الطاقة-إلى-X

فرص استخدام الهيدروجين الأخضر في الأردن

تقرير معد لمؤسسة فريدريش ايبرت | يناير ٢٠٢٢

المؤلفون:
راشد مناع
عمر صفوري

المراجعون:
شاكر حماد
عبدالله الشمالي

الجَمعيّة العِلميّة المَلكيّة
Royal Scientific Society

FRIEDRICH EBERT STIFTUNG
Climate and Energy Project
مشروع الطاقة والمناخ

جميع الحقوق محفوظة. لا يمكن إعادة طبع، نسخ أو استعمال أي جزء من هذه المطبوعة من دون إذن مكتوب من الناشر.

الآراء الواردة في هذه الدراسة لا تمثل بالضرورة وجهات نظر مؤسسة فريدريش إيبرت أو المحرر.

الطاقة-إلى-X

فرص استخدام الهيدروجين الأخضر في الأردن

هذا التقرير هو نسخة عربية مترجمة من التقرير الاصلي المعد باللغة الانجليزية
من قبل **الجمعية العلمية الملكية / المركز الوطني لبحوث الطاقة**

تقرير معد:
لمؤسسة فريدريش إيبرت
الأردن

ترجمة إلى العربية:
أبو غزالة للترجمة والتوزيع والنشر

يناير ٢٠٢٢

المؤلف الرئيسي
راشد مناع

مؤلف مشارك
عمر صفوري

المراجعون
شاكر حماد
عبدالله الشمالي

حول مؤسسة فريدريش ايبرت

مؤسسة فريدريش ايبرت هي أقدم مؤسسة سياسية ألمانية وتدعو إلى النهوض بالديمقراطية الاجتماعية. من خلال مشروعها الإقليمي للطاقة والمناخ في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا، والذي يتخذ من الأردن مقراً له، يجمع ممثلين حكوميين مع منظمات المجتمع المدني، ويدعم البحوث، ويقدم توصيات بشأن السياسات لتعزيز وتحقيق انتقال عادل اجتماعيًا للطاقة والعدالة المناخية للجميع في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا.

حول الجمعية العلمية الملكية/ المركز الوطني لبحوث الطاقة

الجمعية العلمية الملكية (RSS) هي مؤسسة وطنية غير حكومية وغير هادفة للربح. تأسست في العام 1970 بموجب ارادة ملكية سامية كمؤسسة علمية متعددة التخصصات تعمل على دعم وتطوير التنمية في الأردن والنهوض به إلى مصاف الدول المتقدمة من خلال ما تقدمه من مشورة فنية خالصة ونصح سديد لدعم التخطيط ورسم السياسات وصنع القرار. تقوم الجمعية العلمية الملكية بإجراء الفحوصات الفنية المتخصصة والمعتمدة، اضافة الى إجراء البحوث العلمية والتقنية بالتعاون مع القطاع الصناعي والجامعات المحلية، كما وتقوم بتقديم الاستشارات الفنية للقطاعين العام والخاص، وتعمل بشراكة وطيدة مع المجتمعات المحلية والمنظمات الإقليمية والدولية. منذ إنشائها كمنظمة وطنية مستقلة، فان الاهداف الرئيسية للجمعية العلمية الملكية تتمثل بالعمل على الحفاظ على صحة الإنسان وسلامته، وحماية البيئة، والمساهمة في التنمية الاقتصادية المستدامة.

تأسس المركز الوطني لبحوث الطاقة (NERC)، وهو جزء من الجمعية العلمية الملكية، في عمان لأغراض البحث والاستشارات والتطوير والتدريب في مجالات الطاقة الجديدة والمتجددة. وهو يرفع معايير استخدام الطاقة في مختلف القطاعات ويشجع على استخدام الطاقة المتجددة في الأردن.

جدول المحتويات

قائمة الأشكال ٠٥
قائمة الجداول ٠٥
قائمة المختصرات ٠٥
قائمة الوحدات والرموز ٠٧

١

ملخص تنفيذي ٠٩

٢

ما هي الطاقة-إلى-X؟ ١٠
٢.١ تعريف الطاقة-إلى-X ١٠
٢.٢ ما هي الطاقة-إلى-الهيدروجين؟ ١٠
٢.٣ أنواع الهيدروجين ١١
٢.٤ تطبيقات الهيدروجين ١٢
٢.٥ أنواع الطاقة-إلى-X ١٨

٣

دور الطاقة-إلى-X في تحول استخدام الطاقة ٢٣
٣.١ تعريف تحول استخدام الطاقة ٢٣
٣.٢ قطاع الصناعة ٢٥
٣.٣ قطاع النقل ٢٦
٣.٤ التدفئة ٢٧
٣.٥ المواد الأولية ٢٧

٤

الأردن - قطاع الطاقة واستخدام الهيدروجين ٢٨
٤.١ حالة الطاقة في الأردن ٢٨
٤.٢ استخدام الطاقة المتجددة في الأردن ٢٩
٤.٣ طرق دعم الهيدروجين الأخضر للاندماج في السوق المحلي ٣٠

٥

تحديات الطاقة-إلى-X في الأردن (تركز على الهيدروجين الأخضر) ٣٣
٥.١ البنية التحتية ٣٣
٥.٢ ندرة المياه ٣٤
٥.٣ الإطار التنظيمي ٣٤
٥.٤ التكلفة الرأسمالية والتشغيلية ٣٥

٦

توصيات لتطبيق الطاقة-إلى-X في الأردن ٣٦
٦.١ تحديد الأولويات ٣٦
٦.٢ خارطة الطريق وإطار سياسي ٣٧
٦.٣ الحوافز ٣٨
٦.٤ المشاريع التجريبية ٣٨
٦.٥ إنشاء لجنة توجيهية للهيدروجين الأخضر ٣٨
٦.٦ التعاون مع دول الجوار ٣٨
٦.٧ استخدام المحلل الكهربائي لزيادة الطلب على الكهرباء ٣٩
٦.٨ محطة تحلية في مدينة العقبة ٣٩
٦.٩ الاستثمار في البحث والتطوير ٣٩

٧

ملحق: تجربة دولة - انتشار اقتصاد الهيدروجين الأخضر في المغرب: الاستراتيجية والتقدم المستمر ٤٣
٧.١ تحول الطاقة في المغرب ٤٣
٧.٢ الهيدروجين الأخضر في المغرب: رؤية واستراتيجية ٤٤
٧.٣ الهيدروجين الأخضر في المغرب: الخطوات الأولى والأنشطة الجارية ٤٥
٧.٤ خاتمة ووجهات نظر ٤٨

