2024-08

تطوير صناعة الهيدروجين النظيف في قطر:
تكاليف الاستثمار، عدم اليقين، والقرارات الحاسمة

أبريل 2025

QEERI
معهد قطر لبحوث البيئة والطاقة
Qatar Environment & Energy Research Institute
جامعة حمد بن خليفة
HAMAD BIN KHALIFA UNIVERSITY

إرثنا earthna
عضو في مؤسسة قطر
Member of Qatar Foundation

تقرير

تطوير صناعة الهيدروجين النظيف في قطر: تكاليف الاستثمار، وعدم اليقين، والقرارات الحاسمة

أبريل 2025

المؤلفون

كارلوس ميندیز والدكتور مارشيلو كونتستابيله

معهد قطر لبحوث البيئة والطاقة

نبذة عن مركز إرثنا

مَركَز إرثنا لمُستقبَل مستدام (إرثنا) مُنظَّمة غير ربحية أنشأتها مُؤسَّسة قطر مختصة بإقرار السياسات، وإجراء الأبحاث، والعمل الدعوي لتعزيز وتمكين الجهود الرامية للوصول إلى نَهج مُنسَّق لتحقيق الاستدامة البيئية، والاجتماعية، والاقتصادية، والازدهار.

يَعمَل إرثنا على تسهيل جهود وإجراءات الاستدامة في قطر وغيرها من البلدان الحارة والجافة بالتركيز على أطر الاستدامة، والاقتصادات الدائرية، والانتقال في أنظمة الطاقة، وتغير المناخ، والتنوع البيولوجي والنظم البيئية، والمدن والمباني والمنشآت، والتعليم، والأخلاق، والدين. يَعمَل إرثنا على تعزيز التعاون، والابتكار، والتغيير الإيجابي من خلال الجمع بين الخبراء الفنيين، والأكاديميين، والمنظمات الحكومية وغير الحكومية، والشركات والمجتمع المدني.

باستخدام مَقرَّه - المدينة التعليمية - كقاعدة اختبار، يَقوم إرثنا بتطوير وتجربة حلول مستدامة وسياسات قائمة على أدلة لدولة قطر والمناطق الحارة والجافة. تلتزم المُنظَّمة بالجمع بين التفكير الحديث والمعارف التقليدية، مما يساهم في رفاهية المجتمع من خلال خَلْق إرث من الاستدامة في بيئة طبيعية مزدهرة.

لمزيد من المعلومات عن إرثنا وللاطلاع على أحدث مبادراتنا، يرجى زيارة الموقع الإلكتروني www.earthna.qa

فريق إعداد التقرير

كارلوس ميندیز
معهد قطر لبحوث البيئة والطاقة
الدوحة، قطر

الدكتور مارشيلو كونتستابيله
معهد قطر لبحوث البيئة والطاقة
الدوحة، قطر

هيئة التحرير

الدكتور غونزالو كاسترو دي لا ماتا
إرثنا، مؤسسة قطر
الدوحة، قطر

الدكتورة منى مطر الكواري
إرثنا، مؤسسة قطر
الدوحة، قطر

سيباستيان توربو
إرثنا، مؤسسة قطر
الدوحة، قطر

الدكتور سعود خليفة آل ثاني
إرثنا، مؤسسة قطر،
الدوحة، قَطَر

الدكتور معز علي
إرثنا، مؤسسة قطر
الدوحة، قطر

والدكتور رضوان بن حمادو
إرثنا، مؤسسة قطر،
الدوحة، قَطَر

طلحة ميرزا
إرثنا، مؤسسة قطر
الدوحة، قطر

© إرثنا 2024

صندوق بريد: 5825، الدوحة، قطر
تيليفون: 0242 4454 (974+)، الموقع الإلكتروني: www.earthna.qa

PI: ETCC-2024-009

الوصول المفتوح، أُصدِر هذا التقرير بموجب شروط الترخيص الدولي لمؤسسة المشاع الإبداعي ("Creative Commons") 4.0 (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)، والذي يسمح بأي حال من الأحوال باستخدام غير تجاري، أو المشاركة والتوزيع والاستنساخ بأي وسيلة أو تنسيق، طالما تُقدِّم الإسناد المناسب للمؤلف (أو المؤلفين) الأصليين والمصدر، وتقديم رابط إلى ترخيص لمؤسسة المشاع الإبداعي ("Creative Commons")، وبيان إذا تم تعديل المواد المرخصة. لا يحق لك بموجب هذا الترخيص نشر مواد مُعدَّلة مستمدة من هذا التقرير أو أجزاء منه.

يفترض الناشر، والمؤلفين، والمحررين أن النصائح والمعلومات الواردة في هذا التقرير صحيحة ودقيقة من تاريخ النشر. لا يُقدِّم الناشر، ولا المؤلفون، أو المحررون ضماناً، صريحاً أو ضمنياً، فيما يتعلق بالمواد الواردة هنا أو بأي أخطاء أو سهو يمكن أن يكون قد حدث. سيظل الناشر طرفاً محايداً في الدعاوى القضائية المتعلقة بالخرائط المنشورة والانتماءات المؤسسية.

جدول المحتويات

06	المقدمة
10	استخدام الهيدروجين في القطاع الصناعي في دولة قطر ومحفزات إزالة الكربون
14	التجارة الدولية المستقبلية المتوقعة للهيدروجين والدور الذي يُمكِن أن تضطلع به قطر
18	سياسة قطر للهيدروجين ضمن سياق دول مجلس التعاون الخليجي
22	تحليل الاستراتيجيات الممكنة لتطوير صناعة الهيدروجين النظيف في قطر
38	مناقشة
42	الاستنتاجات
44	إشادة
46	الاختصارات
52	المراجع

01

المقدمة

1.1 الخلفية

إن قطر دولة ذات دَخْل مرتفع وغنية بالموارد، يقوم اقتصادها على استغلال احتياطياتها الضخمة من الوقود الأحفوري خاصة الغاز الطبيعي. نتيجة لتطوير صناعاتها القائمة على الغاز الطبيعي المسال والوقود الأحفوري (مثل البتروكيماويات، والأسمدة، والألمنيوم والصلب) خلال التسعينيات، ارتفع الناتج المحلي الإجمالي لقطر بين عامي 2000 و2022 من 18 مليار دولار إلى 237 مليار دولار (بسعر الدولار لعام) (البنك الدولي، 2022). في عام 2008، أطلقت دولة قطر رؤيتها الوطنية 2030 التي تدعو إلى وضع استراتيجيات لتنويع الاقتصاد القطري وتحويله إلى اقتصاد قائم على المعرفة بجانب الحفاظ على البيئة. تقر الحكومة من خلال رؤية قطر الوطنية 2030 بضرورة إعادة تقييم نموذجها الاقتصادي الحالي في ظل التغيرات المناخية وغيرها من الاعتبارات البيئية.

لكن، على الرغم من الجهود الضخمة المبذولة منذ ذلك الحين لتنويع الاقتصاد بعيدًا عن صادرات الهيدروكربون والصناعات كثيفة الاستهلاك للوقود الأحفوري، ظَلَّ الاقتصاد القطري يَعتمد بشكل كبير على كلا القطاعين. على وجه التحديد، يُشكِّل قطاع النفط والغاز أكثر من 50% من الناتج المحلي الإجمالي، و85% من عائدات التصدير و70% من إيرادات الحكومة (وزارة الخارجية، 2021). يجعل هذا الاعتماد الاقتصاد القطري عرضة للتأثر بتقلبات أسعار الوقود الأحفوري على المدى القصير والضغوط الدولية المتزايدة على المدى الطويل التي تدفع للتحول بعيدًا عن استخدام الوقود الأحفوري (وكالة الطاقة الدولية، 2022؛ الأمم المتحدة، 2023).

علاوة على ذلك، يتم حاليًا فَرْض متطلبات أكثر صرامة على الكربون الموجود في الوقود والسلع. تَدعَّم هذه المتطلبات الجديدة عدة لوائح، مِثل آلية تعديل حدود الكربون للاتحاد الأوروبي 2023، ومبادرات أخرى تم الترويج لها خلال مؤتمر الأطراف 28، مِثل ميثاق خفض انبعاثات قطاع النفط والغاز ومُسرِّع الانتقال الصناعي، تهدف إلى إزالة الكربون من قطاع التنقيب والصناعات شديدة الانبعاثات (الأمم المتحدة، 2023)

لذلك، في عالَم تزداد فيه القيود على الكربون، يَمنَح الهيدروجين النظيف[1] فرصةً لقطر لتستمر في استغلال مواردها من الغاز الطبيعي. يُمكِن تحقيق ذلك من خلال تصدير الهيدروجين النظيف مباشرةً، أو استخدامه محليًا لتقليل الكربون الموجود في السلع التصديرية مثل الأسمدة والصلب. يُمكِن لقطر الاستفادة من خبراتها الصناعية الحالية وعلاقاتها التجارية الراسخة لتطوير صناعة تصدير الهيدروجين النظيف والسلع منخفضة الكربون. مع ذلك، يؤدي وجود درجة كبيرة من عدم اليقين- والتي تؤثر تباعًا على مستقبل أسواق الغاز الطبيعي المسال والهيدروجين النظيف - إلى جعل عملية وضع استراتيجية وخارطة طريق للهيدروجين في قطر عملية معقدة. ولا تزال التحديات والتعقيدات المرتبطة بتطوير استراتيجية هيدروجين في قطر بحاجة إلى مزيد من الاكتشاف والدراسة والتحليل.[2] ونسعى في هذا التقرير إلى توصيف حالات عدم اليقين المرتبطة بالأسواق المستقبلية للهيدروجين النظيف، وإجراء تقييم أولي لمخاطر الاستثمار المحتملة والقرارات الحاسمة اللازمة لتطوير صناعة الهيدروجين النظيف في قطر.

[1] في هذه الورقة، نستخدم مصطلح الهيدروجين النظيف للإشارة إلى الهيدروجين الذي يؤدي إنتاجه إلى انبعاثات منخفضة للغاية من ثاني أكسيد الكربون 2 والميثان وغيره من الغازات المسببة للانحباس الحراري العالمي التي يتم إطلاقها في الغلاف الجوي، بغض النظر عن المواد الخام وطرق الإنتاج المستخدمة.

[2] لمناقشة الدراسات السابقة ذات الصلة وخرائط الطرق والاستراتيجيات، يرجى الرجوع إلى الملحق الأول.

1.2 هدف ونطاق الدراسة

تُواجِه دولة قطر، كباقي دول مجلس التعاون الخليجي، خيارات مختلفة فيما يتعلق بالهيدروجين النظيف. يُمثل هذا التقرير خطوة أولى في توصيف هذه المسارات وتحليلها. حيث يقدم تقييمًا قائمًا على السيناريوهات المحتملة لتكاليف الاستثمار، وأوجه عدم اليقين الرئيسية، والقرارات الحاسمة المرتبطة بالاستراتيجيات المختلفة التي يمكن أن تتبناها دولة قطر لتطوير صناعة الهيدروجين النظيف. تقر هذه الدراسة بأن بعض أوجه عدم اليقين في السيناريوهات المطروحة يمكن دراستها بشكل أفضل باستخدام الأساليب الإحصائية، كما يمكن تحليل المخاطر والعوائد باستخدام الأساليب المالية، ويمكن دراسة القرارات الحاسمة المحتملة باستخدام نهج نمذجة متنوعة. مع ذلك، فإن الهدف من هذه الدراسة هو الوصول إلى فهم أولي للمشكلة وتحديد ما إذا كانت تستدعي مزيدًا من البحث.

يتم هيكلة هذا التقرير على النحو التالي.

يصف القسم 2 الإنتاج الحالي واستخدام الهيدروجين كمادة خام صناعية في دولة قطر، وانبعاثاته الكربونية، والدوافع التنظيمية الدولية للتخفيف من هذه الانبعاثات.

يطرح القسم 3 مقارنة بين المسارات والأنماط التجارية المتوقعة لتجارة الهيدروجين الدولية استنادًا إلى السياسات والإعلانات الحالية مع المسارات والأنماط التجارية الحالية لتصدير الغاز الطبيعي المسال في دولة قطر.

يناقش القسم 4 السياسة الحالية للهيدروجين النظيف في دولة قطر مقارنةً بسياسات دول مجلس التعاون الخليجي الأخرى.

بناءً على الخيارات الموضحة في القسم 1.1، **يقدم القسم 5** مجموعة من الاستراتيجيات المحتملة لتطوير صناعة الهيدروجين النظيف في دولة

قطر، و تقديرات تكاليف الاستثمار في البنية التحتية.

كما **يستعرض القسم 6** مقارنة بين الاستراتيجيات المختلفة مع إبراز

المخاطر المحتملة والقرارات الحاسمة المرتبطة بها.

أخيرًا، **يقدم القسم 7** ملاحظات ختامية وسبل المضي قدمًا.

02

استخدام الهيدروجين في القطاع الصناعي في دولة قطر ومحفزات إزالة الكربون

2.1 الاستخدام الحالي للهيدروجين كمادة خام صناعية في دولة قطر وانبعاثاته الكربونية

يتم إنتاج كميات كبيرة من الهيدروجين حاليًا في قطر لاستخدامات صناعية مختلفة. ينتج الهيدروجين عن طريق إصلاح الغاز الطبيعي بالبخار، وهو ما يُصنَّف على أنه هيدروجين رمادي. يستخدم الهيدروجين في دولة قطر في إنتاج النافتا، والديزل، ووقود الطائرات، وغاز البترول المسال، والأمونيا (NH_3)، والميثانول (CH_3OH)، والفولاذ، مما يشكل لإجمالي طلب يقدر بحوالي 1.20 مليون طن متري سنويًا (انظر الجدول 1).

ويعادل ذلك حوالي 1.3% من إجمالي الطلب العالمي على الهيدروجين. وعلاوة على ذلك، وبفضل صناعة تحويل الغاز إلى سوائل، تنتج دولة قطر حوالي 8.3 مليون طن متري من الغاز الصناعي الغني بالهيدروجين، الذي يتم تحويله إلى هيدروكربونات من خلال عملية فيشر - تروبش. لن تتطرق هذه الدراسة التحليلية إلى الهيدروجين الموجود في الغاز الصناعي.

الجدول 1. الطلب على الهيدروجين في القطاع الصناعي في قطر

الصناعة	المنتج	الطلب	الشركات ذات الصلة	انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من الهيدروجين الرمادي (طن متري)	الافتراضات
تكرير النفط	البنزين (نافثا)، الديزل، وقود الطائرات، الكيروسين	225,593 طن من الهيدروجين لعدد 34.675 مليون برميل من المنتجات المكررة في عام 2022[أ]	قطر للطاقة	2.26	استخدام قيمة متوسطة قدرها 0.0065 طن من الهيدروجين لكل برميل تم استخدامه [ب]
الصناعات الكيميائية	الأمونيا	678,600 طن من الهيدروجين لإنتاج 3.77 مليون طن من الأمونيا في عام 2021[ج]	شركة قطر للأسمدة الكيماوية	6.79	استخدام 180 كجم من الهيدروجين لكل طن من الأمونيا المنتجة (NH_3) [د]
	الميثانول	206,454 طن من الهيدروجين لإنتاج 1,101,086 طن من الميثانول في عام 2022[هـ]	شركة قطر للإضافات البترولية المحدودة	2.06	استخدام 0.1875 كجم من الهيدروجين لكل كجم من الميثانول (CH_3OH) المُنتَج [و]
الصلب	الصلب	88,637 طن من الهيدروجين لإنتاج 1,410,254 طن من الحديد المختزل (الحديد الإسفنجي) في عام 2022[ز]	شركة قطر للصلب	0.89	يُفترض أن يكون 30% من غاز الاختزال هيدروجين [ح]

[أ] وفقًا لتقرير الاستدامة (قطر للطاقة، 2023أ)

[ب] القيم مستمدة من أبحاث وتم التحقق منها مع خبراء الصناعة (مختبر أرجون الوطني، 2019)

[ج] وفقًا لتقرير الاستدامة (قافكو، 2021)

[د] القيم مستمدة من أبحاث وتم التحقق منها مع خبراء الصناعة (شيهاد ودينسر 2021؛ تحالف الهيدروجين الشمالي الغربي، 2022؛ ريفاروولوآخرون، 2019)

[هـ] وفقًا لتقرير الاستدامة (شركة قطر للإضافات البترولية المحدودة (قافاك)، 2021)

[و] القيم مستمدة من أبحاث وتم التحقق منها مع خبراء الصناعة (بوريتي، 2013)

[ز] وفقًا لتقرير الاستدامة (قطر ستيل، 2023، 2019)

[ح] القيمة المشار إليها من قبل الشركة المصنعة للتكنولوجيا (أستوريا وآخرون، 2022)

حاليًا، تنتج شركة قطر للطاقة (شركة النفط والغاز الوطنية في قطر)، وشركة قطر للأسمدة الكيماوية (قافكو)، وشركة قطر للحديد والصلب (قطر ستيل) الهيدروجين الخاص بهن لاستخدامه كمُدخَل في عملية لإنتاج. تزود قافكو شركة قطر للإضافات البترولية المحدودة (قافاك) بالهيدروجين لبدء تشغيل المصنع. كما تنتج شركة قطر للفينيل (كي في سي)، وهي شركة تابعة لشركة قطر للبتروكيماويات (قابكو)، كمية صغيرة نسبيًا من الهيدروجين الكهربي (غير مدرجة في الجدول 1) كمنتج ثانوي في تصنيع الصودا الكاوية والكلور من خلال عملية التحليل الكهربائي للمحلول الملحي. وقد أنتجت شركة قطر للفينيل 9.9 كيلو طن من الهيدروجين الكهربائي في عام 2020.

يساهم إنتاج الهيدروجين في قطر حاليًا في إطلاق انبعاثات كربونية عالية، حيث يُطلق حوالي 12 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون سنويًا لتلبية احتياجات إنتاج الصلب والأمونيا وتكرير النفط (انظر الجدول 1). يمكن تقليل هذه الانبعاثات الكربونية بشكل كبير من خلال تحديث البنية التحتية الحالية لإعادة إنتاج الغاز الطبيعي بالبخار باستخدام تقنية احتجاز وتخزين الكربون، التي تحوله إلى الهيدروجين النظيف. سيؤدي ذلك إلى تقليل الانبعاثات الكربونية للمنتجات الصناعية النهائية، التي يتزايد الطلب عليها نتيجة للسياسات الحكومية الجديدة والالتزامات الطوعية من قبل القطاع الصناعي. ومن أبرز هذه السياسات آلية تعديل حدود الكربون التابعة للاتحاد الأوروبي.

