العالمية للعمل على إيجاد حلول مبتكرة وتطبيقها على أرض الواقع.

dubaifuture.ae

research@dubaifuture.gov.ae

@dubaifuture