قائمة الأشكال

الشكل ١ تطبيقات الهيدروجين
الشكل ٢ مخطط القابلية للاشتعال لغاز الهيدروجين
الشكل ٣ إنتاج الحديد المختزل المباشر من الهيدروجين كبديل للكربون (الفحم)
الشكل ٤ استخدام الهيدروجين في إنتاج الدهون المهدرجة
الشكل ٥ استخدام الهيدروجين في تحويل الزيوت الثقيلة إلى زيوت أخف
الشكل ٦ إنتاج الأمونيا من الهيدروجين كمفاعل رئيسي
الشكل ٧ خلية التحليل الكهربائي لإنتاج غاز الهيدروجين
الشكل ٨ إعادة التشكيل البخاري للغاز الطبيعي لإنتاج الهيدروجين
الشكل ٩ عملية تغويز الكتلة الحيوية
الشكل ١٠ الطاقة إلى الغاز
الشكل ١١ الطاقة إلى الغاز الاصطناعي
الشكل ١٢ الطاقة إلى المواد الكيميائية
الشكل ١٣ الميثانول إلى المواد الكيميائية
الشكل ١٤ الطاقة إلى السوائل
الشكل ١٥ الأدوار السبعة للهيدروجين في إزالة الكربون من القطاعات الرئيسية للاقتصاد
الشكل ١٦ تشكل الحرارة العالية الدرجة جزءًا كبيرًا من استخدام الطاقة في الصناعات الثقيلة
الشكل ١٧ توليد الطاقة في الأردن حسب المصدر
الشكل ١٨ انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في الأردن على مر السنين حسب القطاع
الشكل ١٩ النسبة المئوية لإنتاج الكهرباء حسب المصدر
الشكل ٢٠ إجمالي استهلاك الطاقة النهائي في الأردن (حسب القطاع)

قائمة الجداول

الجدول ١ النسبة المئوية لحدود القابلية للاشتعال للغازات المختلفة
الجدول ٢ قطر الحجم المشترك لجزيئات الغاز المختلفة
الجدول ٣ تأثير طرق تخزين الهيدروجين المختلفة على عوامله الفيزيائية المتعددة

قائمة المختصرات

APU	وحدة الطاقة الإضافية	Auxiliary Power Unit
BTU	الوحدة الحرارية البريطانية	British Thermal Unit
C1	جزيئات ذات ذرة كربون واحدة	Molecules with a single carbon atom
CAPEX	النفقات الرأسمالية	Capital Expenditures
CCS	احتجاز الكربون وتخزينه	Carbon Capture and Storage
CCU	احتجاز الكربون واستخدامه	Carbon Capture and Utilization
CGEM	الاتحاد العام لمقاولات المغرب	Confédération Générale des Enterprises du Maroc
CHP	الجمع بين الحرارة والكهرباء	Combined Heat and Power
COVID-19	مرض فيروس كورونا ٢٠١٩	Coronavirus disease 2019

CSP	الطاقة الشمسية المركزة	Concentrated Solar Power
EBRD	البنك الأوروبي للإنشاء والتعمير	European Bank for Reconstruction and Development
EE	التعليم البيئي	Environmental Education
EHB	قوة الهيدروجين الرئيسية الأوروبية	European Hydrogen Backbone
ESP	الخطة الإستراتيجية للتعليم	Education Strategic Plan
EU	الإتحاد الأوروبي	European Union
EUR	اليورو	Euro
EV	مركبة كهربائية	Electric Vehicle
FCEV	سيارة كهربائية تعمل بخلايا الوقود	Fuel Cell Electric Vehicle
G	الثقل النوعي	Specific Gravity
GHG	غازات الدفيئة	Greenhouse Gas
Green H2A	الهيدروجين الأخضر والتطبيقات	Green Hydrogen and Applications
HHV	قيمة التدفئة العليا	Higher Heating Value
ICE	محرك الاحتراق الداخلي	Internal Combustion Engine
IEA	وكالة الطاقة الدولية	International Energy Agency
IRENA	الوكالة الدولية للطاقة المتجددة	International Renewable Energy Agency
IRESEN	معهد البحوث في الطاقة الشمسية والطاقات الجديدة	Institute of Research in Solar Energy and New Energies
KfW	بنك الائتمان لإعادة الإعمار	Kreditanstalt für Wiederaufbau
LFL	الحد الأدنى من القابلية للاشتعال	lower flammability limit
LOHC	ناقلات الهيدروجين العضوية السائلة	Liquid Organic Hydrogen Carriers
Masen	الوكالة المغربية للطاقة الشمسية	Moroccan Agency for Solar Energy
MEMR	وزارة الطاقة والثروة المعدنية	Ministry of Energy and Mineral Resources
MENA	الشرق الأوسط وشمال أفريقيا	Middle East and North Africa
MOF	الإطار المعدني العضوي	Metal-Organic Framework
NCGH2	اللجنة الوطنية للهيدروجين الأخضر	National Commission of Green Hydrogen
NEPCO	شركة الكهرباء الوطنية	National Electric Power Company
OCP Group	مكتب الشريفين للفوسفات	Office Chérifien des Phosphates
ONEE	المكتب الوطني للكهرباء والمياه الصالحة للشرب	Office National de l'Electricité et de l'Eau Potable
ONHYM	المكتب الوطني للهيدروكربونات والمناجم	Office National des Hydrocarbures et des Mines
OPEX	النفقات التشغيلية	Operational Expenditures
PAREMA	شراكة الطاقة المغربية الألمانية	Moroccan-German Energy Partnership
PHEVs	المركبات الكهربائية الهجينة الموصولة بالكهرباء	Plug-In Hybrid Electric Vehicles
PtX	الطاقة-إلى-X	Power-to-[X]
PV	الكهروضوئية	Photovoltaic
R&D	البحث والتطوير	Research and Development
SMR	إعادة التشكيل البخاري للميثان	Steam Methane Reforming

STP	درجة الحرارة والضغط القياسيان	Standard Temperature and Pressure
TSO	مشغل نظام النقل	Transmission System Operator
UFL	الحد الأعلى من قابلية الإشتعال	upper flammability limit
UM6P	جامعة محمد السادس متعددة التخصصات التقنية	University Mohammed VI Polytechnic
US	الولايات المتحدة الأمريكية	United States
USD	دولار أمريكي	United States Dollar
VRE	الكهرباء المتجددة المتغيرة	Variable Renewable Electricity

قائمة الوحدات والرموز

C_6H_6	البنزين	Benzene
CH_3OH	جزيء الميثانول	Methanol Molecule
CH_4	جزيء الميثان	Methane Molecule
CO	جزيء أول أكسيد الكربون	Carbon Monoxide Molecule
CO_2	جزيء ثاني أكسيد الكربون	Carbon Dioxide Molecule
g	غرام	Gram
H_2	غاز الهيدروجين	Hydrogen Gas
H_2CO	الفورمالديهايد	Formaldehyde
HCO_2H	حمض الفورميك	Formic-Acid
H_2O	جزيء الماء	Water Molecule
kg	كيلو جرام	Kilo Gram
kJ	كيلو جول	Kilo Joule
kWh	كيلو وات ساعة	Kilo Watt Hour
MJ	ميجا جول	Mega Joules
mol	وحدة القياس الجزيئي	Unit for Molecular Quantification
Mt	ميجا تون	Mega Tonne
MW	وزن جزيئي	Molecular Weight
MWh	ميجا وات ساعة	Mega Watt Hour
N_2	نتروجين	Nitrogen
NH_3	الأمونيا	Ammonia
O_2	جزيء الأكسجين	Oxygen Molecule
scf	قدم مكعب قياسي	Standard Cubic Foot