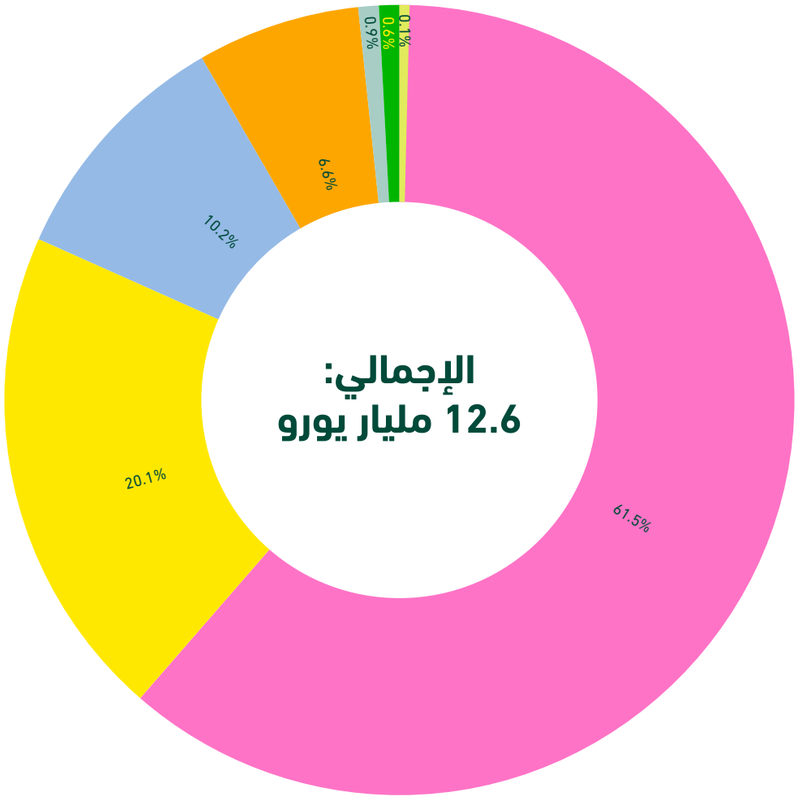
2.2 محفزات التجارة الدولية للسلع الأنظف: حالة آلية تعديل حدود الكربون

آلية تعديل حدود الكربون التابعة للاتحاد الأوروبي هي تعريفة كربونية تستهدف الانبعاثات المباشرة الموجودة في السلع المُستورَدة إلى الاتحاد الأوروبي ضمن القطاعات عالية الانبعاثات، مثل الكهرباء و الهيدروجين، والأسمنت، الألومنيوم، الحديد، الصلب والأسمدة (آلية تعديل حدود الكربون، 2023).[3] تَعمَل آلية تعديل حدود الكربون على تحقيق هدفين رئيسيين: 1) توفير فرص متكافئة للشركات الأوروبية التي تخضع للوائح بيئية أكثر صرامة نسبيًا مُقارَنة باللوائح الموجودة في مناطق أخرى. 2) تحفيز الشركات المُصدِّرة إلى الاتحاد الأوروبي لتسريع جهودها المعنية بمكافحة آثار تغيّر المناخ من خلال تقليل انبعاثات الغازات الدفيئة الموجودة في السلع التي تُصدِّرها.

بالنسبة لدولة قطر، يُعَدّ الاتحاد الأوروبي سوقًا رئيسيًا للصادرات، حيث شكّل حوالي 25% من إجمالي قيمة الصادرات خلال الربعين الثاني والثالث من عام 2024. قد يَكون لآلية تعديل حدود الكربون تأثيرًا على تنافسية الشركات القطرية سواءً بشكل مباشر عند التصدير إلى الاتحاد الأوروبي أو بشكل غير مباشر من خلال المساهمة في تعزيز المعايير البيئية في أسواق التصدير الأخرى مثل الولايات المتحدة الأمريكية وتركيا وكوريا الجنوبية، حيث يتم تصدير معظم الألمنيوم الخام إلى هذه الدول من قطر (بنك قطر للتنمية، 2202).

يوضح الشكل 1 حصص السلع المختلفة المُصدَّرة من قطر إلى الاتحاد الأوروبي. يهيمن كل من الوقود والزيوت على الصادرات، في حين تشكل المواد الكيميائية والأسمدة والحديد والصلب حصصًا أصغر ولكن ذات أهمية (موقع تريدينج إيكونوميكس 2202).

[3] على نحو مماثل لنظام تداول الانبعاثات في الاتحاد الأوروبي، يتعين على المستوردين شراء شهادات آلية تعديل حدود الكربون لتعويض الانبعاثات المضمنة للمنتجات المستوردة، حيث تعادل كل شهادة طنًا واحدًا من الانبعاثات. في أكتوبر 2023، بدأت فترة انتقالية مدتها ثلاث سنوات يلتزم خلالها المستوردون إلى الاتحاد الأوروبي لجميع السلع التي تندرج ضمن نطاق آلية تعديل حدود الكربون بالإفصاح عن انبعاثات غازات الاحتباس الحراري المضمنة لديهم كل ثلاثة أشهر بدون دفع أي تسوية مالية. منذ عام 2026 فصاعدًا، ستكون شهادات آلية تعديل حدود الكربون إلزامية، وسيتم ربط سعرها بسعر الكربون في نظام تداول الانبعاثات في الاتحاد الأوروبي.



الشكل 1. حصة السلع الرئيسية المصدرة من قطر إلى الأسواق المختلفة حسب القيمة (الربع الثالث 2202) (غرفة قطر، 2202ب)

سيتعين على قطر تخطيط وتنفيذ عدة تدابير لتقليل الانبعاثات الكربونية المرتبطة بإنتاج سلعها المُصدَّرة لكي تتوافق مع لوائح الكربون الموجودة في المنتجات المُصدَّرة إلى الاتحاد الأوروبي وربما للأسواق الأخرى التي قد تتبع نفس النهج[4]. يؤدي عدم الامتثال لآلية تعديل الحدود الكربونية إلى فرض تعريفة افتراضية تُحدَّد بالمقارنة مع أسوأ المنشآت أداءً التي توفر نفس المُنتَج في نظام تداول الانبعاثات في الاتحاد الأوروبي، مما سيؤثر على تنافسية الصادرات القطرية.

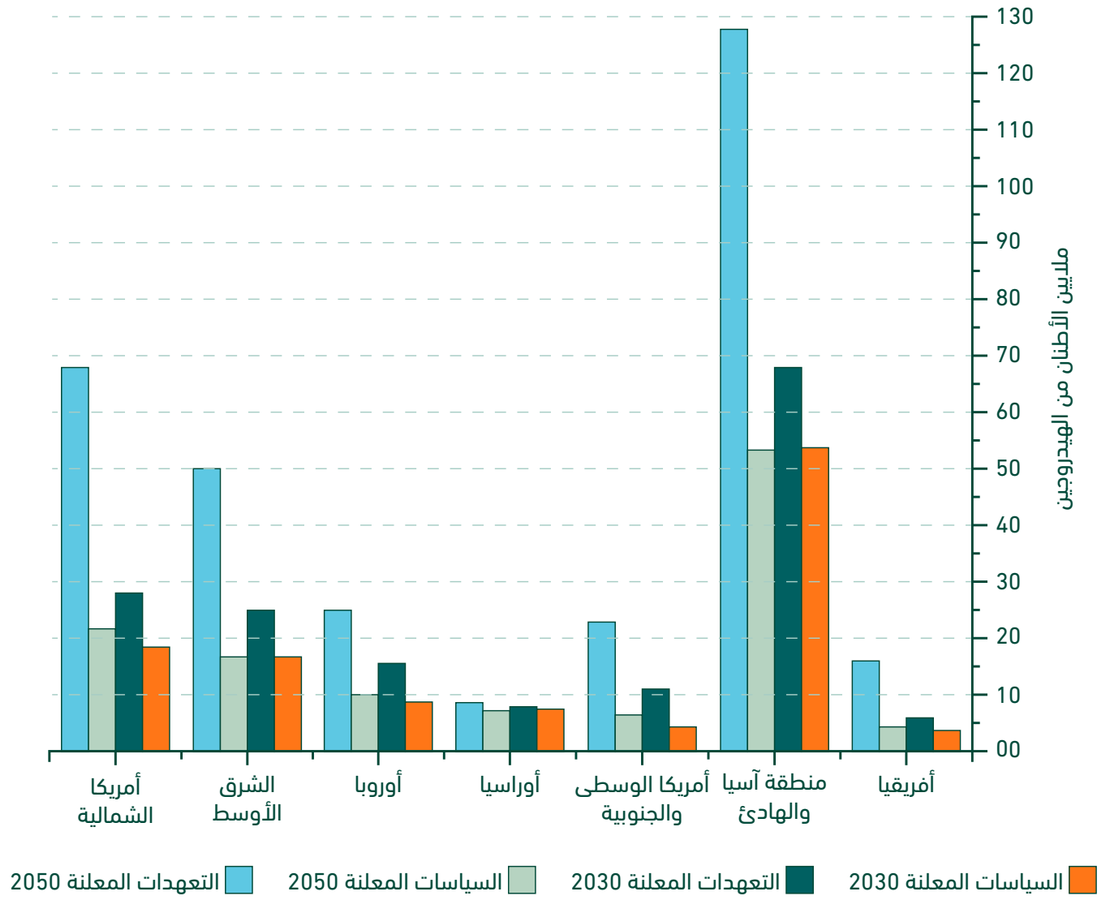
[4] خلال الفترة الانتقالية لآلية تعديل حدود الكربون (2023-2025)، تشمل الخطوات الفورية التي يتعين على المنتجين القطريين اتخاذها: (1) اختبار المنهجية الحالية لحساب غازات الاحتباس الحراري؛ (2) تقييم ما إذا كانت انبعاثات ثاني أكسيد الكربون لكل مُنتَج مفصلة بشكل كافي، (3) وتحديد ما إذا كانت منهجية الحساب ستسمح بتلبية متطلبات آلية تعديل حدود الكربون. في الوقت نفسه، سيتعين تقييم الخيارات التكنولوجية لتقليل الكربون المتضمن واستخدامها بمجرد اختيارها بحلول عام 2026.

03

التجارة الدولية المستقبلية المتوقعة للهيدروجين والدور الذي يُمكِن أن تضطلع به قطر

3.1 التجارة الدولية المستقبلية المتوقعة للهيدروجين

مع تزايد اهتمام عدد متنامٍ من الدول والشركات وتوقيع العديد من الاتفاقيات، بدأ سوق الهيدروجين الدولي في التبلور. مع ذلك، قد لا تسفر بعض الاتفاقيات عن تجارة فعلية، مما يعني أن السوق قد يشهد تغييرات كبيرة في المستقبل. لتقدير طرق وحجم تجارة الهيدروجين في المُستقبَل، يُمكِننا اتباع نهجين مختلفين: أ) تحليل المشاريع والاتفاقيات والتعهدات الحالية، أو ب) تحليل الأهداف التي يتعين على الدول تحقيقها للوصول إلى غاياتها طويلة الأجل للتخفيف من آثار تغير المناخ. يأخذ تقرير توقعات الطاقة العالمية لعام 2024 لوكالة الطاقة الدولية في اعتباره ثلاثة سيناريوهات: السياسات المعلنة، التعهدات المعلنة، والوصول إلى انبعاثات صفرية. يجدر بالذكر أنه قد تم تضمين الهيدروجين في جميع هذه السيناريوهات بالفعل. مع ذلك، في السيناريوهين الأولين، تستند تقديرات سوق الهيدروجين إلى المشاريع الحالية والاتفاقيات والأهداف، بينما في السيناريو الثالث، تستند على التقديرات على الكميات التي ستكون مطلوبة لتحقيق أهداف التخفيف من آثار تغير المناخ على المدى الطويل بغض النظر عن الأهداف الحالية. يعرِض الشكل 2 أرقام الطلب على الهيدروجين بناءً على سيناريوهات السياسات المعلنة والتعهدات المعلنة حسب المنطقة في عامي 2030 و2050.



الشكل 2. يعرض توقعات الطاقة العالمية للطلب على الهيدروجين في السيناريوهات الرئيسية (وكالة الطاقة الدولية، 2023)

التجارة الدولية المستقبلية المتوقعة للهيدروجين

لا تُحدد سيناريوهات وكالة الطاقة الدولية الاستخدامات النهائية للهيدروجين ودرجة نقائه المطلوبة، وهما من العوامل المؤثرة على الحالة التي سيتم عليها نقله لمسافات طويلة. وسواءٌ تم نَقْل الهيدروجين نقيّا في صورته السائلة باستخدام ناقلات الهيدروجين العضوي السائل أو تم تحويله لأحد مشتقاته (مثل الأمونيا والميثانول)، فإن ذلك يُؤثر بشكل كبير على تكلفة البنية التحتية؛ لذلك، ولإثراء هذا الجانب المهم من التحليل، تم الاستناد إلى مصادر أخرى يُعدَّد فيها الطلب على الهيدروجين حسب الاستخدام النهائي: تلك السيناريوهات هي المُقدَّمة من قِبَل مجلس الهيدروجين بالإضافة إلى الأهداف الوطنية للدول التي تُوفِّر مثل هذه التفاصيل.

ومن خلال ذلك، تم التوصل إلى سيناريوهات رغم تأثرها بدرجة عالية من عدم اليقين – توفر نطاقًا معقولًا لمستويات الطلب المستقبلية على الهيدروجين بحسب قطاع الاستخدام النهائي. وتشكّل هذه السيناريوهات أساسًا للحسابات الموضحة في القسم الخامس، حيث يُفترض، نظرًا لمتطلبات النقاء العالية، أن يُنقل الهيدروجين المخصص لاستخدام مركبات خلايا الوقود على الطرق بواسطة سفن تحمل الهيدروجين السائل، في حين يُنقل الهيدروجين المخصص للاستخدامات الأخرى ذات متطلبات النقاء الأقل عبر ناقلات ومشتقات الهيدروجين.

3.2 مقارنة بين أسواق الهيدروجين المحتملة للاستيراد وصادرات الغاز الطبيعي المسال (LNG) من قطر

تصدر قطر تقريبًا 35% من الغاز الطبيعي إلى الدول التي أعلنت عن استراتيجيات تستهدف استيراد الهيدروجين. في حين يتم تخصيص النسبة المتبقية للدول التي لم تطور استراتيجيات هيدروجين بعد أو التي تركز على إنتاجه وتصديره. يتم توضيح ذلك في الجدول 2. بالإضافة إلى ذلك، أشارت ألمانيا، التي من المقرر أن تبدأ في استيراد الغاز الطبيعي المسال القطري في عام 2026 لمدة لا تقل عن خمسة عشر عامًا، إلى أن استراتيجيتها المتعلقة بالهيدروجين تركز على الاستيراد (قطر للطاقة، 2022أ).

الجدول 2. توزيع صادرات الغاز من قطر ونهج الدول المستوردة تجاه الهيدروجين.

استراتيجية الهيدروجين الفيدرالية البلجيكية، 2022؛ الإستراتيجية الوطنية البرتغالية للهيدروجين، 2020؛ ما هو دور الهيدروجين في مستقبل الطاقة في تركيا؟، 2021؛ المجلس الاقتصادي والاجتماعي، 2021؛ معهد الطاقة، 2024؛ الحكومة، 2021؛ كوثم راج وأيوج براناف لاخينا، 2202؛ وزارة المناجم والطاقة، 2021؛ وزارة التحول البيئي والتحدي الديموغرافي، 2020؛ وزارة التنمية الاقتصادية، 2020؛ وزارة المناخ والبيئة، 2021؛ وزارة الاقتصاد والتنمية المستدامة، 2022؛ وزارة التجارة والصناعة سنغافورة، 2022؛ وكالة المشاريع الهولندية، 2022؛ حكومة باريس، 2020؛ سوخانكين، 2022؛ حكومة هولندا، 2020)

العميل الحالي للغاز	النسبة المئوية من إجمالي صادرات الغاز الطبيعي (2021)	حصة سوق الغاز المحلي في قطر	نهج استراتيجية الهيدروجين
كوريا الجنوبية	9.22%	21% - 27%	استيراد
الهند	11.72%	36% - 42%	تصدير
الصين	17.89%	8% - 7%	-
اليابان	3.13%	11% - 12%	استيراد
باكستان	6.88%	70%	-
تايوان	5.94%	24% - 25%	-
تايلاند	3.05%	22.5%	-
سنغافورة	1.41%	2%	استيراد
منطقة آسيا والمحيط الهادئ الأخرى	4.14%		
إيطاليا	5.23%	8%	استيراد وإنتاج محلي
المملكة المتحدة	2.19%	12% - 14%	تصدير (بحلول 2030)
بلجيكا	3.59%	13% - 14%	الاستيراد والنقل العبوري (الترانزيت)
إسبانيا	1.02%	6%	تصدير
فرنسا	1.80%	1%	تصدير
بولندا	1.48%	12% - 13%	اعتماد ذاتي ومصدر المحتمل
اليونان		7%	-
البرتغال		4.40%	تصدير
تركيا		0.47%	التصدير (بحلول 2040-2050)
هولندا		< 1.32%	مركز الهيدروجين
كرواتيا		< 30%	احتمال التصدير بعد 2040
دول أخرى من الاتحاد الأوروبي			
الكويت	4.06%	59.35%	-
الإمارات العربية المتحدة	14.92%	96.72%	تصدير
دول أخرى من الشرق الأوسط	1.17%		
الأرجنتين	0.16%	18.9%	التصدير بحلول 2050

تتحكم قطر في حصص متفاوتة من سوق الغاز الطبيعي في الدول المستوردة، بدءًا من 0.47% لتركيا وصولًا إلى 96.72% للإمارات العربية المتحدة. تفترض التحليلات الواردة في هذا التقرير أن قطر ستسعى للحصول على حصص في سوق الهيدروجين تتناسب مع الحصص التي تسيطر عليها في سوق الغاز الطبيعي الخاص بالتصدير. لا تأخذ هذه الافتراضات في الاعتبار أن بعض الدول، مثل بلجيكا وهولندا وسنغافورة، تهدف إلى أن تصبح مراكز إقليمية لاستيراد الهيدروجين لتلبية الطلب الدولي على وسائل النقل بالهيدروجين مما قد يفتح فرصًا أكبر للتصدير أمام قطر.

04

سياسة قطر للهيدروجين ضمن سياق دول مجلس التعاون الخليجي

سياسة قطر للهيدروجين ضمن سياق دول مجلس التعاون الخليجي

تعد قطر، في الوقت الحالي، الدولة الوحيدة في مجلس التعاون الخليجي التي لم تُصدِر استراتيجية أو خارطة طريق للهيدروجين أو تعلن عن موقف رسمي بشأنه (انظر الجدول 3). لكن، لم يمنع هذا الموقف قطر من لعب دور في صناعة الهيدروجين الناشئة. أعلنت قطر عن تطوير أكبر مصنع للأمونيا الزرقاء حتى الآن بقدرة إنتاجية تبلغ 1.2 مليون طن سنويًا، ومن المتوقع أن يبدأ التشغيل في الربع الأول من عام 2026 (قطر للطاقة، 2022ب؛ رويترز، 2022).

يمثل ذلك خطوة أولى مهمة في تطوير الصناعة الوطنية للهيدروجين النظيف. مع ذلك، إن بناء استراتيجية أو خارطة طريق يعد خطوة أساسية لأي دولة تهدف إلى أن تصبح لاعبًا رئيسيًا في سوق الهيدروجين. ستحتل قطر مكانة أفضل عند تبنيها استراتيجية أو خارطة طريق خاصة بها لتطوير صناعة تصدير هيدروجين ناجحة تركن إليها في علاقاتها التجارية الراسخة مع الاتحاد الأوروبي وآسيا.

الجدول 3. أهداف واستراتيجيات وخرائط طُرُق دول مجلس التعاون الخليجي للهيدروجين (هاينمان وآخرون، 2022؛ هيدروجين سنترال، 2022؛ إبراهيم وحسين، 2021؛ وزارة الطاقة، 2021؛ وزارة الطاقة والبنية التحتية، 2023؛ وزارة الطاقة والمعادن، 2022ب2022أ، 2022أ2022ب؛ ناكانو، 2022؛ نيوم، 2023؛ قطر للطاقة، 2022ب2022أ، 2022ج2022ب؛ سوخانكين، 2022؛ وزارة الطاقة والبنية التحتية في دولة الإمارات العربية المتحدة، 2021)

أعضاء مجلس التعاون الخليجي	حالة استراتيجية الهيدروجين	العناصر الرئيسية للاستراتيجية
البحرين	لا توجد استراتيجية للهيدروجين. مذكرة تفاهم مع شركة إير برودكتس لتقييم إمكانيات تطوير اقتصاد الهيدروجين في الدولة	• من المرجح أن يكون الإنتاج موجهًا للاستهلاك المحلي. • لا يبدو أن تصدير الهيدروجين هو الهدف الرئيسي.
المملكة العربية السعودية	لا توجد استراتيجية للهيدروجين. اتخاذ قرار الاستثمار النهائي لشركة نيوم للهيدروجين الأخضر مذكرة تفاهم مع ألمانيا بشأن إنتاج واستخدام الهيدروجين	• تهدف لأن تصبح أكبر مصدر للهيدروجين في العالم. • السعي لإنتاج الهيدروجين النظيف والأخضر. • استثمار 8.4 مليار دولار في أكبر مصنع للهيدروجين الأخضر الخالي من الكربون في العالم.
الكويت	لا توجد استراتيجية للهيدروجين. تم نشر ورقة بيضاء من قبل مؤسسة الكويت للتقدم العلمي	• السعي لإنتاج الهيدروجين النظيف والأخضر.
عمان	الإعلان عن الهيدروجين الأخضر في عمان	• التركيز على الهيدروجين الأخضر. • الأولوية هي إزالة الكربون من الصناعة المحلية. • إنتاج 8.5 مليون طن متري بحلول عام 2050.
قطر	لم يتم الإعلان عنها	-
الإمارات العربية المتحدة	الاستراتيجية الوطنية للهيدروجين	• تهدف إلى إزالة الكربون من القطاعات التي يصعب تقليل انبعاثاتها، مع الحاجة إلى 2.1 مليون طن متري سنويًا و10.1 مليون طن متري سنويًا من الهيدروجين النظيف بحلول عام 2031 و2050 على التوالي. • تهدف لتصدير ما يصل إلى 9.6 مليون طن بحلول عام 2050. • بحلول عام 2050، سيشكل الهيدروجين الأزرق والأخضر 95% من إنتاج الهيدروجين، في حين سيشكل الهيدروجين الوردي الـ 5% المتبقية.

سياسة قطر للهيدروجين ضمن سياق دول مجلس التعاون الخليجي

تركز قطر للطاقة على أنشطتها في قطاع الغاز الطبيعي المسال من خلال تبني استراتيجية مزدوجة المحاور. يتمثل المحور الأول في التوسع في إنتاج الغاز الطبيعي المسال، حيث تخطط لزيادة الإنتاج من 77.8 مليون طن متري سنويًا حاليًا إلى 142 مليون طن متري سنويًا بحلول عام 2030. أما المحور الثاني، فيركز على الحد من انبعاثات النطاقين 1 و2 عبر مزيج من اعتماد مصادر الطاقة المتجددة، واستخدام تقنيات احتجاز وتخزين الكربون، والاستفادة المحتملة من الهيدروجين.

لم تضع دولة قطر أو شركة قطر للطاقة التزامات صريحة تجاه تحقيق أهداف طويلة الأمد لصافي الانبعاثات الصفري، بل تبنتا نهجًا عمليًا وبراغماتيًا. مع ذلك، من خلال تبني نهجٍ عمليًا تعمل كلا الجهتين على تنفيذ خطوات ملموسة لتقليل انبعاثات الغازات الدفيئة في الفترة الممتدة بين عامي 2030 و2035 (مكتب الاتصال الحكومي، 2022؛ قطر للطاقة، 2023أ). علاوة على ذلك، فإن دولة قطر هي إحدى الدول الموقعة على منتدى الدول المنتجة المتطلعة للوصول إلى صافي انبعاثات صفري - وهو تحالف من الدول المنتجة للنفط والغاز لإبراز التزامها بتحقيق صافي انبعاثات الغازات الدفيئة صفري بحلول منتصف القرن من خلال جهود جماعية منسقة - مما يشير بالتأكيد إلى النية واضحة لتقليص انبعاثات الغازات الدفيئة في صادراتها. وقد يشمل ذلك أيضًا تطوير قدرة إنتاج الهيدروجين النظيف لاستخدامه كمادة خام كيميائية في الصناعة المحلية وربما للتصدير كناقل للطاقة.

وعلى الرغم من أن دولة قطر وشركة قطر للطاقة لم تلتزما بعد باستراتيجية أو خارطة طريق للهيدروجين، ولا يزال غائبًا وجود حافز سياساتي قوي لإنتاج الهيدروجين النظيف مثل الالتزام بأهداف صافي الانبعاثات الصفرية، إلا أن نهجهما قد يكون مؤاتيًا لتطوير صناعة وطنية للهيدروجين النظيف. إن توسيع نطاق تقنيات احتجاز الكربون وتخزينه في قطر لتقليص الانبعاثات المباشرة وغير المباشرة الناتجة عن إنتاج الغاز الطبيعي المسال يمكن أن يمهد الطريق لبناء قدرة إضافية على احتجاز الكربون واستخدامه وتخزينه، وهذا ما سيتطلبه إنتاج الهيدروجين الأزرق. في نفس الوقت، يمكن أن يساهم التركيز على تقليص انبعاثات الغازات الدفيئة الناتجة عن صناعة الوقود الأحفوري، والصناعات البتروكيميائية وغيرها من الصناعات كثيفة الطاقة في قطر على خلق طلب كبير على الهيدروجين النظيف على المدى القريب. يمكن تلبية هذا الطلب، إلى حد ما، من خلال تحسين قدرة إصلاح الميثان بالبخار مع تقنيات احتجاز وتخزين الكربون. لكن، توجد عدة طرق محتملة لتطوير صناعة الهيدروجين النظيف في قطر. سيحدد القسم التالي مجموعة من الاستراتيجيات البديلة استنادًا إلى سرديات محتملة؛ وسيتم قياس هذه الاستراتيجيات بناءً على الأدلة المتاحة، مع الاستعانة بالافتراضات المنطقية عند الضرورة؛ كما ستتم دراسة تداعياتها فيما يتعلق بعدم اليقين والمخاطر والقرارات الحاسمة

05

تحليل الاستراتيجيات الممكنة لتطوير صناعة الهيدروجين النظيف في قطر

5.1 تعريف الاستراتيجيات المحتملة

بالنظر إلى البنية التحتية الحالية والخبرات المتوفرة، ومع التحول العالمي نحو تقليل الانبعاثات الموجودة في السلع كثيفة الاستهلاك للطاقة، فإن أحد الخيارات المتاحة لقطر هو التركيز مبدئيًا على إزالة الكربون من عمليات إنتاج الهيدروجين الحالية بتحديث محطات إصلاح الميثان بالبخار بتقنية احتجاز وتخزين الكربون. يتماشى هذا الخيار مع استراتيجية الإمارات العربية المتحدة، التي تعطي الأولوية لاستخدام الهيدروجين النظيف محليًا بدلاً من تصديره (وزارة الطاقة والبنية التحتية، 2023). بالتالي، تعرف الاستراتيجية الأولى باسم تنظيف الصناعة المحلية». تركز هذه الاستراتيجية على تحديث عمليات إنتاج الهيدروجين الحالي بدمج تقنية احتجاز وتخزين الكربون، دون السعي لإنتاج المزيد من الهيدروجين النظيف بهدف التصدير. بهذه الاستراتيجية، ستتبع قطر نهجًا محافظًا يسعى للحفاظ على سوقها الحالي لصادراتها بالتكيف مع لوائح الاتحاد الأوروبي، هذا بافتراض أن اللوائح الإقليمية الحالية المتعلقة بحدود الكربون سيتم تبنيها في نهاية المطاف من قبل المناطق الأخرى.

في سياق هذه الاستراتيجية، يمكن أيضًا استخدام الهيدروجين النظيف لتقليل انبعاثات الغازات الدفيئة الناتجة عن تسييل الغاز الطبيعي، والتي تمثل وحدها حوالي نصف انبعاثات الغازات الدفيئة لشركة قطر للطاقة الناتجة عن عمليات الغاز الطبيعي المسال. على الرغم من أن هذا الوضع لم يتحقق بعد، إلا أن حجم الهيدروجين النظيف المطلوب يمكن أن يتجاوز الكمية المستخدمة حاليًا كمادة أولية صناعية في قطر. إن بناء القدرة على إنتاج الهيدروجين الأزرق لتسييل الغاز الطبيعي، مع تنظيف إنتاج الهيدروجين القائم للاستخدامات الصناعية، يُمكِن أن يُحقِّق وفورات بسبب التوسع في حجم إنتاج كل من الهيدروجين واحتجاز وتخزين الكربون، مما يقلل من أخطار الاستثمارات الأخرى. لم يتضمن هذا التحليل استراتيجيات الهيدروجين، ولكنه سيُناقَش بشكل نوعي في القسم السادس.

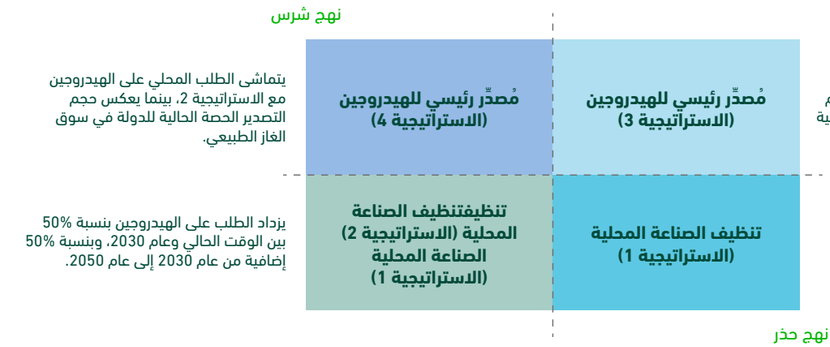
يمكن لقطر كذلك أن تتبنى نهجًا أكثر جرأة عن طريق الاستفادة من انخفاض تكاليف إنتاج الغاز الطبيعي المحلي وتوفير قدرات احتجاز وتخزين الكربون لتوسيع إنتاجها من السلع التصديرية كثيفة الطاقة. تُعرف هذه الاستراتيجية باسم توسيع الصناعة النظيفة. يتماشى هذا الخيار مع استراتيجية الإمارات العربية المتحدة، التي تعطي الأولوية لاستخدام الهيدروجين النظيف محليًا بدلاً من تصديره (وزارة الطاقة والبنية التحتية، 2023). يمكن أن يُستخدم الهيدروجين في هذه الاستراتيجية في الصناعة كمادة كيميائية أولية وكوقود لتوليد الحرارة عالية الجودة، لا سيما في تصنيع الألمنيوم. وبينما يُعتبر كلا الاستخدامين قابلين للتنفيذ من الناحية النظرية، فإن الاستخدام الثاني يشكل تحديًا تقنيًا أكبر ، إلا أن التحليل الكمي لتكاليف الاستثمار الذي سيتم التطرق إليه في الأقسام الفرعية التالية لا يشمل استخدام الهيدروجين لتوليد الحرارة عالية الجودة.

أما النهج الآخر، يتمثل في إدخال إنتاج الهيدروجين النظيف لاستخدامه في الصناعة المحلية بقدرة إضافية لتصدير الهيدروجين. نظرًا للدرجة العالية من عدم اليقين المرتبط بتجارة الهيدروجين العالمية، يمكن لقطر اتباع نهج حذر والشروع ببناء قدرة إنتاج الهيدروجين فقط عند تحقق الطلب الفعلي على الهيدروجين ومشتقاته. تُعرف هذه الاستراتيجية باسم مُصدِّر الهيدروجين الحذر. ورغم أن هذه الاستراتيجية تُعتبر آمنة نسبيًا، إلا أن تأخر قطر في دخول السوق العالمي للهيدروجين لن يمكنها من لعب دور في تشكيل السوق أو الاستحواذ على حصص السوق المتوقعة.

أخيرًا، يتمثل النهج الأكثر جرأة في الجمع بين توسيع تصنيع السلع النظيفة محليًا والريادة المبكرة في تطوير إنتاج الهيدروجين في الأسواق العالمية. تُسمى هذه الاستراتيجية المُصدّر الرئيسي للهيدروجين. في إطار هذه الاستراتيجية، يمكن لقطر السعي لتشكيل أسواق الهيدروجين المستقبلية والتأثير في تطوير معايير لا تضع الهيدروجين الأزرق في مرتبة أدنى من الأخضر. كما يمكنها أن تتولى القيادة في تطوير وتوسيع نطاق التقنيات الجديدة لإنتاج الهيدروجين من الغاز الطبيعي، خاصة تكنولوجيا التحلل الحراري للغاز الطبيعي. ستسنح الفرصة لقطر لتولي القيادة لتقنيتين تكميليتين وتعزيز موقعها بشكل أكبر في الصناعة في حال تم إنشاء بنية تحتية جديدة للإنتاج تعتمد على الإصلاح الحراري الذاتي مع احتجاز وتخزين الكربون، إلى جانب الريادة في تكنولوجيا التحلل الحراري للغاز الطبيعي. يوضح الشكل 3 نظرة عامة على الاستراتيجيات الأربع.

[5] يمكن الاطلاع على مناقشة أكثر تفصيلاً لهذا الخيار في الملحق الثاني.

تعريف الاستراتيجيات المحتملة

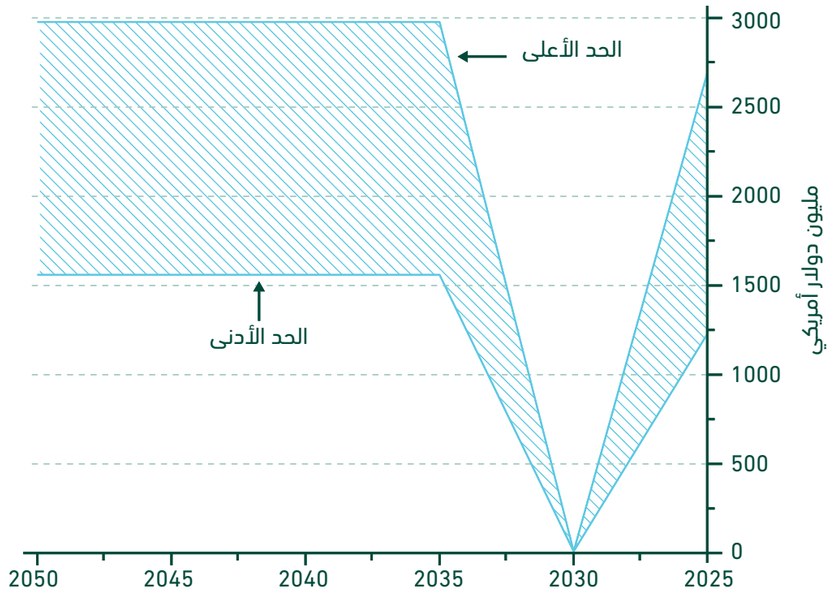


الشكل 3. الاستراتيجيات الرئيسية الأربع التي أُخذت في الاعتبار في الدراسة

الفرضية الأساسية التي تستند إليها الاستراتيجيات الأربع تفيد بأن البنية التحتية الحالية لإنتاج الغاز الطبيعي في قطر تتمتع بقدرة كافية، وستظل كذلك، لتلبية متطلبات أسواق الهيدروجين والغاز الطبيعي على حد سواء. هناك فرضية رئيسية أخرى تتمثل في أن تطوير سوق تصدير الهيدروجين العالمي لن يؤثر سلبًا على سوق الغاز الطبيعي المسال. جميع بيانات تكاليف التكنولوجيا والافتراضات المستخدمة في تحليل الاستراتيجيات الأربع متوفرة في الملحق الثالث.