تهدف الطاقة-إلى-X إلى الاستفادة من الإمكانات البيئية والاقتصادية للطاقة المتجددة

١ ملخص تنفيذي

يمكن لتقنيات الطاقة-إلى-X أن تلعب دورًا جوهريًا ليس فقط في مزيج الطاقة العالي فحسب، بل أيضًا في التخفيف من تأثير ظاهرة الاحتباس الحراري. يمكن أن تساعد هذه التقنيات في تحقيق هدف اتفاقية باريس المتمثل في الحفاظ على ارتفاع درجة حرارة الأرض دون ١,٥ - ٢ درجة مئوية. ويمكن أن يساهم استخدام الطاقة-إلى-X، وخاصة الهيدروجين، في إزالة الكربون من قطاعات الطاقة والصناعة والنقل، على سبيل المثال. لهذه الأسباب، أصبح هناك اهتمامًا متزايدًا بتقنيات الطاقة-إلى-X.
شكلت الحكومة الألمانية والاتحاد الأوروبي، استراتيجيات للهيدروجين لتحديد الهيدروجين الأخضر كعنصر أساسي لتحقيق تحول الطاقة وإزالة الكربون من القطاعات المختلفة. تهدف الاستراتيجيات أيضًا إلى تقليل ظاهرة الاحتباس الحراري إلى درجتين مئويتين والوصول إلى الحياد الكربوني بحلول عام ٢٠٥٠.

تشير التطبيقات المختلفة للهيدروجين، والتي يعتبر أحدها مكمل لمصادر الطاقة المتجددة، إلى أن تقنيات الهيدروجين قد تطورت من حيث الإنتاج والتخزين والنقل. يتم تحديد الهيدروجين بألوان مختلفة، وتميز هذه الألوان المختلفة بين أنواع الهيدروجين وكيفية إنتاج كل منها.

من ناحية أخرى، هناك العديد من العوامل الدافعة لاستخدام الهيدروجين الأخضر، ومنها تكلفة الكهرباء، وخفض تكلفة الكهرباء لمحطات الطاقة المتجددة، وانخفاض تكلفة التحليل الكهربائي منذ عام ٢٠١٠، واهتمام العديد من أصحاب المصلحة. ولكن اعتماد الهيدروجين الأخضر يعوقه الافتقار إلى البنية التحتية المتخصصة، وارتفاع تكاليف الإنتاج، وعدم الاعتراف بفيمته، وفقدان الطاقة.

تستورد المملكة الأردنية الهاشمية ٩١٪ من احتياجات الطاقة (وزارة الطاقة والثروة المعدنية، ٢٠١٩). يجب أن يحفز الاستثمار في الهيدروجين الأخضر الحكومة على تقليل اعتمادها على الوقود الأحفوري وزيادة استخدام الطاقة المتجددة. لذلك، فإن تطوير نهج سياسة متكاملة أمر ضروري لاختراق السوق والتغلب على المقاومة الأولية لهذا التحول. ومع ذلك، هناك العديد من التحديات التي يجب على الأردن معالجتها، وتشمل الإطار التنظيمي بالإضافة إلى التحديات الأخرى المرتبطة بتنفيذ تطبيقات الهيدروجين، مثل مشاكل البنية التحتية، وندرة المياه، وكلف رأس المال، والنفقات التشغيلية.
يتكون هذا التقرير من ستة فصول. يحدد الفصل الأول تقنيات الطاقة-إلى-X وإنتاج الهيدروجين وأنواع الهيدروجين وتطبيقات الهيدروجين. يناقش الفصل الثاني أنواعًا مختلفة من الطاقة-إلى-X، بينما يركز الفصل الثالث على دور الطاقة-إلى-X في تحول أنظمة الطاقة وإزالة الكربون مثل الصناعة والنقل والتدفئة والمواد الأولية. ويستعرض الفصل الرابع حالة الطاقة في الأردن ويبحث في دوافع استخدام الهيدروجين الأخضر. ويعرض الفصل الخامس العوائق التي قد تواجهها الأردن فيما يخص الطاقة-إلى-X، مع الأخذ في الاعتبار حالة الطاقة. ويستكشف الفصل الأخير توصيات السياسة الرئيسية والخطوات التي يمكن اتخاذها لتنفيذ سلسلة الهيدروجين الخضراء في جميع أنحاء البلاد.

١ ما هي الطاقة-إلى-X؟

٢.١ تعريف الطاقة-إلى-X

تشير الطاقة-إلى-X (Power-to-X)، مثل الطاقة-إلى-غاز أو الطاقة-إلى-المواد الكيميائية أو الطاقة-إلى-الوقود، إلى عمليات مختلفة تحول الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة (مثل الرياح والطاقة الشمسية) إلى حرارة أو هيدروجين أو وقود صناعي أو مواد كيميائية من شأنها أن تستخدم في قطاعات مختلفة، حيث تهدف الطاقة-إلى-X إلى الاستفادة من الإمكانات البيئية والاقتصادية للطاقة المتجددة. وظهر مصطلح الطاقة-إلى-X بسبب العدد المتزايد والتنوع الكبير للتطبيقات ذات الصلة به (بور وآخرون، ٢٠٢٠). التحليل الكهربائي للماء هو أكثر التقنيات المعروفة التي تنتج مواد كيميائية من الكهرباء لإنتاج الهيدروجين والأكسجين.

بإمكان تقنية الطاقة-إلى-X إزالة الكربون من بعض الصناعات والنقل وقطاع الطاقة. ومن خلال هذه التقنية يمكن تحويل ثاني أكسيد الكربون إلى مركبات بسيطة تحتوي على جزيئات ذرة كربون واحدة (C_1)، مثل الميثانول (CH_3OH) والميثان (CH_4). يمكن استخدام الميثانول، على سبيل المثال، لإنتاج البنزين والديزل ومواد كيميائية أخرى. لذلك، ستعمل هذه التقنيات على تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون عند المصدر، وإنتاج وقود نقل سائل، والسماح بتخزين الطاقة المتجددة (فاسكونسيلوس ولافوي، ٢٠١٩).

٢.٢ ما هي الطاقة-إلى-الهيدروجين؟

يعتبر الهيدروجين أحد أبسط العناصر وأرخصها وأكثرها وفرة على وجه الأرض. ويحتوي الهيدروجين على بروتون واحد وإلكترون واحد. على الرغم من أنه لا يبدو نقيًا في حد ذاته، إلا أنه يمكن تخزينه ونقله (ساتيابال، ٢٠١٧).

الهيدروجين هو ناقل للطاقة يمكن استخدامه في تطبيقات مختلفة، وسيتم مناقشة بعضها في القسم ٢,٤. يمكن استخدام العديد من العمليات لإنتاج الهيدروجين، مثل إعادة التشكيل البخاري لغاز الميثان (SMR)، تغويز الفحم، إعادة تشكيل السوائل المتجددة، والتحليل الكهربائي (بلاسيو وبفلوجمان، ٢٠٢٠)، والتي سيتم توضيحها في القسم ٣,٢.

٢.٣ أنواع الهيدروجين

اعتمادًا على طريقة الإنتاج، قد ينتج عن تصنيع الهيدروجين منتجات كربونية ثانوية. يوجد تصنيف بالألوان للتمييز بين الأنواع والأساليب المختلفة في عملية إنتاج الهيدروجين. **ويتم تمييز ألوان الهيدروجين على النحو التالي:**

الهيدروجين الأسود والرمادي

كل من عمليات الهيدروجين الأسود والهيدروجين الرمادي تنتج عنها انبعاثات كربونية. يستخدم النوع الأسود من عملية صنع الهيدروجين الفحم الأسود أو الليغنيت (الفحم البني)، وهو الأكثر ضررًا بيئيًا، بينما يتم إنتاج الهيدروجين الرمادي من خلال الغاز الطبيعي أو الميثان، باستخدام إعادة التشكيل البخاري للميثان. ومع ذلك، لا يتم التقاط غازات الدفيئة الناتجة عن عملية الهيدروجين الرمادي (ناشونال جريد، ٢٠٢١).

الهيدروجين الأزرق

يتم أيضًا إنشاء الهيدروجين الأزرق باستخدام الغاز الطبيعي أو الميثان من خلال إعادة التشكيل البخاري. تجمع العملية بين كل من الغاز الطبيعي أو الميثان والماء الساخن في شكل بخار. على عكس إنتاج الهيدروجين الرمادي، تتضمن هذه العملية احتجاز الكربون وتخزينه . وتسمى هذه العملية أيضًا "الهيدروجين منخفض الكربون" لأنها تولد انبعاثات كربونية ولكنها تلتقطها وتخزنها (ناشونال جريد، ٢٠٢١).

الهيدروجين الأخضر

الهيدروجين الأخضر هو الأفضل من الناحية البيئية، حيث يتم إنتاج الهيدروجين من دون انبعاثات كربونية، وهو أنسب نهج نحو التحول الكامل للطاقة المستدامة، وسيكون محور هذا التقرير. تتضمن عملية إنتاجه استخدام الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة، مثل الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح، واستعمال هذه الكهرباء لتحليل المياه وفصل ذراتها إلى أوكسجين وهيدروجين. حاليًا، يشكل الهيدروجين الأخضر نسبة صغيرة من إجمالي الهيدروجين بسبب ارتفاع كلفته الرأسمالية والتشغيلية (ناشونال جريد، ٢٠٢١).

الهيدروجين الفيروزي

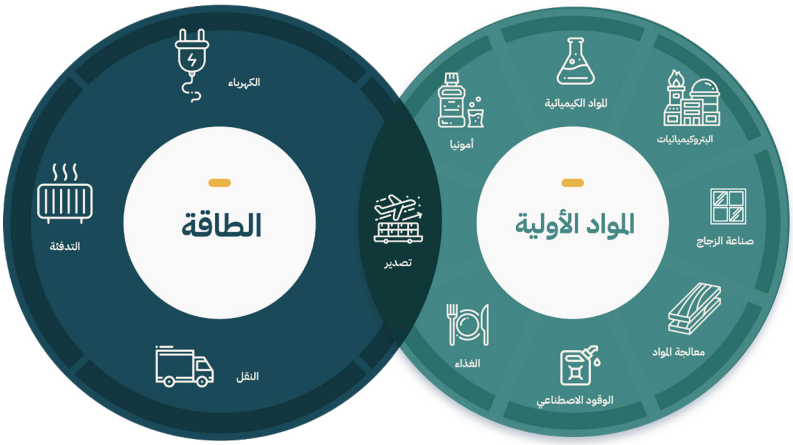
يعتبر الهيدروجين الفيروزي جديدًا نسبيًا على مخطط الألوان ولم يتم إثبات جدواه عمليا بعد. يُستخدم الانحلال الحراري للميثان لإنتاج الهيدروجين الفيروزي، والذي يستخدم عادةً لإنتاج الهيدروجين والكربون الصلب. في السنوات القادمة، قد يثبت هذا النوع من الهيدروجين قيمته باعتباره هيدروجينًا منخفض الانبعاثات، يتم إنتاجه بواسطة العمليات الحرارية التي تعمل بالطاقة المتجددة (ناشونال جريد، ٢٠٢١).

الهيدروجين الوردي

يتم إنتاج الهيدروجين الوردي (يشار إليه أيضًا باسم الهيدروجين الأرجواني أو الهيدروجين الأحمر) من خلال التحليل الكهربائي المدعوم بالطاقة النووية (ناشونال جريد، ٢٠٢١).

٢.٤ تطبيقات الهيدروجين

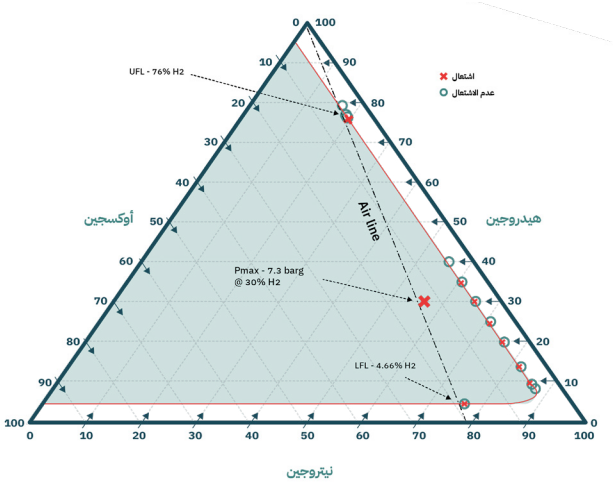
وفقًا لبروس وآخرون (٢٠١٨)، بينما يُستخدم الهيدروجين بشكل أساسي في مجموعة متنوعة من الصناعات مثل البترول والأسمدة والمواد الكيميائية والأغذية، إلا أنه يمكن استخدامه في تطبيقات مختلفة (انظر الشكل ١). ينص أيضًا على أنه "إذا تم إنتاجه باستخدام مصادر منخفضة أو معدومة الانبعاثات، فيمكن للهيدروجين (النظيف) تمكين إزالة الكربون بشكل جذري في قطاعي الطاقة والصناعة". ويتحقق ذلك من خلال تقليل استهلاك الوقود الكربوني، من بين وسائل أخرى. توجد تطبيقات أخرى للهيدروجين في قطاع الطاقة، حيث يتم استخدامه بشكل أساسي كوقود للتدفئة أو لتوليد الكهرباء أو في النقل (بروس وآخرون، ٢٠١٨).