5.2 الاستراتيجية 1: تنظيف الصناعة المحلية

تستثمر قطر، في إطار هذه الاستراتيجية، في تقليل انبعاثات الكربون في إنتاج الهيدروجين الحالي باستخدام تقنيات احتجاز وتخزين الكربون، مما يمثل انتقالًا من إنتاج الهيدروجين الرمادي إلى الأزرق. من المتوقع أن يستقر الطلب على الهيدروجين المستخدم في تكرير النفط وإنتاج الأمونيا والميثانول وصناعة الصلب عند المستوى الحالي البالغ 1.20 مليون طن سنويًا دون تغيير حتى عام 2050. تُوزَّع هذه الكمية تقريبًا بالشكل التالي: 0.23 مليون طن سنويًا لتكرير النفط، 0.68 مليون طن للأمونيا، 0.21 مليون طن للميثانول، و0.09 مليون طن لصناعة الصلب (انظر الجدول 1). يعني ذلك أن إجمالي الطلب على الغاز الطبيعي 5.40 مليار متر مكعب سنويًا، وهو ما يعادل أقل من 2% للغاز الطبيعي المسال الذي تخطط قطر إنتاجه. يبلغ إجمالي السعة المطلوبة لتقنيات التقاط الكربون وتخزينه 12.5 مليون طن سنويًا. يستلزم ذلك زيادة قدرة قطر للطاقة المستهدفة حاليًا فيما يتعلق بتقنيات التقاط الكربون وتخزينه، والبالغة 11 مليون طن سنويًا بحلول عام 2035، إلى أكثر من الضعف من أجل تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن عمليات إنتاج الغاز الطبيعي المسال. يشير ذلك إلى أن إنشاء بنية تحتية واسعة النطاق لتقنيات التقاط الكربون وتخزينه يُعتبر قرارًا حاسمًا يجب اتخاذه مبكرًا، حتى في ظل السيناريو الأكثر تحفظًا. إن القدرة اللازمة لإصلاح الميثان بالبخار موجودة بالفعل، وبالتالي فإن الاستثمار الأولي الوحيد المطلوب هو تعديلها باستخدام تقنيات التقاط الكربون وتخزينه. مع ذلك، يمكن أن تختلف تكلفة التعديل بشكل كبير بناءً على معدل التقاط ثاني أكسيد الكربون المطلوب. تتم عملية إصلاح الميثان بالبخار على مرحلتين: ينبعث 60% من ثاني أكسيد الكربون في المرحلة الأولى بتركيز عالي وبالتالي يسهل التقاطه؛ بينما ينبعث الجزء المتبقي من ثاني أكسيد الكربون في المرحلة الثانية بتركيز أقل مما يزيد من تكلفة إزالته. تماشيًا مع أحدث المعايير الدولية، يتم إجراء الحسابات بناءً على معدل احتجاز ثاني أكسيد الكربون بنسبة 90%. فعند انتهاء العمر التشغيلي للمحطات الحالية لإصلاح الميثان بالبخار سيتم استبدالها بمحطات إصلاح ذاتي، وذلك لما تتمتع به من مزايا عند دمجها مع تقنيات التقاط الكربون وتخزينه. تتميز تقنية الإصلاح الذاتي بتكلفة رأسمالية أعلى مقارنةً بتقنية الإصلاح بالبخار. مع ذلك، عند احتساب التكلفة الإجمالية بما في ذلك تقنيات التقاط الكربون وتخزينه، تصبح التكلفة الرأسمالية الإجمالية للإصلاح الذاتي أقل مقارنةً بالإصلاح بالبخار. كما أن تقنية الإصلاح الذاتي تتطلب كمية أقل من الغاز الطبيعي لكل وحدة من الهيدروجين المنتج وتنتج كمية أقل نسبيًا من ثاني أكسيد الكربون مقارنة بتقنية الإصلاح بالبخار. يوضح الشكل 4 مواصفات الاستثمار الرأسمالي السنوي لهذه الاستراتيجية من 2025 إلى 2050، حيث تعتمد القيم العليا والدنيا على نطاقات تكاليف التكنولوجيا المبينة في الجدول 5 بالملحق الثالث. في البداية، يتطلب الأمر استثمارًا كبيرًا يصل إلى 2.5 مليار دولار أمريكي سنويًا لتحديث قدرة محطات الإصلاح بالبخار الحالية باستخدام تقنيات التقاط الكربون وتخزينه. لن تكون هناك حاجة لاستثمارات كبيرة حتى بعد عام 2030، عندما تصل بعض منشآت الإصلاح بالبخار المعدلة إلى نهاية عمرها التشغيلي ويتم استبدالها بمحطات الإصلاح الذاتي. تفترض هذه التقديرات أن مرافق الإصلاح بالبخار المعدلة ستتوقف عن العمل بشكل تدريجي وخطي، مما يؤدي إلى استقرار النفقات الرأسمالية بين عامي 2035 و2050.



الشكل 4. النفقات الرأسمالية المطلوبة لتطوير بنية تحتية لإنتاج الهيدروجين وتوزيعه في الاستراتيجية 1؛ حيث تعكس القيم العليا والدنيا نطاق تكاليف الاستثمار التكنولوجي المدروسة.

5.3 الاستراتيجية 2: التوسع في الصناعة النظيفة

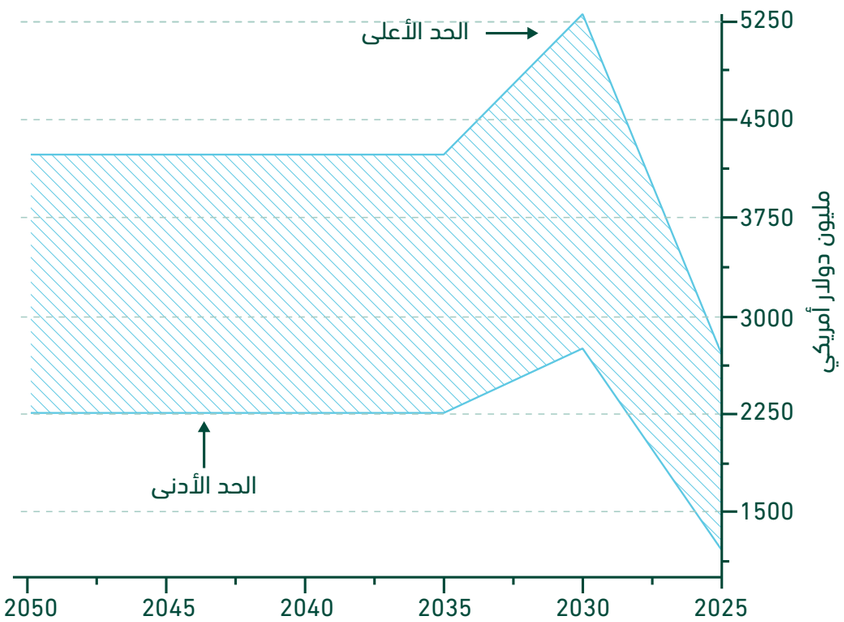
تتضمن الاستراتيجية الثانية إزالة الكربون من إنتاج الهيدروجين الحالي لاستخدامه في تكرير النفط وفي تصنيع الأمونيا والميثانول والصلب، بالإضافة إلى توسيع إنتاج هذه السلع. تعتمد هذه الاستراتيجية على الميزة التنافسية لقطر في إنتاج الغاز الطبيعي منخفض التكلفة والقدرة على احتجاز وتخزين الكربون، مما يخلق ظروفًا مواتية لإنتاج الأمونيا النظيفة والميثانول والصلب منخفض الكربون للتصدير الدولي. تفترض التحليلات في هذه الاستراتيجية أن الأمونيا والميثانول سيباعان في السوق كمواد للأسمدة والكيماويات، بدلاً من بيعهما كوقود، بما أن السوق لم يُطوَّر لهذا الغرض بعد. يؤخذ في الاعتبار استخدام الأمونيا كوقود ضمن الاستراتيجيات 3 و4. من المحتمل أن تنمو أسواق السلع والوقود النظيف بمعدلات متفاوتة، حيث تتأثر بمستويات مختلفة من عدم اليقين، مما قد يستدعي تبني استراتيجيات متنوعة.

تفترض هذه الاستراتيجية أن المحطات الحالية لإصلاح الميثان بالبخار تعمل بكامل طاقتها، وبناءً على ذلك، مع التوسع التدريجي في قدرة إنتاج الأمونيا والميثانول والصلب، ستتم إضافة قدرة جديدة لإنتاج الهيدروجين باستخدام تقنية احتجاز وتخزين الكربون. تفترض التحليلات أيضًا توسيع قدرة الإنتاج بنسبة 50% في الوقت الحالي حتى عام 2030، ثم زيادة أخرى بنسبة 50% من عام 2030 حتى عام 2050.

كما يُفترض أن يظل الطلب على الهيدروجين من تكرير النفط ثابتًا. بالمقارنة مع الاستراتيجية 1، ينمو الطلب على الهيدروجين بشكل كبير، حيث يبدأ من 1.79 مليون طن سنويًا ويزداد إلى 2.67 مليون طن سنويًا في عام 2050. يصل الطلب على الغاز الطبيعي إلى 10.23 مليار متر مكعب سنويًا في عام 2050، وهو ما يعادل حوالي 5% من إنتاج الغاز الطبيعي المسال الذي تخطط له قطر. ترتفع في هذه الاستراتيجية قدرة احتجاز وتخزين الكربون المطلوبة إلى 26 مليون طن سنويًا في عام 2050.

يتسم رأس المال اللازم لهذه الاستراتيجية بمواصفات مختلفة مقارنة بالاستراتيجية 1.

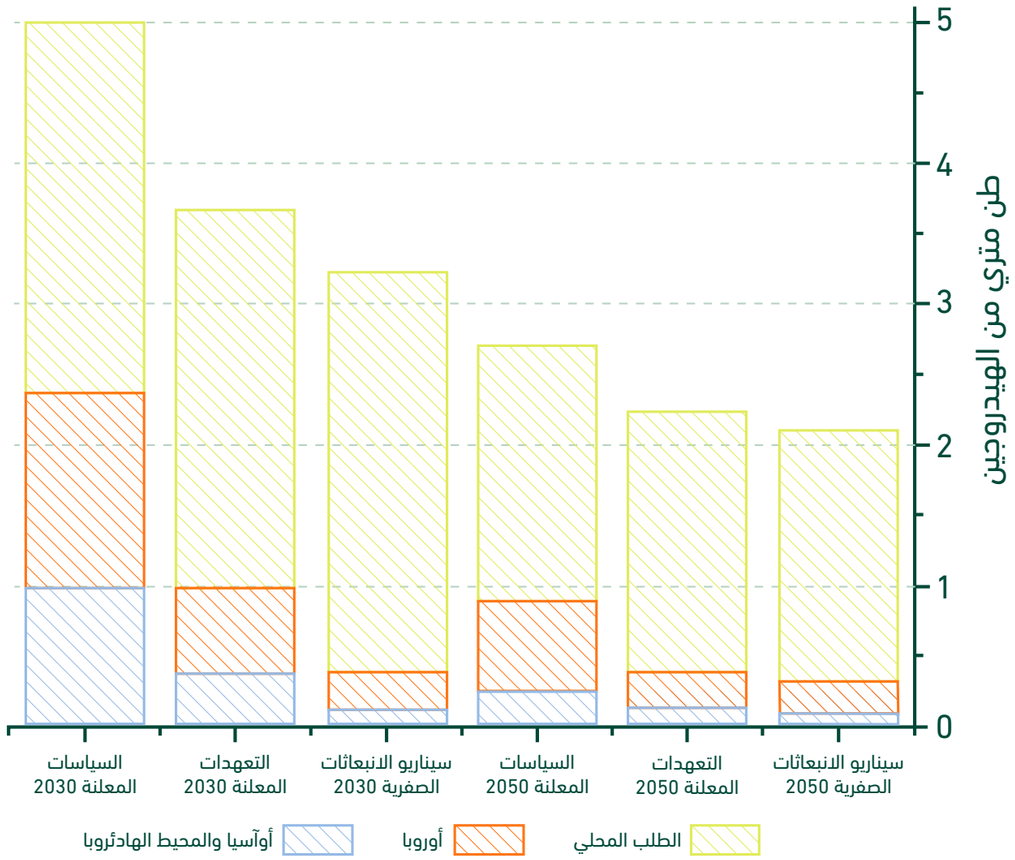
يبدأ رأس المال في الاستراتيجية 2 من نفس المستوى في عام 2025 ثم يشهد زيادة تدريجية حتى عام 2030 نتيجة لتكلفة بناء قدرة جديدة لإنتاج الهيدروجين باستخدام تقنية محطات الإصلاح الذاتي واحتجاز وتخزين الكربون بهدف توسيع قدرة إنتاج الأمونيا والميثانول والصلب. يصبح رأس المال السنوي ثابتًا اعتبارًا من عام 2035، مدفوعًا بنمو السوق بشكل خطي واستبدال محطات إصلاح الميثان بالبخار التي تصل إلى نهاية عمرها الافتراضي.



الشكل 5. رأس المال المطلوب لإنشاء بنية تحتية لإنتاج وتوزيع الهيدروجين في الاستراتيجية 2؛ بحيث تعكس الحدود العليا والدنيا نطاق التكاليف المتوقعة للاستثمار التكنولوجي

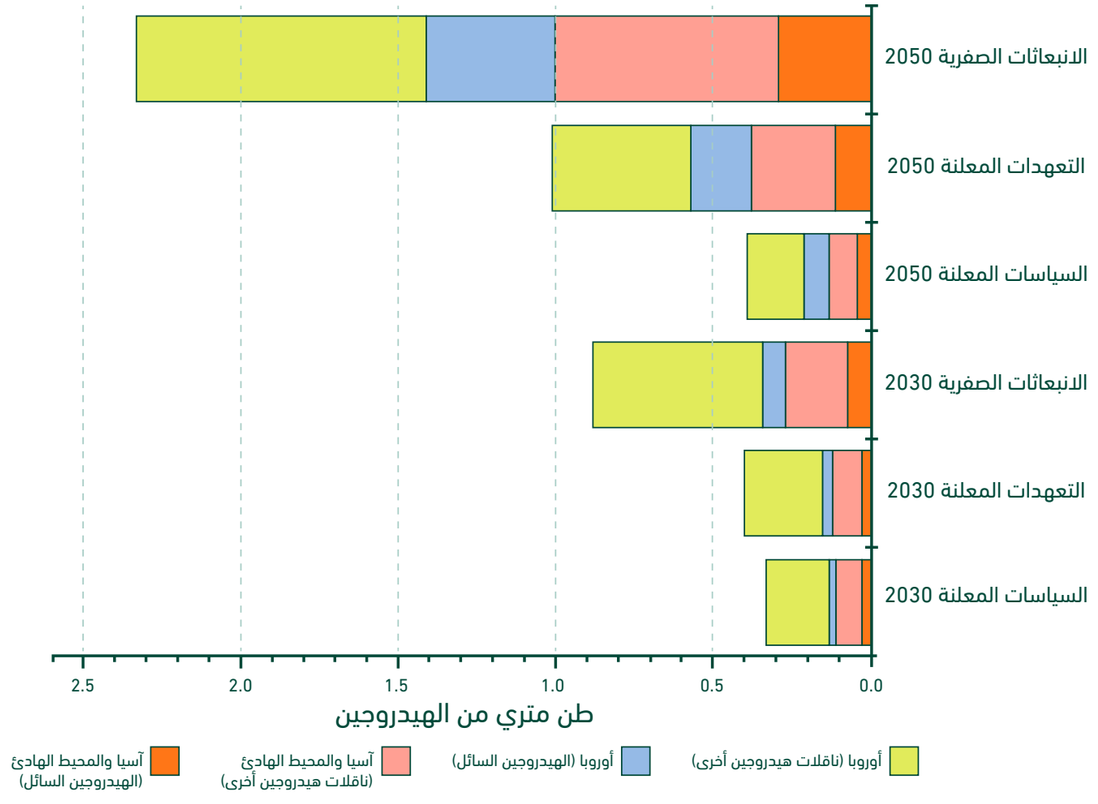
5.4 الاستراتيجية 3: المُصدِّر الحذر للهيدروجين

تتضمن هذه الاستراتيجية توسيع إنتاج الهيدروجين النظيف لتلبية الطلب الإضافي الناتج عن توسيع إنتاج الأمونيا والميثانول والصلب، وبناء قدرة إنتاجية جديدة لصادرات الهيدروجين النظيف كوقود سواء في شكل الهيدروجين النقي أو أحد مشتقاته. ستتبع قطر في هذه الاستراتيجية نهجًا حذرًا ولا تستثمر في قدرة التصدير اللازمة إلا بعد أن يتم تأسيس السوق. سيترتب على ذلك الحصول على حصة سوق محدودة نسبيًا لأن اللاعبين الآخرين، لا سيما من الرواد في إنتاج الهيدروجين الأخضر أو الأزرق، سيكونون قد رسخوا مكانتهم بالفعل في السوق. تفترض هذه الاستراتيجية أن قطر ستكتسب حصة في السوق الدولي للهيدروجين النظيف تعادل 25% من حصتها الحالية في سوق الغاز الطبيعي المسال. يعتمد معدل نمو سوق الهيدروجين على السيناريوهات المتبناة، لذلك يتم تحديد معدلات بناء إنتاج الهيدروجين المختلفة بناءً على كل من سيناريوهات الوكالة الدولية للطاقة التي تم مناقشتها في القسم 2. تُستعرض هذه السيناريوهات في الشكل رقم 6. كما يُظهِر الشكل توزيع كمية الهيدروجين المنتج للصناعة المحلية والهيدروجين المُورَّد إلى أوروبا وآسيا على التوالي. في جميع الحالات باستثناء سيناريو الانبعاثات الصفرية، سيكون معظم الهيدروجين النظيف المنتج في قطر موجهًا إلى الصناعة المحلية.