الشكل ١ تطبيقات الهيدروجين (بروس وآخرين، ٢٠١٨)

٢.٤.١ التخزين والاحتواء

في معظم الحالات، يتم تخزين كميات صغيرة من الهيدروجين إما في شكل غاز أو سائل مضغوط. كما يتم استخدام طرق أخرى تسمح باستخدام الهيدروجين مباشرة، مما يجعل من السهل تخزين الهيدروجين باستخدام الطرق التقليدية. علاوة على ذلك، الهيدروجين له قابلية عالية على الاشتعال في جميع التركيزات تقريبًا في الهواء. وبالتالي، فإنه يعتبر من الغازات شديدة الخطورة. ويتم تخزين الغاز في الغالب تحت ضغوط عالية، مما يؤدي إلى حدوث انفجار وخطر نشوب حريق.



الشكل ٢ مخطط القابلية للاشتعال لغاز الهيدروجين (المنطقة الملونة تمثل القابلية للاشتعال (فراولي، ٢٠٢١)

يوضح مخطط القابلية للاشتعال الثلاثي المنطقة التي يصبح فيها الغاز قابلاً للاشتعال بوجود الأكسجين والغاز الخامل (النيتروجين (N_2)) بتركيزات مختلفة. في الشكل ٢، يتقاطع خط الهواء مع منطقة القابلية للاشتعال للهيدروجين عند حدي القابلية للاشتعال، والمشار إليهما بالحد الأعلى من القابلية للاشتعال (UFL) والحد الأدنى من القابلية للاشتعال (LFL). يشير هذا إلى نطاق تركيز غاز الهيدروجين الذي يكون فيه قابلاً للاشتعال. يوضح الشكل ٢ مدى القابلية للاشتعال لغاز الهيدروجين؛ الغاز قابل للاشتعال في جميع الظروف تقريبًا في وجود الأكسجين. يوضح الجدول ١ مقارنة بين حدود قابلية الهيدروجين للاشتعال وتلك الخاصة بالغازات الأخرى. يعد تخزين غاز الميثان (غاز الميثان هو المكون الرئيسي للغاز الطبيعي) أكثر أمانًا بسبب النطاق الأصغر لقابلية الاشتعال.

الجدول ١ النسبة المئوية لحدود القابلية للاشتعال للغازات المختلفة (ماتي وآخرون، ٢٠٢٠)

اسم الغاز	حدود التفجير		حدود الاحتراق الدنيا	
	أعلى	أدنى	أكسجين	غاز
الميثان	١٥,٠	٥,٠	١٢,٢	٥,٩
أول أكسيد الكربون	٧٤,٠	١٢,٠	٦,١	١٣,٨
هيدروجين	٧٤,٠	٤,٠	٥,١	٤,٣

التخزين كغاز أو سائل مضغوط

بينما يتم تخزين معظم أنواع الوقود في صورة سائلة، فإن تسييل الهيدروجين مكلف وخطير. ويرجع ذلك إلى الحاجة إلى الضغط العالي وكذلك الحجم الجزيئي الصغير. القطر الجزيئي الصغير للهيدروجين، كما هو موضح في الجدول ٢،يعني أن الغاز يميل إلى الهروب من الاحتواء وهو مؤشر على أن التخزين لفترات طويلة وتحت ضغط مرتفع قد يتسبب في فقد المواد. عادة، ينبعث هذا الغاز من المعدن عن طريق توجيهه عبر المسامات. وبالتالي، تختلف طرق تخزين الهيدروجين عن تلك الخاصة بالوقود السائل أو الغازات الثقيلة (فريود، ٢٠٠٤).

الجدول ٢: قطر حجم اللا انضغاط لجزيئات الغاز المختلفة (فريود، ٢٠٠٤)

Molecule	قطر حجم اللا انضغاط d (Å) / ١٠ Å = ١ nm
هيدروجين سائل (H_2)	٢,٧٦
أكسجين (O_2)	٢,٩٣
ثاني أكسيد الكربون (CO_2)	٣,٢٤
بنزين (C_6H_6)	٤,٥٠

الامتزاز

يمكن تخزين الهيدروجين على سطح مواد أخرى باستخدام ظاهرة تسمى الامتزاز (Adsorption). يمكن أن تعمل عملية الامتزاز تحت درجة حرارة وضغط معتدلين. حركية الامتزاز سريعة وقابلة للعكس بشكل كامل. من المواد الشائعة جدًا التي يتم تطويرها على نطاق واسع في الكيمياء الاصطناعية هي الأطر المعدنية العضوية (MOF). تبلغ مساحة السطح المعدني العضوي حوالي ٦٠٠٠ م٢/ جم، مقارنة بالكربون المنشط والبوليمرات المسامية التي تبلغ ٣٠٠٠ م٢/ جم فقط (بيمبو، ٢٠١٩).

التخزين في مركبات كيميائية مثل الأمونيا (NH_3)

من المعروف أن الأمونيا تحتوي على كثافة عالية من الهيدروجين يمكن تخزينها في الظروف العادية إلى المعتدلة كغاز أو سائل. بينما لا تتضمن ظروف خطرة مثل درجة الحرارة والضغط من أجل الحصول على غاز الهيدروجين، يجب أن تخضع الأمونيا لتفاعل محفز للتحلل (بيمبو، ٢٠١٩).

الجدول ٣ تأثير طرق تخزين الهيدروجين المختلفة على عوامله الفيزيائية المتعددة (بيمبو، ٢٠١٩)

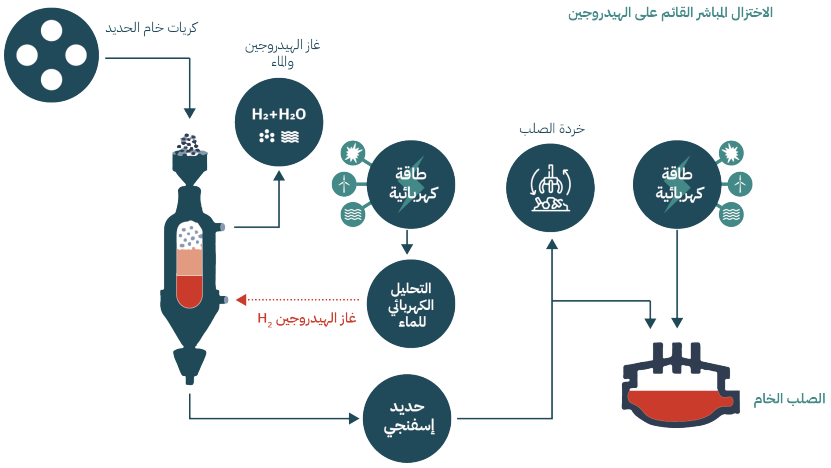
طريقة التخزين	الهيدروجين السائل	الهيدروجين المضغوط	الضغط المبرد	الامتزاز في مادة مسامية	هيدريد معدني	الهيدريدات المعقدة
مواد ممثلة	-	-	-	$MOF\text{-}_{210}$	$LaNi_5H_6$	$Mg(BH_4)_2$
النسبة المئوية الوزنية للهيدروجين السائل	١٠٠,٠	١٠٠,٠	١٠٠,٠	٩,٠	١,٥	١٤,٩
درجة حرارة التشغيل (الدرجة المئوية)	-٢٥٣	٢٥	-٢٥٣ إلى -١٩٦	-١٩٦	٣٠-٠	٣٢٠-٢٥
الضغط (بالميجا باسكال)	٠,١ - ١	٣٥ أو ٧٠	١٠ - ٧٠	١ - ٥	٠,١	٠,١
الكثافة الحجمية (بالكيلو جرام للهيدروجين السائل لكل م3)	٧٠,٣	٢٣,٢ (٣٥ ميجا باسكال) ٣٩,٠ (٧٠ ميجا باسكال)	٤٥,٠	٤٤,٠	١٠٨,٠	١٤٦,٠

٢.٤.٢ الاستخدام الصناعي

بالإضافة إلى تطبيقاته في قطاع الطاقة، فإن الهيدروجين هو المكون الرئيسي في العديد من الصناعات الأخرى. فهو يستخدم بشكل شائع لإنتاج الأمونيا، وهو مكون رئيسي للأسمدة، ويستخدم أيضًا في تكرير النفط وإنتاج الفولاذ. بالنسبة لبعض الصناعات، يتم إنتاج الهيدروجين في الموقع من خلال التحليل الكهربائي أو إعادة التشكيل البخاري أو كمنتج ثانوي. علاوة على ذلك، غالبًا ما يستخدم الهيدروجين في صناعة المواد الغذائية لإنتاج الدهون المهدرجة مثل المارجرين كبديل نباتي للزبدة.

إنتاج الفولاذ

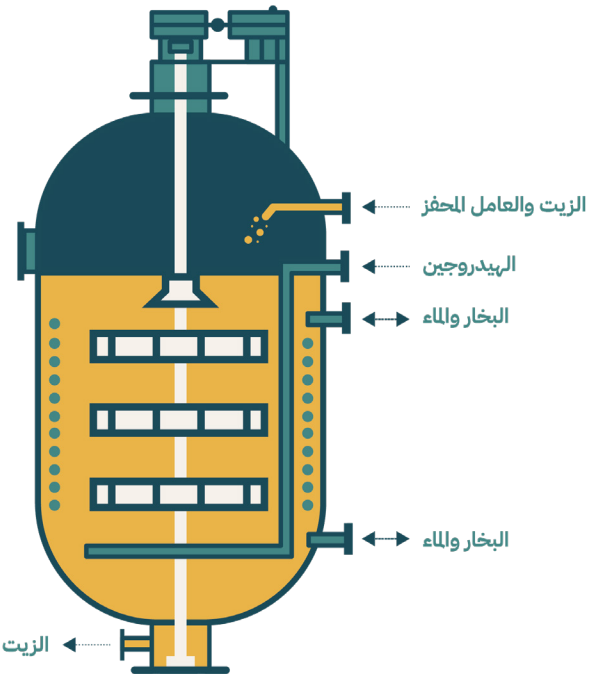
إنتاج الفولاذ هو عملية تحويل خام الحديد باستخدام الفحم. ويُطلق على إجراء بديل لتحويل خام الحديد باستخدام الهيدروجين الاختزال المباشر. ينتج عن استخدام الهيدروجين، كما هو موضح في الشكل ٣، الماء بشكل أساسي، على عكس الطريقة التقليدية التي تنبعث منها ثاني أكسيد الكربون (ساندر-جرين، ٢٠٢٠).



الشكل ٣ إنتاج الحديد المختزل المباشر من الهيدروجين كبديل للكربون (الفحم) (ساندر-جرين، ٢٠٢٠)

إنتاج الأغذية

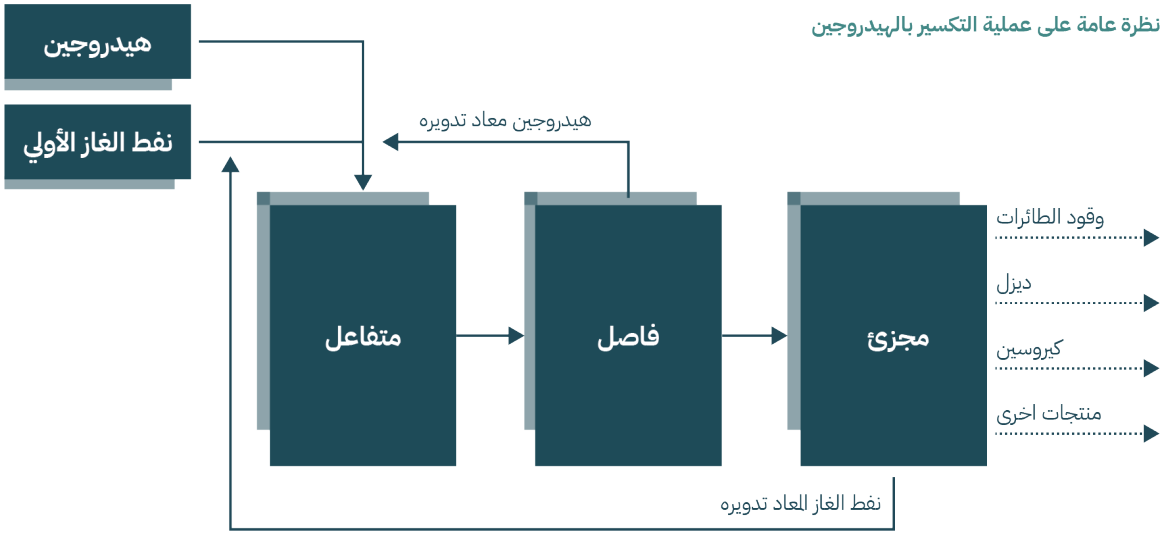
تُستخدم أنواع مختلفة من الدهون في صناعة المواد الغذائية. تعتبر الدهون المشبعة وغير المشبعة المصطلحين الرئيسيين في التصنيف. روابط الدهون المشبعة كلها مشبعة بالهيدروجين. لديهم نقطة ذوبان أعلى وتظل صلبة في درجة حرارة الغرفة، مثل الزبدة. لهذا السبب، يفضلون لإنتاج سلع مثل زبدة الفول السوداني. يتم إنتاج الدهون المشبعة من خلال عملية هدرجة الدهون غير المشبعة، مثل الزيوت النباتية. بوجود عامل محفز، يتفاعل الهيدروجين مع الدهون غير المشبعة لإنتاج دهون مشبعة (انظر الشكل ٤).