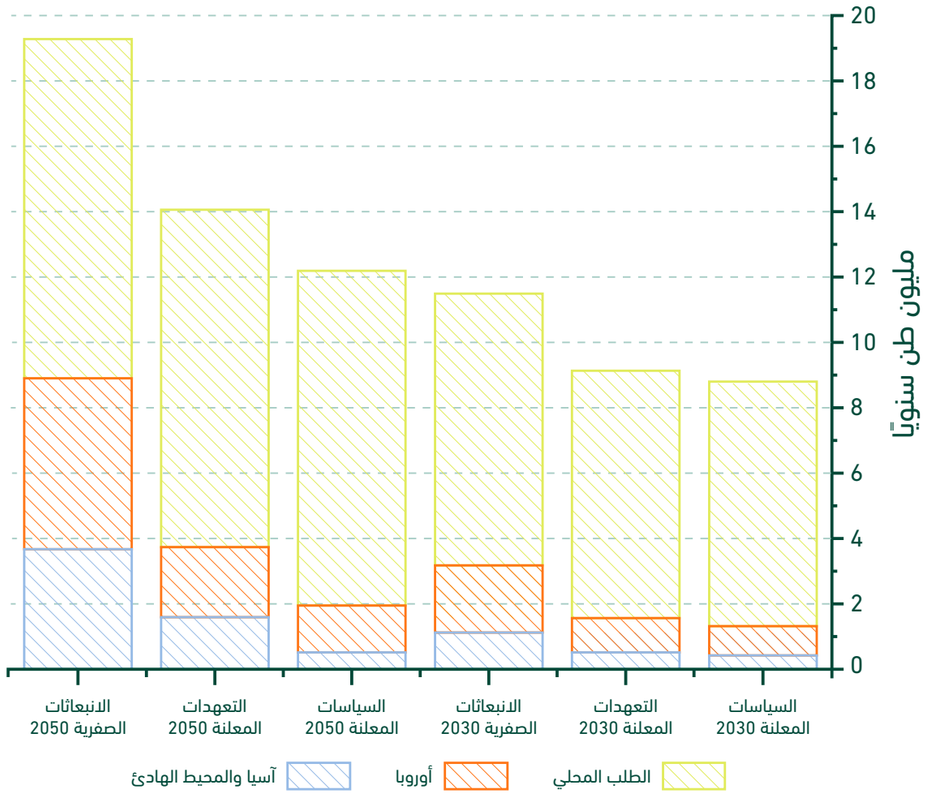
الشكل 6. زيادة إنتاج الهيدروجين في الاستراتيجية 3 بناءً على سيناريوهات مختلفة لسوق الهيدروجين الدولي

استنادًا إلى تحليل السياسات الحالية للدول التي تعتمد على الاستيراد، يتم تقدير الطلب المستقبلي المحتمل على الهيدروجين عبر مختلف القطاعات، حيث تتفاوت متطلبات النقاء لكل منها. يحتاج قطاع النقل البري بشكل خاص إلى هيدروجين ذو نقاء عالي، حيث تكون صادرات الهيدروجين لهذا الغرض في شكل سائل مبرد. يوضح الشكل 7 حصة الهيدروجين السائل وحاملات الهيدروجين الأخرى – مثل ناقلات الهيدروجين السائل العضوي والأمونيا – في أسواق التصدير وفقًا لكل من سيناريوهات الوكالة الدولية للطاقة. تعد الحاجة إلى بنية تحتية للهيدروجين السائل عالي التكلفة معتدلة نسبيًا، حيث يتم تصدير معظم كميات الهيدروجين كناقلات للهيدروجين السائل العضوي أو الأمونيا.

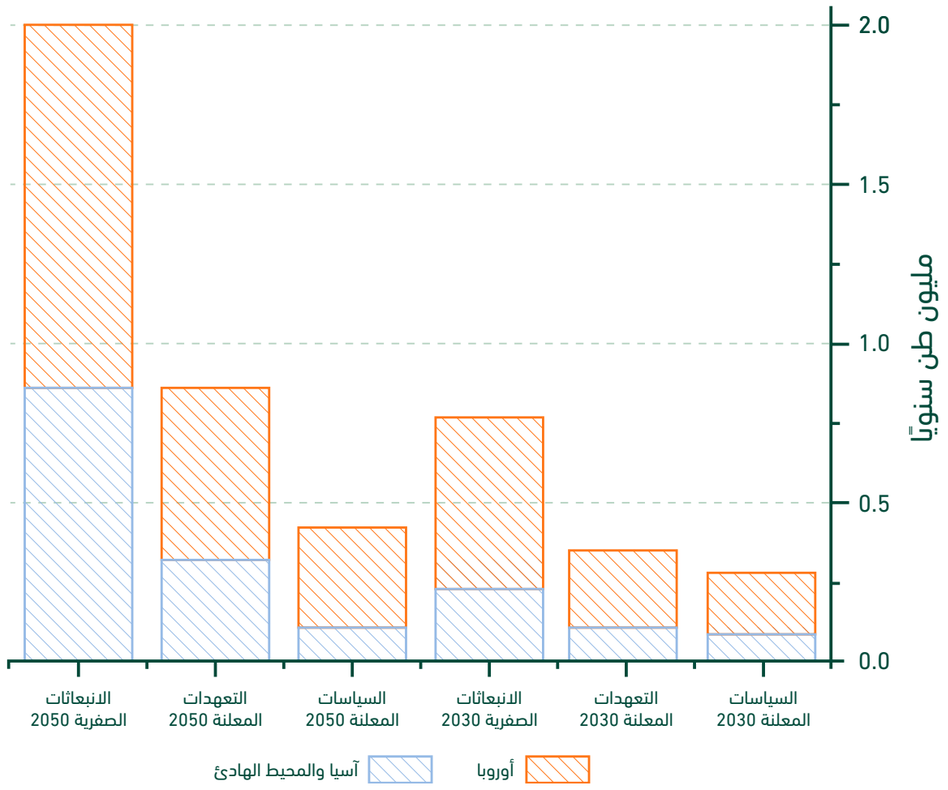


الشكل 7. توزيع إنتاج الهيدروجين للتصدير حسب الوجهة ونوع الناقل المستخدم في الاستراتيجية 3

يظهر الشكل 8 كميات الغاز الطبيعي المطلوبة لإنتاج الهيدروجين للاستخدام المحلي والتصدير وفقًا لسيناريوهات نمو السوق الدولية المختلفة. أما بالنسبة لسيناريو الانبعاثات الصفرية، سيكون من الضروري استخدام حوالي 19 مليار متر مكعب من الغاز الطبيعي بحلول عام 2050، وهو ما يعادل حوالي 9% من إنتاج قطر المخطط له من الغاز الطبيعي المسال. علاوة على ذلك، سيتم استهلاك ما يصل إلى 2 مليون طن متري إضافية من الغاز الطبيعي لعملية تسييل الهيدروجين في عام 2050 حسب سيناريو الانبعاثات الصفرية (انظر الشكل 9).



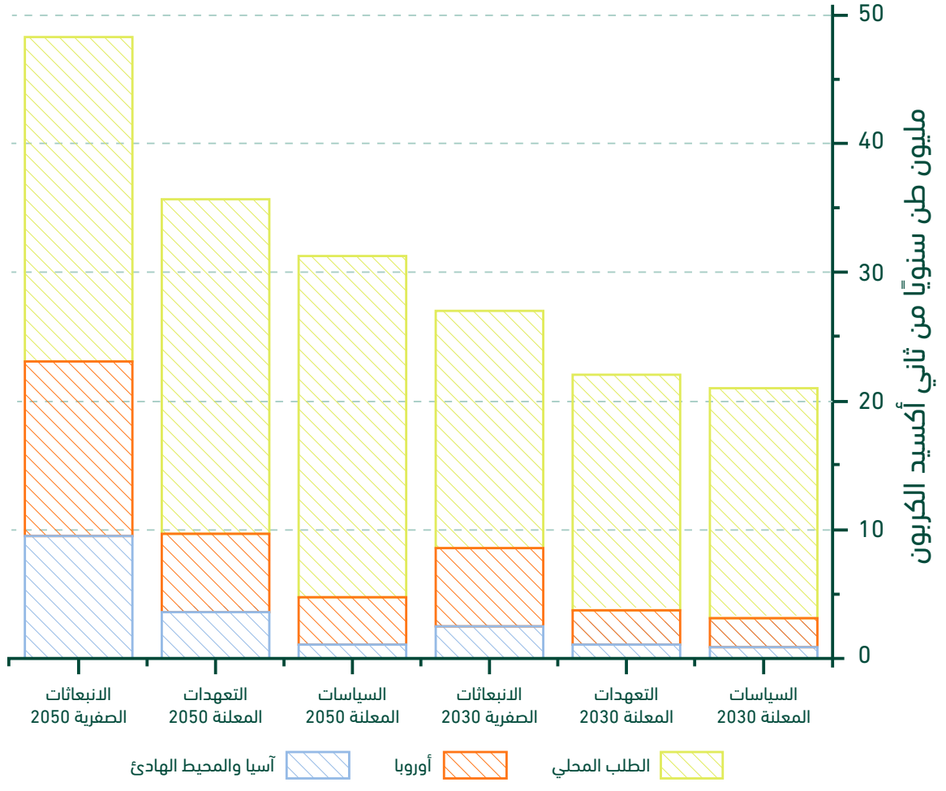
الشكل 8. كميات الغاز الطبيعي المطلوبة لإنتاج الهيدروجين للاستخدام المحلي والتصدير وفقًا لسيناريوهات سوق الهيدروجين الدولي المختلفة (الاستراتيجية 3).



الشكل 9. كميات الغاز الطبيعي المطلوبة لعملية تسييل الهيدروجين فقط، حسب الوجهة ووفقًا لسيناريوهات سوق الهيدروجين الدولي المختلفة (الاستراتيجية 3)

تبدأ قدرة احتجاز وتخزين الكربون المرتبطة بحجم إنتاج الهيدروجين في الشكل 6 من 21 مليون طن متري سنويًا على الأقل بحلول عام 2030.

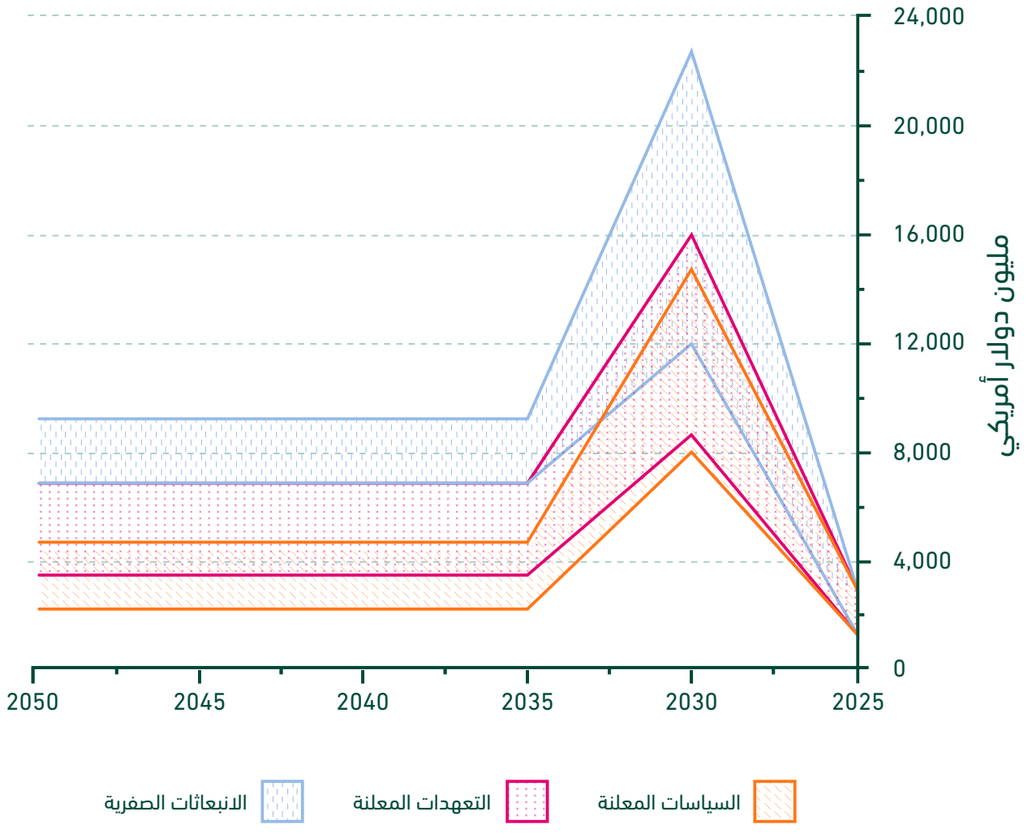
وفي سيناريو الطلب الأعلى، تصل إلى 48 مليون طن متري سنويًا، مما يتطلب توسعًا سريعًا في بنية احتجاز وتخزين الكربون (انظر الشكل 10).



الشكل 10. قدرة احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون المرتبطة بحجم إنتاج الهيدروجين وفقًا للاستراتيجية 3

الاستراتيجية 3: المُصدِّر الحذر للهيدروجين

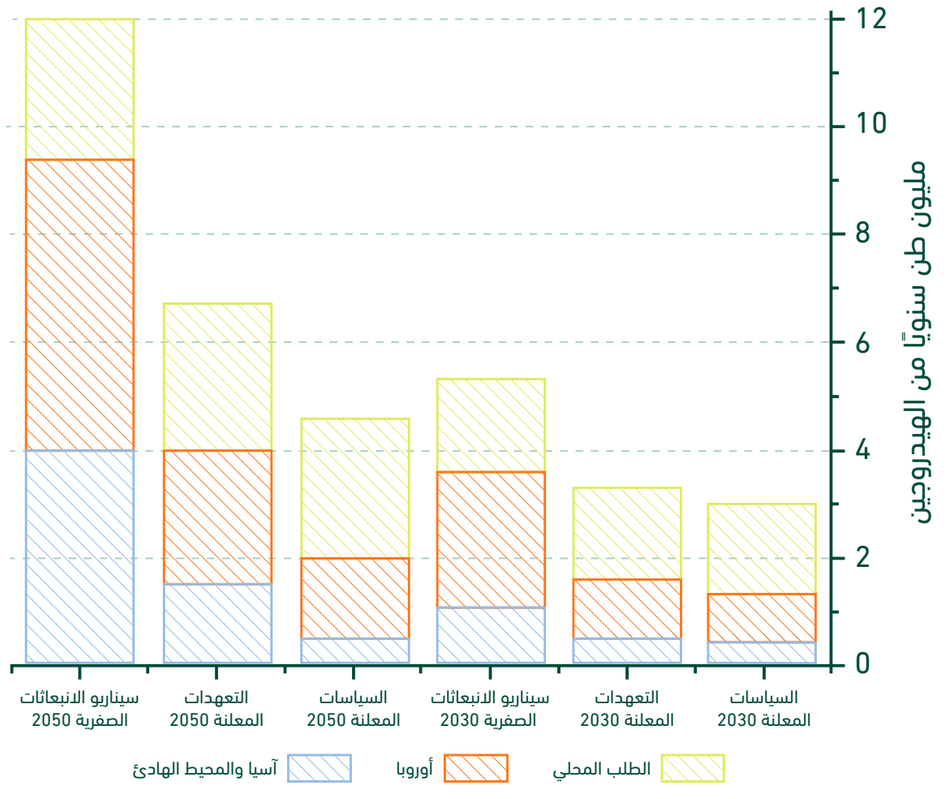
مواصفات رأس المال الاستثماري للاستراتيجية 3 مشابه نوعيًا للاستراتيجية 2 (انظر الشكل 11). مع ذلك، فهو أعلى بشكل كبير بسبب ارتفاع التكلفة الرأسمالية لمصانع تسييل الهيدروجين، وحاويات التبريد الهيدروجيني، وبدرجة أقل، بسبب البنية التحتية لناقلات الهيدروجين العضوي السائل والأمونيا.



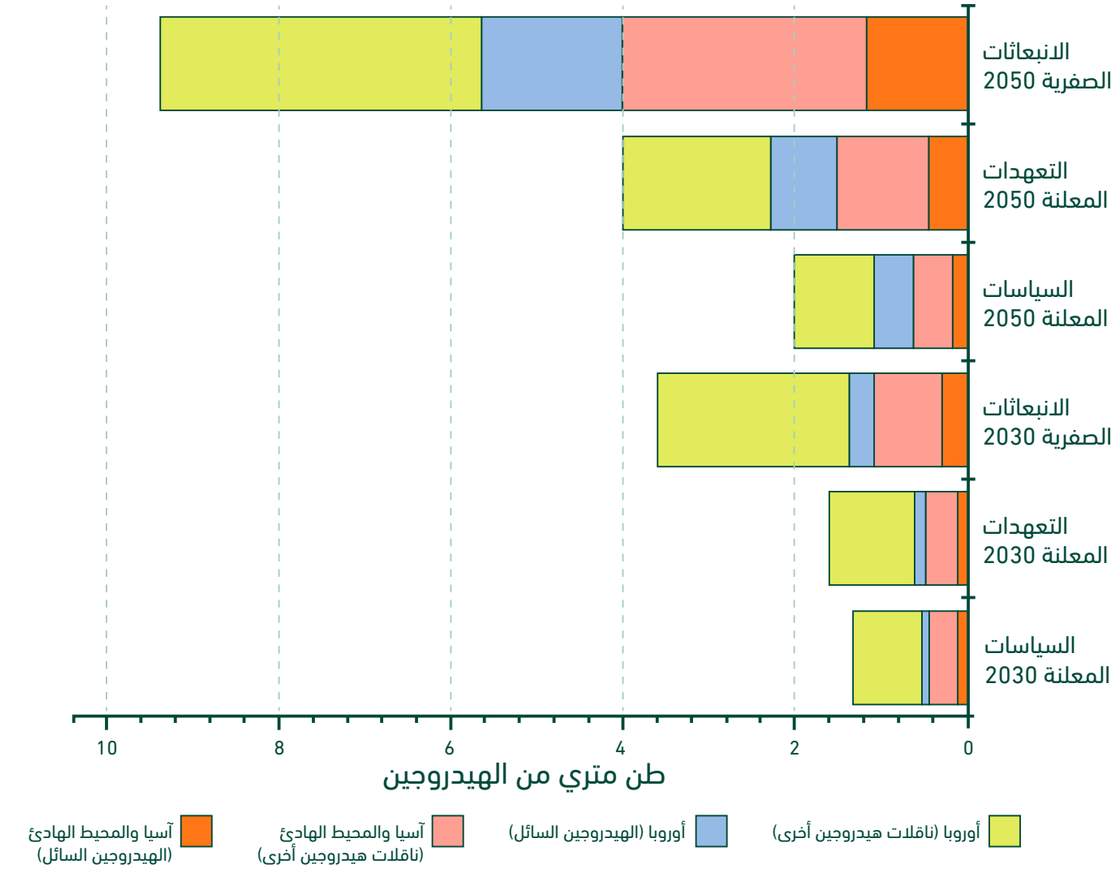
الشكل 11. رأس المال الاستثماري المطلوب لإنشاء البنية التحتية لإنتاج وتوصيل الهيدروجين وفقًا للاستراتيجية 3؛ حيث تعكس الحدود العليا والدنيا نطاق التكاليف المتوقعة في الاستثمار التكنولوجي.