الشكل ٤ استخدام الهيدروجين في إنتاج الدهون المهدرجة (شري هاري فابتيك، ٢٠١٨)

تكرير البترول

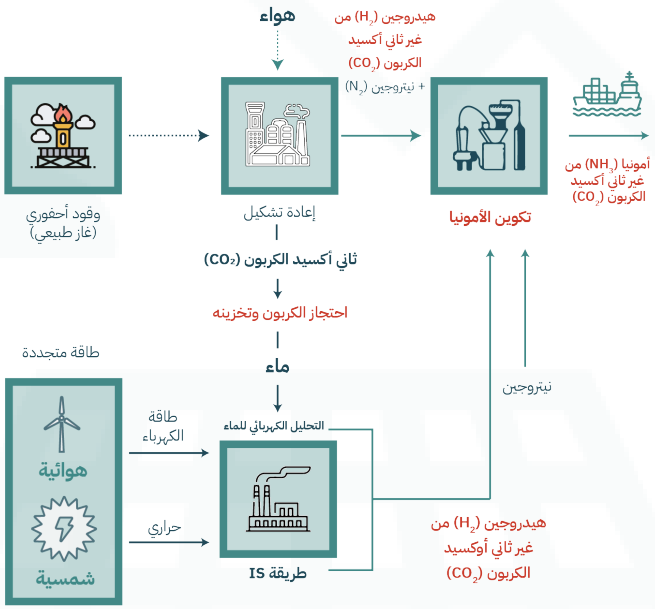
التكسير الهيدروجيني هو عملية تقليل طول سلسلة النفط لإنتاج أنواع وقود أخف من الزيوت الثقيلة (انظر الشكل ٥). في هذه العملية، يلعب الهيدروجين دور المتفاعل. يرتبط بسلاسل النفط حتى تنكسر الرابطة، مما يعمل على استقرار الوقود المنتج (EIA، ٢٠١٣).



الشكل ٥ استخدام الهيدروجين في تحويل الزيوت الثقيلة إلى زيوت أخف (EIA، ٢٠١٣)

الأمونيا والأسمدة النباتية

إنتاج الأمونيا هو أساس الأسمدة النيتروجينية. المادة الخام الرئيسية اللازمة لإنتاج الأمونيا هي النيتروجين والهيدروجين. يتفاعل كلا الغازين في وجود محفز (انظر الشكل ٦).



الشكل ٦ إنتاج الأمونيا من الهيدروجين كمفاعل رئيسي (JGC، دون تاريخ)

٢.٤.٣ النقل وخلايا الوقود

لطالما اعتمدت تكنولوجيا النقل على استخدام الوقود الأحفوري. على الرغم من وجود مركبات تعمل بالكهرباء، إلا أن الدورة لم تصل بعد إلى بصمة كربونية محايدة. أيضًا، على الرغم من كل التقنيات المتاحة لتشغيل المركبات بالكهرباء، فإن الاعتماد على البطاريات له عيوب. عمر البطارية محدود، ولا يزال إعادة تدوير بطاريات السيارات قيد التطوير، وشحن البطاريات بطيء نسبيًا، مقارنة بالوقت اللازم لملء السيارة بالوقود. لهذه الأسباب، يعتبر الهيدروجين حلاً نظيفًا وعمليًا (دفتون، ٢٠١٦).

■ لماذا النقل؟

نظرًا لوجود قلق متزايد بشأن تغير المناخ وتأثيره على الصحة العامة، فمن الضروري إدارة الانبعاثات الناتجة عن وسائل النقل. هذه الانبعاثات متنقلة وتتمحور حول المدينة، وبالتالي يكون لها تأثير أكبر على الصحة العامة. يمكن استخدام الهيدروجين في مجموعة واسعة من التطبيقات في مجال النقل. تشمل بعض هذه التطبيقات التوزيع، وتخزين الطاقة المتجددة، وأنظمة الجمع بين الحرارة والقدرة، والتجارية (الشاحنات، والطيران، والبحرية، والسكك الحديدية، والحافلات) والنقل غير التجاري، مثل السيارات، والطاقة الاحتياطية، والطاقة المساعدة، والطاقة المحمولة. تهدف إلى الوصول إلى حالة قريبة من انعدام انبعاثات الكربون.

يمكن تحقيق النتائج المؤثرة التالية الخاصة بالنقل:

- يمكن لمركبات الطرق السريعة الخفيفة التي تستخدم البنزين تقليل الانبعاثات بنسبة ٥٠٪ إلى ٩٠٪.
- يمكن للمركبات المتخصصة تقليل الانبعاثات بنسبة تزيد عن ٣٥٪، مقارنة بشاحنات الرفع التي تعمل بالديزل والبطارية.
- يمكن أن تكون حافلات النقل اقتصادية ٥ مرات أكثر من محركات الاحتراق الداخلي التي تعمل بالديزل.
- يمكن أن تقلل أنظمة الجمع بين الحرارة والقدرة الانبعاثات بنسبة ٣٥٪ إلى ٥٠٪، وهو أكثر من المصادر الحالية المعروفة للحرارة والطاقة. ويمكن أن يكون خفض الانبعاثات في أنظمة الجمع بين الحرارة والقدرة أكثر من ٨٠٪ عندما تستخدم خلايا الوقود مصدرًا منخفض الكربون أو خالٍ من الكربون للهيدروجين أو الغاز الحيوي.
- يمكن لحافلات النقل أن تقتصد في الوقود بما يقرب من ١,٥ مرة أكثر من الحافلات ذات محركات الديزل الاحتراق الداخلي ومرتين أكثر من حافلات الاحتراق الداخلي التي تعمل بالغاز الطبيعي.
- يمكن لوحدات الطاقة الإضافية أن تنبعث منها نسبة ٦٠٪ أقل من الكربون أثناء تباطؤ محرك الشاحنة.

تمامًا مثل الخلايا الكهروضوئية والمركبات التي تعمل بالطاقة الكهربائية، ستواجه سلسلة توريد الهيدروجين العديد من التحديات مثل التكلفة واختراق السوق والتقدم التكنولوجي والتوافر. يجب أن تكون وتيرة استخدام الهيدروجين وسوقه بالتوازي مع وتيرة إنتاج التقدم التكنولوجي. خلاف ذلك، لن يكون لصناعة الهيدروجين سوق، أو يجب أن يتوافق مع السوق الاستهلاكية.