5.5 الاستراتيجية 4: مُصدِّر رئيسي للهيدروجين

وفقًا لهذه الاستراتيجية، توسع قطر إنتاجها من السلع النظيفة (الأمونيا، الميثانول، والصلب) وتعتمد استراتيجية أكثر جرأة في سوق الهيدروجين الدولي. تهدف قطر هنا إلى تحقيق حصة في سوق الهيدروجين العالمي كالتي تمتلكها في سوق الغاز الطبيعي العالمي حاليًا، وهي (10.47%). يُفترض أن توزع حصة قطر في سوق الهيدروجين بالتساوي بين آسيا (اليابان وكوريا الجنوبية) وأوروبا. تم توثيق حجم إنتاج الهيدروجين النظيف المرتبطة بهذه الاستراتيجية في الشكل 12. في معظم السيناريوهات، يكون حجم الهيدروجين النظيف المنتج للتصدير أكبر من ذلك المخصص للصناعة المحلية. يوضح الشكل 13 توزيع تسليم الهيدروجين السائل مقابل الأنماط الأخرى (ناقلات الهيدروجين السائل العضوي، الأمونيا) بحسب السيناريوهات الثلاثة للوكالة الدولية للطاقة. بناءً على تلك السيناريوهات، فإن الهيدروجين السائل هو الشكل المطلوب لحوالي 15% من الهيدروجين المصدر بحلول عام 2030، و30% من الهيدروجين المصدر بحلول عام 2050.



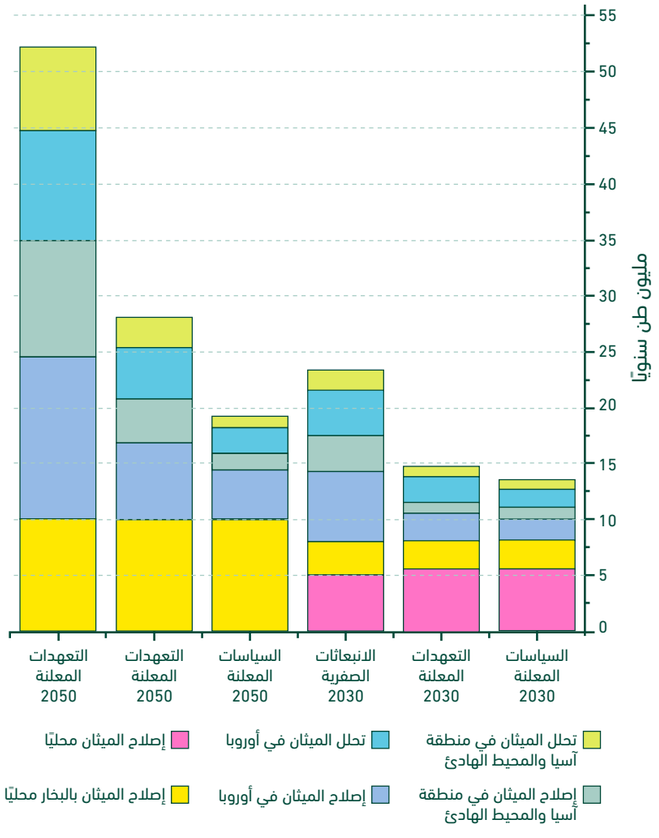
الشكل 12. زيادة إنتاج الهيدروجين وفقًا لاستراتيجية 4 بناءً على سيناريوهات مختلفة لسوق الهيدروجين الدولي



الشكل 13. توزيع إنتاج الهيدروجين للتصدير حسب الوجهة ونوع الناقل وفقًا للاستراتيجية 4

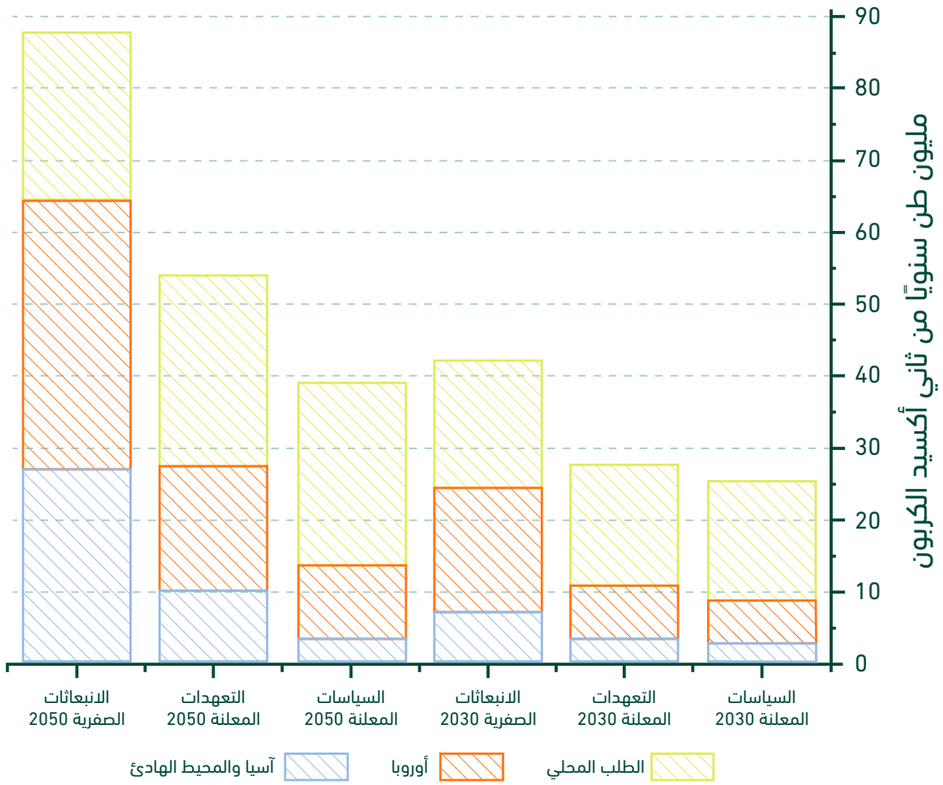
تفترض هذه الاستراتيجية أن قطر ستتبنى تقنيات متعددة لإنتاج الهيدروجين وستستثمر في تطوير وتوسيع تقنية تحلل الميثان. تعتبر هذه التقنية مهمة لأنها تتيح إنتاج الهيدروجين النظيف من الغاز الطبيعي في المناطق التي لا تتوفر فيها القدرة على احتجاز وتخزين الكربون، حيث يكون المنتج الثانوي للعملية مادة صلبة (مثل الكربون الأسود أو الجرافين أو مواد كربونية أخرى) بدلاً من غاز (ثاني أكسيد الكربون). بالتالي، يمكن استخدام تقنية تحلل الميثان بالقرب من نقطة الاستخدام النهائي للهيدروجين مما يتيح لقطر الاستمرار في تصدير الغاز الطبيعي المسال إلى الدول التي يوجد فيها طلب على الهيدروجين بدلاً من شحنه. على الرغم من ذلك، إذا حَلَّت تقنية التحلل الحراري للميثان مكان الإصلاح بشكل كامل، فمن المرجح أن تتجاوز كمية الكربون الصلب المُنتَجة الطلب. لذلك، يمكن من حيث المبدأ استخدام كل من إصلاح الميثان مع التحلل الحراري في آن واحد. يُفترض أن تبدأ قطر باستخدام تحلل الميثان محليًا ثم تستثمر لاحقًا في المصانع خارج الدولة من أجل توسيع نطاق استخدامه. بسبب حالة عدم اليقين حول الجداول الزمنية لتطوير التقنية وتوسيعها تجاريًا وحجم سوق الكربون الصلب، فإن اتباع استراتيجية الإصلاح والتحلل في وقت واحد قد يكون مفيدًا لدور قطر في السوق الدولي للهيدروجين النظيف. لهذا السبب، تفترض هذه الاستراتيجية أن 30% من القدرة التي سيتم استخدامها ستخصص لتحلل الميثان، بينما ستخصص النسبة المتبقية لتقنية الإصلاح الحراري الذاتي واحتجاز وتخزين الكربون.

لإنتاج هذه الكميات من الهيدروجين النظيف، قد يصل حجم الغاز الطبيعي المطلوب إلى 52 مليار متر مكعب سنويًا ، وهو ما يعادل حوالي 25% من الإنتاج المخطط للغاز الطبيعي المسال (انظر الشكل 14).



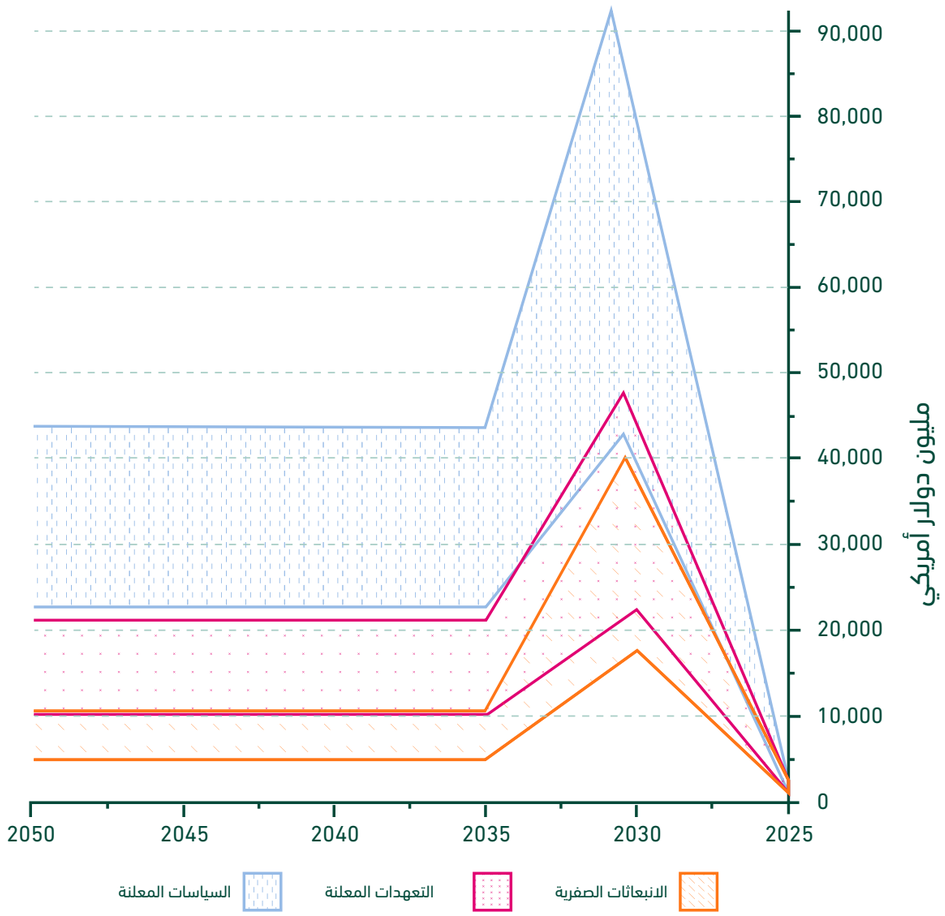
الشكل 14. حجم الغاز الطبيعي المطلوب لإنتاج الهيدروجين للاستخدام المحلي والتصدير وفقًا للسيناريوهات المختلفة للسوق الدولية للهيدروجين (الاستراتيجية 4)

يُظهر الشكل 15 كيفية مساهمة إدخال التحلل الحراري في تقليل الحاجة إلى تقنيات احتجاز وتخزين الكربون بشكل عام: مقارنة بالاستراتيجية 3، فإن متطلبات هذه التقنيات في عام 2050 ضمن سيناريو صافي الانبعاثات الصفرية ترتفع بمقدار 1.24 مرة، بينما يزيد إنتاج الهيدروجين بمقدار 2.4 مرة.



الشكل 15. قدرة احتجاز وتخزين الكربون المرتبطة بحجم إنتاج الهيدروجين وفقًا للاستراتيجية 4

تتشابه مواصفات رأس المال الاستثماري مع ما ورد في الاستراتيجيتين 2 و3، ولكنه يرتفع بشكل ملحوظ (انظر الشكل 16). يعود هذا الارتفاع إلى عاملين رئيسيين: أ) الحاجة إلى قدرة إضافية لتسييل الهيدروجين وحاويات تبريد الهيدروجين المطلوبة مقارنة بالاستراتيجية 3؛ ب) وجود قدرة كبيرة على تحلل الميثان بالحرارة التي تتميز على المدى القصير بتكاليف رأسمالية أعلى بكثير مقارنة بالبنية التحتية لإصلاح الميثان.



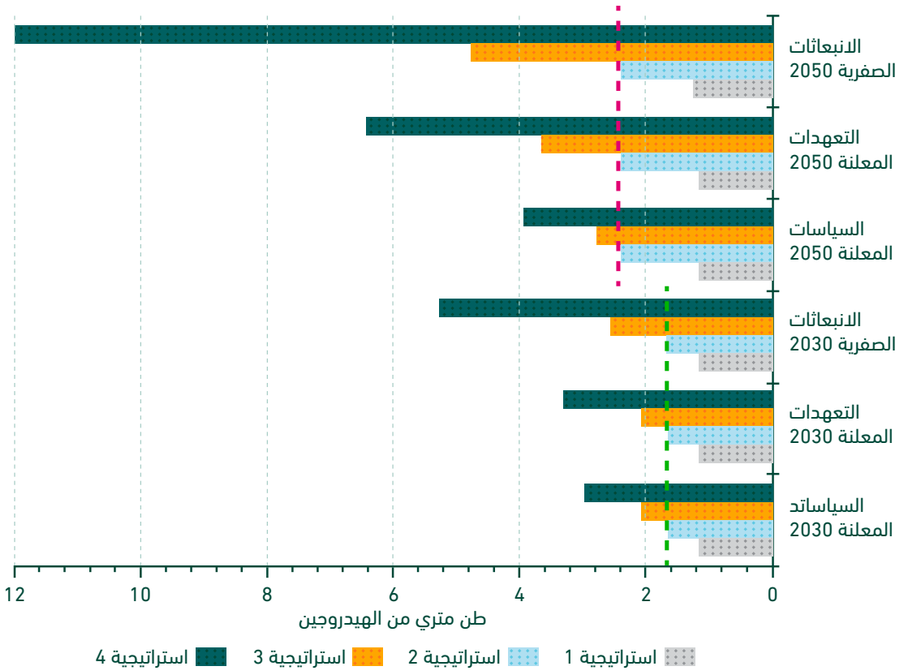
الشكل 16. التكاليف الرأسمالية اللازمة لإنشاء البنية التحتية لإنتاج وتوصيل الهيدروجين ضمن الاستراتيجية 4؛ توضح الحدود العليا والدنيا التكاليف المتوقعة للاستثمارات التقنية

06

مناقشة

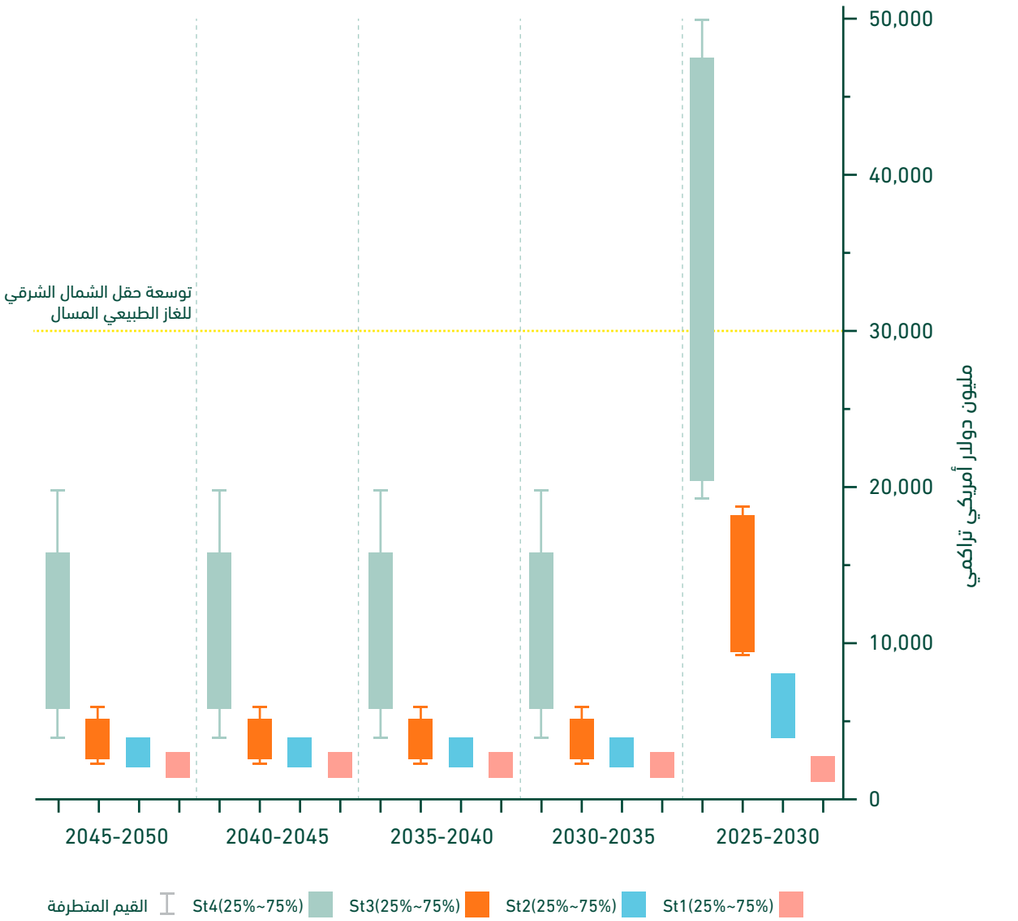
مناقشة

يستعرض التحليل الوارد في القسم الخامس تأثير الاستراتيجيات الأربع على البنية التحتية اللازمة لإنتاج ونقل الهيدروجين، وحجم الغاز الطبيعي المطلوب، وقدرة احتجاز وتخزين الكربون، بالإضافة إلى النفقات الرأسمالية السنوية المصاحبة. بعد مناقشة كل استراتيجية على حدة، يهدف هذا القسم إلى مقارنة الاستراتيجيات المختلفة لاستخلاص رؤى حول المخاطر النسبية، ومستويات عدم اليقين، والقرارات الحاسمة المحتملة. كما سيتم استخدام استراتيجية الهيدروجين لدولة الإمارات لعام 2023 كمرجع إقليمي للمقارنة.
يتم تعريف خطر الاستثمار بشكل عام على أنه احتمال تكبد خسائر أو عدم تحقيق العوائد المتوقعة. يرتفع مستوى الخطر مع زيادة حجم الاستثمار وزيادة حالة عدم اليقين بشأن عوائده. يعتبر الاستثمار في توسيع قدرة الغاز الطبيعي المسال ذو أخطار منخفضة بالنسبة لقطر على المدى القصير إلى المتوسط، بما أن التكنولوجيا والسوق قد بلغتا مرحلة النضج. بالمقارنة، ينطوي الاستثمار في إنتاج السلع النظيفة على أخطار أعلى: فبالرغم من وجود سوق مستقر للسلع التقليدية، فإن التكنولوجيا والسوق للسلع النظيفة لا يزالان في مرحلة التطوير. يعد الاستثمار في إنتاج الهيدروجين النظيف للتصدير كناقل للطاقة أكثر خطورة. فلا يزال الهيدروجين النظيف صناعة ناشئة، والتقنيات اللازمة لإنتاجه ونقله واستخدامه ما زالت قيد التطوير.
بناء على ذلك، تتفاوت مستويات المخاطر في الاستراتيجيات الأربع التي تم تحليلها، حيث تزداد حالة عدم اليقين التكنولوجي والسوقي وحجم الاستثمار تدريجيًا من الاستراتيجية 1 إلى 4. يوضح الشكل 17 حجم إنتاج الهيدروجين المطلوب لكل استراتيجية، استنادًا إلى السيناريوهات الثلاثة للوكالة الدولية للطاقة (انظر القسم 3.1). تسعى دولة الإمارات لأن تصبح رائدّة في إنتاج الهيدروجين النظيف، حيث تحدد استراتيجيتها إنتاج 1.4 مليون طن متري سنويًا من الهيدروجين النظيف كحد أدنى لتحقيق هذا الهدف بحلول عام 0302. يمكن لقطر تحقيق مستويات إنتاج مماثلة من خلال اعتماد الاستراتيجية 2 التي تتميز بمخاطر منخفضة نسبيًا. ومع ذلك، من المتوقع أن تشهد أسواق الهيدروجين الدولية نموًا بعد عام 2030، لذا سيتوجب على قطر اتخاذ قرار بشأن الحصة التي تخطط للاستحواذ عليها.



الشكل 17. كميات إنتاج الهيدروجين في قطر لكل من الاستراتيجيات الأربع التي تم دراستها؛ تشمل هذه الكميات كل من الطلب المحلي وحجم التصدير، حيث يعتمد حجم التصدير على توقعات السوق المقدمة من الوكالة الدولية للطاقة.

يوضح الشكل 18 تكاليف الاستثمار التراكمية لكل استراتيجية على فترات زمنية مدتها 5 سنوات (تمثل أعمدة الخطأ حالات عدم اليقين في تكاليف التكنولوجيا وكذلك في الطلب على الهيدروجين النظيف للتصدير، لقد قلصناها في هذه الحالة من خلال استثناء سيناريو صافي الانبعاثات الصفرية). يزداد كل من حجم الاستثمار المطلوب وحالة عدم اليقين المحيطة به بشكل سريع من الاستراتيجية 1 إلى 4. باستثناء الاستراتيجية 1، يتطلب الالتزام بأي من الاستراتيجيات الأربع استثمارًا أكبر في فترة الخمس سنوات الأولى مقارنة بالفترات التالية. لتوضيح ذلك، يقدر حجم الاستثمار الأولي المطلوب للاستراتيجية 4 بحوالي 30 مليار دولار أمريكي على مدار 5 سنوات، وهو ما يعادل توسعة إنتاج الغاز الطبيعي المسال في حقل الشمال الشرقي من 77 مليون طن متري سنويًا إلى 142 مليون طن متري سنويًا. يشير ذلك إلى مستوى المخاطر المرتبطة بالاستراتيجية 4.



الشكل 18. التقدير التراكمي للنفقات الرأسمالية لكل استراتيجية تم تحليلها، مقارنة بتوسعة حقل الشمال الشرقي للغاز الطبيعي المسال. يُمثّل كل قسم فترة زمنية ونطاق النفقات الرأسمالية المرتبطة بها (بناءً على سيناريوهات السياسات المعلنة والالتزامات المقررة) خلال تلك الفترة.

تتماشى استراتيجية الهيدروجين في الإمارات بشكل كبير مع الاستراتيجية 3. يتمثل الاختلاف الرئيسي في أن الإمارات تستهدف زيادة استخدام الهيدروجين النظيف محليًا بخمسة أضعاف بحلول عام 2050، بينما في الاستراتيجية 3، تقتصر الزيادة على الضعف فقط. يرتبط النمو الأكبر في استراتيجية الإمارات باستخدام الهيدروجين النظيف كمواد أولية للوقود المستدام في قطاعات الشحن والطيران والنقل البري. على الرغم من أن ذلك قد يكون ذا صلة بقطر، إلا أن هذه القطاعات لم تُؤخذ في الحسبان لأنها أقل تطورًا وتتأثر بدرجة كبيرة بعدم اليقين.. تعتبر الإمارات سوق السلع النظيفة فرصة رئيسية بمستويات أخطار مقبولة، مما يبرر اتباع استراتيجية التوسع السريع في الإنتاج المحلي. من ناحية أخرى، ترى استراتيجية الإمارات أن السوق الدولية للهيدروجين النظيف يتخلله الكثير من عدم اليقين، وبالتالي، ورغم اتخاذها الخطوات اللازمة للدخول فيه إلا أنها لا تخطط للانخراط فيه بشكل قوي كما في الاستراتيجية 4. يرتبط هذا الاستثمار الأولي الكبير في ثلاث من الاستراتيجيات الأربع بتكاليف عالية للتقنيات التي لا تزال قيد التطوير. ستتحمل أي جهة تتخذ خطوة رائدة في سوق الهيدروجين النظيف هذه التكاليف. ستتطلب القرارات الأولية المرتبطة بتطوير صناعة الهيدروجين النظيف من قطر الالتزام باستراتيجية معينة. قد يكون من الصعب التحول إلى استراتيجية مختلفة في وقت لاحق بسبب عدة عوامل، بما في ذلك:

- **السياسة:** يتطلب تطوير الصناعة الوطنية للهيدروجين النظيف وضع إطار سياساتي مناسب يشمل جانب العرض والطلب على حد سواء؛ إذ أن استبعاد الهيدروجين النظيف من السياسات البيئية والطاقة الجاري تطويرها حاليًا قد يؤدي إلى تأخيرات طويلة في المستقبل، مما قد يفضي إلى استبعاد الهيدروجين تمامًا.
- **الفترة الزمنية لإنشاء البنية التحتية:** يتطلب التخطيط للبنية التحتية للهيدروجين النظيف، وتأمين التصاريح اللازمة والاستثمارات، وشراء المعدات وبناء البنية التحتية عدة سنوات.
- **تخصيص الموارد:** يُفترض أن يتطور كل من الهيدروجين النظيف والغاز الطبيعي المسال في قطر بشكل مستقل عن بعضهما. مع ذلك، قد تضطر هذه المشاريع وغيرها من المشاريع الصناعية المحتملة إلى التنافس على الموارد المالية، وقدرة احتجاز وتخزين الكربون، والأراضي. قد يحتاج تخصيص الموارد إلى التخطيط لعدة سنوات، إن لم يكن لعقود.

إن العوامل المذكورة أعلاه، من بين عوامل أخرى، تعد مجالًا للبحث المستمر يتم أخذها بعين الاعتبار عند السعي لتطوير استراتيجية قوية للهيدروجين النظيف في قطر.

07

الاستنتاجات

الاستنتاجات

يقدم هذا التقرير تقييمًا أوليًا للمخاطر الاستثمارية المحتملة والقرارات الحاسمة المرتبطة بتطوير صناعة الهيدروجين النظيف في قطر. تمت دراسة أربع استراتيجيات محتملة، تتميز بتزايد الطموح على نحو تدريجي: تنظيف الصناعة المحلية، توسيع الصناعة النظيفة، مُصدِّر هيدروجين حذر، و مُصدِّر هيدروجين رئيسي. تم تحديد حجم الطلب على الهيدروجين المرتبط بالاستراتيجيات بناءً على الاستهلاك المحلي الحالي للهيدروجين في قطر، وإمكانات توسعه، بالإضافة إلى سيناريوهات وكالة الطاقة الدولية بشأن سوق الهيدروجين النظيف الدولي في المستقبل. تعتمد تكاليف بنية الهيدروجين التحتية، سواء الحالية أو المستقبلية، على أفضل البيانات والتوقعات المتاحة.

يتم تقدير كل من التكاليف ومستويات عدم اليقين المرتبطة بكل من الاستراتيجيات الأربع حتى عام 2050 من خلال دمج مواصفات الطلب المستقبلية على الهيدروجين لكل استراتيجية مع الاستثمار المطلوب لإنشاء البنية التحتية. تزداد تكاليف الاستثمار والمخاطر المرتبطة بها بشكل متسارع من الاستراتيجية 1 منخفضة المخاطر إلى الاستراتيجية 4 التي تتسم بأنها عالية المخاطر وطموحة. علاوة على ذلك، باستثناء الاستراتيجية 1، فإن التكاليف العالية للاستثمار يتم تكبدها في المراحل المبكرة لجميع الاستراتيجيات. قد ترتفع الاستثمارات الأولية لجميع الاستراتيجيات وقد تتشابه الاستثمارات الأولية في حالة الاستراتيجية 4 لتلك الخاصة بالمشاريع الرئيسية للغاز الطبيعي المسال في قطر. قد تؤدي الفترات الزمنية الطويلة المطلوبة لتطوير السياسات اللازمة وإنشاء البنية التحتية، بالإضافة إلى المنافسة المحتملة مع الغاز الطبيعي المسال والمشاريع الصناعية الأخرى على الموارد المالية، وقدرة احتجاز وتخزين الكربون، والأراضي إلى ضرورة اتخاذ قرار اختيار الاستراتيجية المناسبة في وقت مبكر وقد يكون من الصعب تغييرها لاحقًا.

يعتبر التفكير في شكل صناعة الهيدروجين النظيف في قطر أمرًا بالغ الأهمية ويستدعي مزيدًا من البحث لفهم أفضل لكيفية تواؤم الاستراتيجيات المختلفة في آن واحد. يمكن تحديد حالات عدم اليقين بشكل أفضل، ويمكن استخدام الأساليب الإحصائية لبناء سيناريوهات أكثر تفصيلًا، ويمكن تقييم المخاطر والفرص باستخدام أساليب التحليل المالي، كما يمكن استكشاف القرارات الحاسمة بدعم من تقنيات النمذجة الأخرى. سيساهم ذلك في إثراء قاعدة الأدلة المتاحة لدعم عملية اتخاذ القرار في قطر وللدول الأخرى المصدّرة للوقود الأحفوري.

08

إشادة

البحثُ المُقدَّمُ في هذا التقرير مُقتبسٌ من:
كارلوس مينديز، مارسيلو كونتيستابيله، وضع استراتيجيات للهيدروجين في الدول المصدِّرة للوقود الأحفوري في ظلّ حالةٍ من عدم اليقين: حالة قطر، التحول نحو الطاقة المتجددة والمستدامة (2025)، :doi https://doi.org/10.1016/j.rset.2025.100108، والمنشور بموجب ترخيص CC BY-NC 4.0

يود المؤلفون أن يعربوا عن امتنانهم للمساهمة القيمة للدكتورة نور يوسف، التي جَمَعت المعلومات والبيانات الواردة في القسم 2.2 محفزات التجارة الدولية للسلع النظيفة: حالة آلية تعديل حدود الكربون.

إشادة

09

الاختصارات

الاختصارات

الإصلاح الذاتي الحراري	ATR
النفقات الرأسمالي	CAPEX
آلية تعديل الحدود الكربونية	CBAM
احتجاز وتخزين الكربون	CCS
احتجاز واستخدام وتخزين الكربون	CCUS
نظام تداول الانبعاثات	ETS
الاتحاد الأوروبي	EU
مجلس التعاون الخليجي	GCC
الناتج المحلي الإجمال	GDP
الغازات الدفيئة	GHG
تحويل الغاز إلى سوائل	GTL
الغاز الطبيعي المسال	LNG
ناقلات الهيدروجين العضوي السائل	LOHC
الغاز النفطي المسال	LPG
مليون طن سنويًا	MTPA
حقل الشمال الشرقي	NFE
الغاز الطبيعي	NG
صافي انبعاثات صفرية	NZE
شركة قطر للإضافات البترولية المحدودة	QAFAC
شركة قطر للأسمدة	QAFCO
شركة قطر للبتروكيماويات	QAPCO
رؤية قطر الوطنية	QNV
شركة قطر للفينيل	QVC
إصلاح الميثان بالبخار	SMR
المملكة المتحدة	UK
التوقعات الاقتصادية العالمية	WEO

الملحق الأول – استعراض الدراسات ذات الصلة باستراتيجيات الهيدروجين النظيف

لقد جذب تطوير صناعات الهيدروجين النظيف كوسيلة لتحقيق أهداف متعددة، متعلقة بتقليل انبعاثات الغازات الدفيئة المرتبطة بالطاقة وتحسين أمن الطاقة وزيادة التنافسية الصناعية، الكثير من الاهتمام من الباحثين والحكومات منذ أوائل العقد الأول من الألفية الثالثة على الأقل خاصة في أوروبا والولايات المتحدة واليابان. في البداية، قاد المجتمع البحثي هذه الجهود، حيث تم إجراء العديد من الدراسات التي استكشفت مختلف جوانب تطوير صناعات الهيدروجين، بدءًا من مسارات التكنولوجيا طويلة الأجل الموفرة للتكاليف وصولًا إلى التأثيرات المحتملة لهذه الصناعات الجديدة على المجتمعات. بناءً على هذا المخزون الواسع من المعرفة، قامت حكومات الدول الصناعية، التي في الغالب تكون من المستوردين للطاقة، بتطوير استراتيجيات وخطط طرق للهيدروجين بالتعاون الوثيق مع الصناعة المحلية؛ بشكل خاص تلك التي تم تطويرها في المملكة المتحدة وألمانيا وهولندا واليابان وكوريا الجنوبية والصين والولايات المتحدة الأمريكية وأستراليا. (مجموعة عمل الهيدروجين التابعة لمجلس الطاقة ووزارة الصناعة والابتكار والعلوم بمجلس الحكومات الأسترالية، 2019؛ وزارة أمن الطاقة وصافي الانبعاثات الصفري، 2023؛ الوزارة الاتحادية للشؤون الاقتصادية والطاقة، 2020؛ وزارة التجارة والصناعة والطاقة، 2019؛ حكومة هولندا، 2020؛ المجلس الوزاري للطاقة المتجددة، 2023؛ وزارة الطاقة الأمريكية، 2023؛ يوشان وكوربو، 2023). عادةً ما تعكس هذه الاستراتيجيات وجهات نظر الدول ذات الاقتصادات المتقدمة التي التزمت بأهداف قوية لخفض انبعاثات الغازات الدفيئة وترى في الهيدروجين النظيف أمرًا بالغ الأهمية للتعامل مع القطاعات التي يصعب تقليص انبعاثاتها، بينما تعزز في الوقت نفسه أمن الطاقة والتنافسية الاقتصادية. بناءً على ذلك، يتركز الاهتمام على تطوير صناعات الهيدروجين النظيف الوطنية بأسرع وأكثر الطرق فعالية من حيث التكلفة، لتوفير الهيدروجين للاستخدام المحلي، مع استكمال احتياجات الإنتاج المحلي بالواردات إذا دعت الحاجة. في بعض الحالات، يتم النظر أيضًا في خطوة أن تصبح الدولة مركزًا للاستيراد أو تطوير طاقة إضافية للتصدير، كما هو الحال في هولندا والولايات المتحدة وأستراليا. إن اهتمام دول مجلس التعاون الخليجي المصدرة للنفط والغاز ببناء صناعات الهيدروجين النظيف أحدث عهدًا بكثير؛ حيث إن دوافعها تختلف إلى حد ما وربما تكون أكثر دقة عن دوافع الدول الصناعية المستوردة للطاقة. تعلن دول مجلس التعاون الخليجي بشكل متزايد عن مشاريع كبيرة للهيدروجين النظيف، وقد نشرت بعض الدول مثل الإمارات العربية المتحدة وعُمان عن عدة خرائط طرق واستراتيجيات (وزارة الطاقة والبنية التحتية، 2023؛ وزارة الطاقة والمعادن، 2022ب). في الوقت ذاته، تقوم دول مجلس التعاون الخليجي بتعزيز إنتاج الوقود الأحفوري بشكل ملحوظ حسب قدراتها. إن استمرار اعتماد هذه الدول على صادرات النفط والغاز، بشكل عام إضافة إلى حالة عدم اليقين المحيط بتطور تقنيات وأسواق الهيدروجين يجعل من تطوير استراتيجيات الهيدروجين النظيف لدول مجلس التعاون الخليجي مسألة مختلفة كلية مقارنة بالدول المتقدمة المستوردة للطاقة.

تعتبر الأبحاث المتعلقة بالهيدروجين النظيف في دول مجلس التعاون الخليجي أيضًا حديثة نسبيًا. تستعرض بعض الدراسات إمكانيات دول مجلس التعاون الخليجي ومنطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا لتصبح رائدة في مجال الهيدروجين النظيف، لكنها عادة ما تكون دراسات عامة (خان والغامدي، 2023؛ العلبي وجوهرة، 2024؛ الرازي ودينسر، 2022). توجد أيضًا العديد من الدراسات الخاصة بكل دولة، إلا أن الكثير منها يتسم بطابع فني ويركز على تقنيات معينة؛ لن تُناقش هنا تلك الدراسات في هذا التقرير. تقوم الدراسات المخصصة لكل دولة - التي تهدف إلى توجيه استراتيجيات الهيدروجين النظيف الوطنية – بالجمع بين التحليل التكنولوجي والاقتصادي والسياسي وتحليل السوق. بالنسبة للمملكة العربية السعودية، نذكر بشكل خاص كتاب يغطي جميع جوانب التكنولوجيا والأسواق والسياسات ويقدم قاعدة قوية من الأدلة للمملكة العربية السعودية والدول الخليجية الأخرى التي تسعى إلى تطوير دور ريادي في الصناعة (شبانة وبراون 2024). بالنسبة لدولة الإمارات العربية المتحدة، تناولت بعض الدراسات الجوانب الاستراتيجية لتطوير صناعة الهيدروجين النظيف الوطنية، لا سيما فيما يتعلق بالهيدروجين الأخضر، واستخدامه في القطاعات التي يصعب تقليص الانبعاثات منها والسياسات المطلوبة لدعمها (غاندي وآخرون، 2022؛ زعيتر وآخرون، 2023). بالنسبة لعُمان، قامت الدراسات بتقييم الخطط الوطنية الحالية، ومحركاتها الاقتصادية والاستدامة، فضلًا عن الصعوبات وكيفية التغلب عليها (أمواتي وآخرون، 2024؛ أشرف وآخرون، 2024). وأخيرًا، بالنسبة لدولة قطر، قيَّمت مقالات بحثية مسارات تقنيات الهيدروجين النظيف المختلفة للدولة باستخدام طرق متنوعة (الجاك وكازي، 2020؛ أوكونكو وآخرون، 2021)؛ كما قامت دراسة أخرى بتقييم التأثير المحتمل للتجارة العالمية للهيدروجين النظيف على سوق الغاز الطبيعي المسال(الكواري وشونفيش، 2022).

تقدم الدراسات المستعرضة تحليلات لإمكانات تطوير صناعة الهيدروجين النظيف في دول مجلس التعاون الخليجي المختارة، مع مراعاة كل من الاستخدام المحلي للهيدروجين وإمكانية تصديره. تصف الدراسات الفوائد البيئية كما تقترح الفوائد الاقتصادية للمسارات المختلفة، وتقدم توصيات بشأن الخيارات المفضلة وتقترح كذلك التدخلات السياساتية اللازمة لتحقيقها. تميل الدراسات أيضًا إلى التأكيد على أهمية وضع استراتيجيات وطنية للهيدروجين النظيف تهدف إلى تحقيق الريادة الإقليمية أو العالمية في هذا المجال. بالرغم من إقرار الدراسات التحليلية بعدم اليقين الذي يؤثر على السوق وتوقعات التكنولوجيا المدرجة بشكل كبير، إلا أن معالجة تلك الحالة بمنهجية لم تتم. علاوة على ذلك، تدعو الدراسات عمومًا إلى الحاجة إلى اتخاذ إجراءات سريعة لتحقيق موقع ريادي في الصناعة، وفي بعض الحالات تحدد أهدافًا لذلك، ولكنها لا تستكشف الاستراتيجيات المحتملة والمخاطر والمكافآت التي قد ترتبط بها.

الملحق الثاني – إزالة الكربون من تسييل الغاز الطبيعي باستخدام الهيدروجين

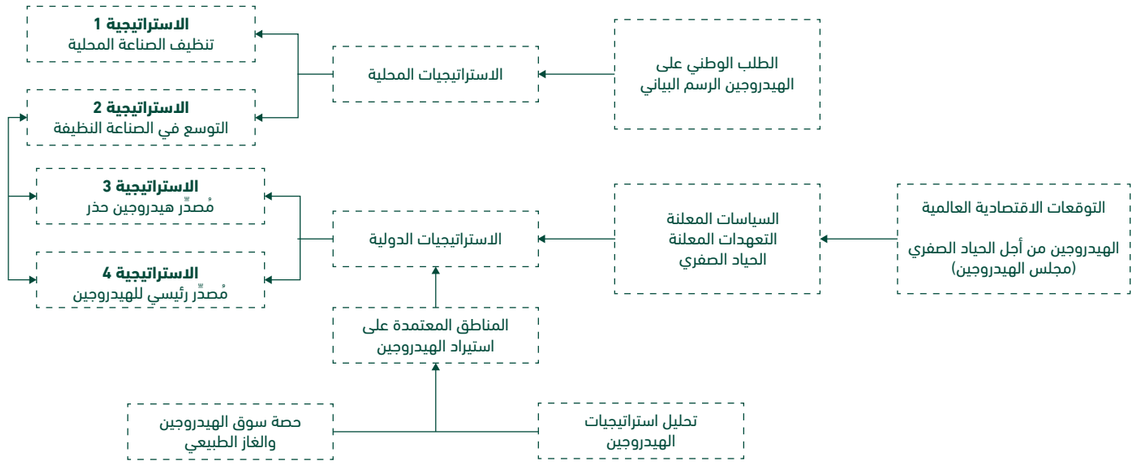
وضعت قطر للطاقة أهدافًا طموحة لتقليل انبعاثات الغازات الدفيئة من عملياتها؛ وتهدف بحلول عام 2035 إلى تحقيق خفض بنسبة 25% في كثافة الكربون في عملياتها الإنتاجية وبنسبة 35% في كثافة الكربون في مرافق الغاز الطبيعي المسال مقارنة بمستويات عام 2013 (قطر للطاقة، 2023أ). بلغت انبعاثات قطر للطاقة من عمليات الغاز الطبيعي المسال (النطاق 1 و2) حوالي 32.06 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون المكافئ في عام 2022 (قطر للطاقة، 2023أ)، ويمكن أن يُعزى حوالي نصف هذه الانبعاثات إلى تشغيل خطوط تسييل الغاز الطبيعي فقط (بحسب حساباتنا؛ يُرجى الرجوع إلى الجدول 4). هناك خيارات مختلفة لتقليل انبعاثات الغازات الدفيئة من خطوط تسييل الغاز الطبيعي. الخيار الأول هو إعادة تأهيل هذه الخطوط باستخدام تقنية احتجاز وتخزين الكربون. بهذه الطريقة، يمكن خفض 90% أو أكثر من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من الخطوط، مع ذلك فإن تركيز ثاني أكسيد الكربون في غازات العادم من توربينات الغاز يكون عادةً في حدود 3-5% مما يجعل عملية احتجاز ثاني أكسيد الكربون مكلفة من حيث رأس المال والطاقة (أكرم وآخرون، 2015؛ جنرال إلكتريك، 2021؛ مجيد وسفندسن، 2018؛ وانغ وسونغ، 2020). الخيار الثاني هو استبدال توربينات الغاز التي تدير دورة التبريد ميكانيكيًا بمحركات كهربائية. للمحركات الكهربائية مزايا تشغيلية تفوق توربينات الغاز من حيث خفض تكاليف الصيانة وتسريع بدء التشغيل، إلا أن هذا الحل ذو جدوى من ناحية تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون فقط في حال استخدام كهرباء منخفضة الكربون (فارا وآخرون، 2021؛ فارا وبوران، 2016). أخيرًا، يمكن أيضًا استخدام الهيدروجين النظيف لتقليل انبعاثات الغازات الدفيئة الناتجة عن تسييل الغاز الطبيعي. يمكن خلط الهيدروجين النظيف بنسبة تصل في الحجم إلى 30% مع الغاز الطبيعي الذي يُغذّى به توربينات الغاز دون الحاجة إلى تعديلات كبيرة على التوربينات، مما يسهم في تقليل انبعاثات الغازات الدفيئة جزئيًا (راجع الجدول 4). بالرغم من ذلك، يجب استخدام الهيدروجين بنسبة 100% لتحقيق خفض شبه كامل لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون، الأمر الذي يتطلب توربينات غازية مخصصة تختلف بشكل كبير عن التوربينات التقليدية التي تعمل بالغاز الطبيعي. يتطلب استبدال توربينات الغاز التقليدية بأخرى تعمل بالهيدروجين النقي تكاليف إضافية؛ ومع ذلك، عندما يُستخدم الهيدروجين النظيف فإنه يقدم بديلًا أكثر فعالية لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون بعد الاحتراق كما تم مناقشته سابقًا (إسحاق ودينسر، 2020؛ باشينكو، 2023). إذا قررت قطر للطاقة استخدام الهيدروجين النظيف كحل رئيسي لتقليل انبعاثات الغازات الدفيئة من تسييل الغاز الطبيعي، فسيكون الحجم المطلوب لذلك كبيرًا جدًا (راجع الجدول 4).

الجدول 4. الطلب المحتمل على الهيدروجين النظيف لتسييل الغاز الطبيعي وتقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المرتبطة به،
بناءً على إجمالي قدرة تسييل الغاز الطبيعي البالغة 142 مليون طن سنويًا ومتطلبات الطاقة لتسييل الغاز البالغة 500 كيلووات ساعة/طن

مزيج الهيدروجين	متطلبات الغاز الطبيعي (مليون طن سنويًا)	متطلبات الهيدروجين (مليون طن سنويًا)	انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بعد المزج
0%	4.554	-	29.31
5%	4.327	0.0284	28.88
10%	4.099	0.0569	28.42
30%	3.188	0.1706	26.14
100%	-	2.1321	2.93

الملحق الثالث – بيانات التكنولوجيا والافتراضات

عند تقييم احتياجات إنشاء البنية التحتية المرتبطة بكل من الاستراتيجيات الأربع الموضحة في القسم 5.1، يعتمد التحليل على حجم الهيدروجين المحلي والصادرات التي تم مناقشتها في القسمين 2.1 و3.1. يوضح الشكل 19 كيفية تحديد حجم الطلب على الهيدروجين النظيف في التحليل.



الشكل 19. توضيح النهج المتبع لتحديد الطلب على الهيدروجين في كل من الاستراتيجيات الأربع المعتمدة

يتم حساب تكاليف الاستثمار الرأسمالي للتكنولوجيا بناءً على الأرقام الواردة في الأبحاث؛ راجع الجدول 5 أدناه.

الجدول 5. تكاليف الاستثمار الرأسمالي بالدولار الأمريكي للتقنيات المتعلقة بإنتاج الهيدروجين النظيف المستخدمة في التحليل الوارد في الأقسام التالية.

التكنولوجيا	الحد الأدنى	الحد الأعلى	المرجع
إصلاح الميثان بالبخار (005 طن/اليوم)	**137,500,00**	**300,000,000**	(باور وآخرون، 2018)
الإصلاح الذاتي الحراري (005 طن/اليوم)	**692,200,000**	**1,300,000,000**	(آي دي تيك إس، 2023؛ خوجاستيه سالكويه وآخرون، 2017)
التحلل الحراري (005 طن/اليوم)	**000,006,877 (بحلول عام 0302)**	**1,600,000,000 (بحلول عام 2050)** **3,100,000,000 (بحلول عام2030)**	(بارکنسون وآخرون، 2018)
ناقلات	**000,000,214 (سعة 11 كيلوطن)**	**481,000,000 (سعة 19.6 كيلوطن)**	(الخالدي وآخرون، 2022؛ لي وآخرون، 2022)
محطة تسييل الهيدروجين (005 طن/اليوم)	**1,000,000,000**	**2,000,000,000**	(برنامج خلايا الوقود والهيدروجين التابع لوزارة الطاقة الأمريكية، 2019؛ شركة ماكديرموت وجاسكونسلت، 2023؛ شركة إن سي إي ماريتيم كلينتك، 2019)
ناقل الهيدروجين العضوي السائل	**201,300,000**		(كارفاليو وآخرون، 2021)

تكلفة رأس المال لمحطات ناقل الهيدروجين العضوي السائل، وفقًا للأبحاث، التي تقدر بحوالي 20%-10% من تكلفة محطة تسييل الهيدروجين ذات الحجم المماثل.

تعتمد تكاليف البنية التحتية المستخدمة في تحليلنا على تكلفة رأس المال لمحطات إنتاج الهيدروجين النظيف المعنية، وقد أضفنا إليها تكلفة رأس المال للبنية التحتية اللازمة لتكييف الهيدروجين ونقله حيثما كان ذلك مناسبًا. أخذنا في الاعتبار أيضًا، خاصة بالنسبة للهيدروجين النظيف المُصدَّر كهيدروجين سائل، تكلفة بناء القدرة اللازمة للتسييل والحصول على الحاويات المبردة لنقله عبر البحر. لم ندرج تكلفة الحاويات بالنسبة للهيدروجين النظيف المصدر كناقل للهيدروجين العضوي السائل لأننا نفترض أنه يمكن استخدام الحاويات التقليدية المتاحة. ينطبق نفس النهج أيضًا على الهيدروجين الذي يتم نقله على هيئة أمونيا. كما استبعدنا في التحليل تكلفة البنية التحتية اللازمة لإعادة تحويل ناقل الهيدروجين إلى هيدروجين نقي عند نقطة الاستقبال، لأننا نفترض أن تكلفة الاستثمار ستتحملها الجهة المستوردة.

المراجع

Belgian federal Hydrogen Strategy. (2022).

Consejo Económico y Social. (2021). Hacia una Estrategia Nacional Hidrogeno 2030.

Energy Institute. (2024). Statistical Review of World Energy.

EN-H2 Estratégia nacional para o hidrogénio. (2020).

European Parliament Council of the European Union. (2024). Directive (EU) 2024/1788 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 on common rules for the internal markets for renewable gas, natural gas and hydrogen, amending Directive (EU) 2023/1791 and repealing Directive 2009/73/EC. Official Journal of the European Union. https://doi.org/http://data.europa.eu/eli/dir/2024/1788/oj

Government, H. (2021). UK Hydrogen Strategy. www.gov.uk/official-documents

Heinemann, C., Ritter, D., Mendelevitch, R., & Dünzen, K. (2022). Hydrogen fact sheet-Gulf Cooperation Countries (GCC). www.oeko.de

Hydrogen Central. (2022). Saudi Arabia - Hydrogen Strategy Targets $36bln Of Investments By 2030 - Hydrogen Central. https://hydrogen-central.com/saudi-arabia-hydrogen-strategy-36bln-investments-2030/

Ibrahim, L., & Hussein, H. (2021). Emirates News Agency - UAE announces Hydrogen Leadership Roadmap, reinforcing Nation's commitment to driving economic opportunity through decisive climate action. https://wam.ae/en/details/1395302988986

International Energy Agency. (2024). World Energy Outlook 2024. https://iea.blob.core.windows.net/assets/04f06925-a5f4-443d-8f1a-6daa31305aee/WorldEnergyOutlook2024.pdf

Kowtham Raj, A., & Aayog Pranav Lakhina, N. (2022). Harnessing Green Hydrogen, Opportunities for Deep Decarbonisation in India. www.rmi.org

METI Agency for Natural Resources and Energy. (2024, September 10). Hydrogen Society Promotion Act Enacted. Toward a Forthcoming Hydrogen-based Society. Part 2: Utilization of Clean Hydrogen. https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/special/article/detail_204.html

Ministério de Minas e Energia. (2021). Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2).

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MTERD). (2020). Hoja de Ruta del Hidrógeno: Una apuesta por el Hidrógeno Renovable.

Ministero dello sviluppo economico. (2020). Strategia Nazionale Idrogeno Linee Guida Preliminari.

Ministry of Climate and Environment. (2021). Polish Hydrogen Strategy until 2030 with an outlook until 2040-Summary 2.

Ministry of Economy and Sustainable Development. (2022). Hydrogen Strategy of The Republic of Croatia Until 2050.

Ministry of Energy. (2021, March 11). HRH Minister of Energy signs a Saudi-Germany MOU on the production of hydrogen. https://www.moenergy.gov.sa/en/MediaCenter/News/Pages/27071442.aspx

Ministry of Energy and Infrastructure. (2023). National Hydrogen Strategy.

Ministry of Energy and Minerals. (2022a). Green Hydrogen in Oman. www.mem.gov.om

Ministry of Energy and Minerals. (2022b, October 24). Oman announces 2050 Net Zero commitment and unveils ambitious green hydrogen strategy - mem. https://mem.gov.om/en-us/Media-Center/News/ArtMID/608/ArticleID/1281/Oman-announces-2050-Net-Zero-commitment-and-unveils-ambitious-green-hydrogen-strategy

Ministry of Trade and Industry Singapore. (2022). SINGAPORE'S NATIONAL HYDROGEN STRATEGY.

Nakano, J. (2022). Saudi Arabia's Hydrogen Industrial Strategy | Center for Strategic and International Studies. https://www.csis.org/analysis/saudi-arabias-hydrogen-industrial-strategy

NEOM. (2023, May 22). NEOM Green Hydrogen Company completes financial close at a total investment value of USD 8.4 billion in the world's largest carbon-free green hydrogen plant. https://www.neom.com/en-us/newsroom/neom-green-hydrogen-investment

Netherlands Enterprise Agency. (2022). Hydrogen developments in Taiwan.

Paris Government. (2020). National strategy for the development of decarbonised and renewable hydrogen in France.

QAFCO. (2022). Sustainability Report - 2021.

Qatar Chamber. (2024a). Private Sector Exports – Second Quarter (Q2) (April-June 2024). https://www.qatarchamber.com/pser-2nd-quarter-2024/

Qatar Chamber. (2024b). Private Sector Exports – Third Quarter (Q3) (July-September 2024). https://www.qatarchamber.com/pser-3rd-quarter-2024/

QatarEnergy. (2022a). QatarEnergy and GE to Develop Carbon Capture Roadmap and Low Carbon Solutions for Qatar's Energy Sector. https://www.qatarenergy.qa/en/MediaCenter/Pages/newsdetails.aspx?ItemId=3723

QatarEnergy. (2022b, August 31). QatarEnergy Renewable Solutions & QAFCO Launch the World's Largest Blue Ammonia Facility. https://www.qatarenergy.qa/en/MediaCenter/Pages/newsdetails.aspx?ItemId=3722

S&P Global. (2024, June 14). Japan tightens low-carbon ammonia standards to align with Europe, US. https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/latest-news/energy-transition/061424-japan-tightens-low-carbon-ammonia-standards-to-align-with-europe-us

Sukhankin, S. (2022). Hydrogen: the UAE's Strategic Albeit Long-term Priority - Gulf International Forum. https://gulfif.org/hydrogen-the-uaes-strategic-albeit-long-term-priority/

The Government of the Netherlands. (2020). Government Strategy on Hydrogen. https://www.tno.nl/nl/aandachtsgebieden/energietransitie/roadmaps/naar-co2-neutrale-

Trading Economics. (2022). European Union Imports from Qatar. European Union Imports from Qatar. https://tradingeconomics.com/european-union/imports/qatar

US Department of Energy. (2023). U.S. Department of Energy Clean Hydrogen Production Standard (CHPS) Guidance. https://greet.es.anl.gov/greet.models.

What role for hydrogen in Turkey's energy future? (2021). https://enerji.enerji.gov.tr//Media/Dizin/BHIM/tr/Enerjide_Arama_Etkinlikleri_ve_Belgeleri/231665-20204bhidrojenyaklasim.pdf

10

المراجع

QEERI
معهد قطر لبحوث البيئة والطاقة
Qatar Environment & Energy Research Institute
جامعة حمد بن خليفة
HAMAD BIN KHALIFA UNIVERSITY

إرثنا
earthna
عضو في مؤسسة قطر
Member of Qatar Foundation