٢.٤.٤ استبدال الغاز الطبيعي

في حين أن إنتاج الهيدروجين من الألواح الضوئية لتوليد الطاقة لا يبدو قابلاً للتطبيق، فإن إنتاج الهيدروجين من الطاقة على مدى فترة طويلة هو طريقة فعالة ومستقرة لتخزين الطاقة وتوفير مصدر آمن للطاقة في المستقبل. يمكنها حتى أن تحل محل الغاز الطبيعي وتعمل كمصدر للطاقة للعديد من التطبيقات. مؤشر وبي (Wobbe) هو مؤشر على ما إذا كان يمكن استبدال الغاز الطبيعي بالهيدروجين. يأخذ مؤشر وبي في الاعتبار الخصائص الفيزيائية لغاز الوقود وقيمته الحرارية. قيم مؤشر الهيدروجين والغاز الطبيعي قريبة بدرجة كافية، مما يشير إلى أن كلا من غاز الهيدروجين والغاز الطبيعي قابلين للتبادل، اعتمادًا على التطبيق. والمزج هو مثال على هذا الاستبدال. وفقًا لخريطة طريق الهيدروجين الوطنية الأسترالية، تم تخصيب خطوط الغاز الطبيعي بالهيدروجين بنسبة تصل إلى ٢٠٪ من حيث الحجم دون الحاجة إلى ترقيات المواد أو تغييرات البنية التحتية (بروس وآخرون، ٢٠١٨).

٢.٥ أنواع الطاقة-إلى-X

يمكن تحويل الطاقة إلى العديد من الأشكال المفيدة. باستخدام العديد من الطرق، يمكن تحويل الطاقة إلى هيدروجين اعتمادًا على مصدر الطاقة. يمكن أيضًا تحويلها إلى أشكال أخرى من الطاقة، مثل الحرارة والكهرباء، وكذلك إلى الوقود السائل والغازي ، أو حتى مواد كيميائية. في هذا الفصل، سيتم وصف أنواع الطاقة-إلى-X بمزيد من التفصيل.

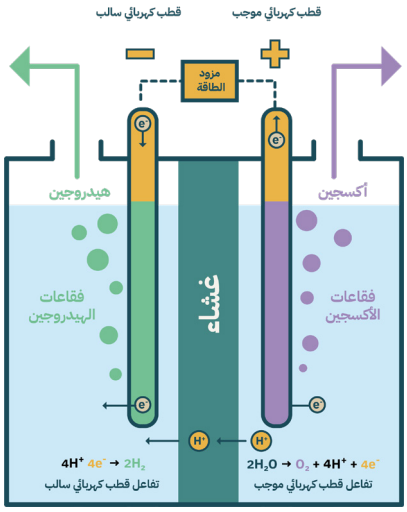
٢.٥.١ الطاقة-إلى-الهيدروجين

يعتبر كل من الماء والميثان مصادر مختلفة لتكوين الهيدروجين. ومع ذلك، يتكون الماء من ١١,١٢٪ هيدروجين ينتج عن طريق التحليل الكهربائي، بينما يتكون غاز الميثان من ٢٥,١٣٪ هيدروجين ينتج من خلال إعادة التشكيل البخاري. هذه المقارنة ليست في الواقع مؤشرًا رئيسيًا، ولكن هناك عوامل أخرى مثل التكلفة وتوافر التكنولوجيا والأثر البيئي هي بعض من العديد من مؤشرات صنع القرار.

طرق الإنتاج

التحليل الكهربائي

يعد إنتاج الهيدروجين والأكسجين من خلال التحليل الكهربائي للمياه من أكثر التقنيات شهرة لإنتاج المواد الكيميائية من الكهرباء. سيؤدي مرور التيار الكهربائي عبر الماء إلى تقسيم الجزيئات، مما ينتج عنه غاز الهيدروجين النقي والأكسجين (انظر الشكل ٧). هذه العملية لديها التأثير الأقل على انبعاثات غازات الدفيئة. ومع ذلك، فإن قضايا التكلفة والتخزين تشكل حواجز أمام تكوين الهيدروجين من خلال التحليل الكهربائي.



الشكل ٧ خلية التحليل الكهربائي لإنتاج غاز الهيدروجين (مكتب كفاءة الطاقة والطاقة المتجددة، دون تاريخ)

يمثل التفاعل التالي انقسام جزيئات الماء لإنتاج غاز الهيدروجين والأكسجين. (تقسيم الماء هو تفاعل ماص للحرارة (يتطلب طاقة)):

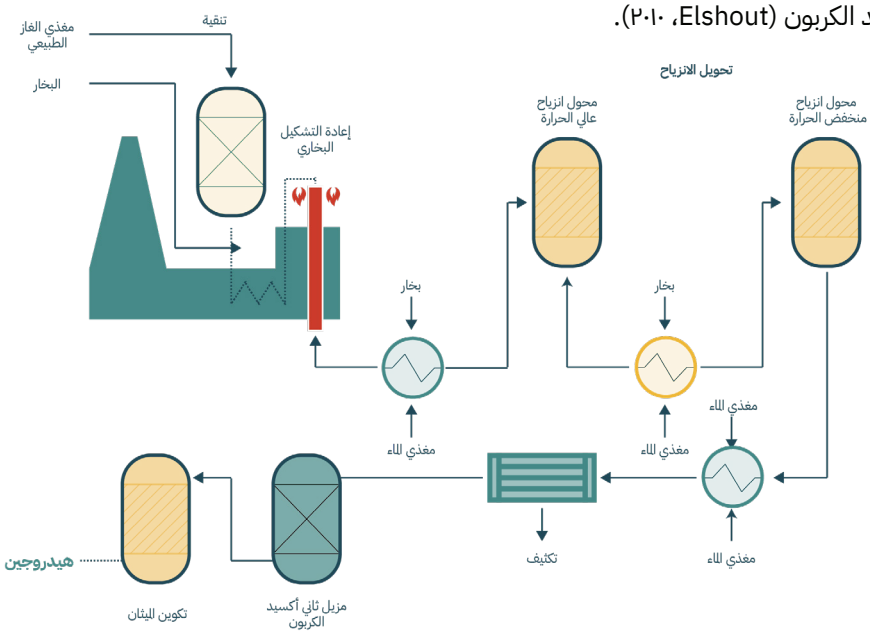
$$2H_2 + O_2 <-> \text{طاقة} + 2H_2O$$

الحد الأدنى من الطاقة اللازمة للتفاعل لإنتاج كيلوغرام واحد من الهيدروجين هي حوالي ٤٠ كيلو وات في الساعة عند درجة حرارة قياسية تبلغ ٢٥ درجة مئوية وضغط ١ (فيلدر وروسو، ٢٠٠٥). باستخدام المعادلة التالية، يمكن حساب الحد الأقصى التقريبي لإنتاج الهيدروجين الذي يمكن إنتاجه من محطة طاقة معينة:

$$\text{أقصى إنتاج لغاز الهيدروجين (كجم)} = \frac{\text{إنتاج الطاقة من محطة توليد كهرباء (كيلوميترات في الساعة)}}{٤٠}$$

■ إعادة التشكيل البخاري لغاز الميثان

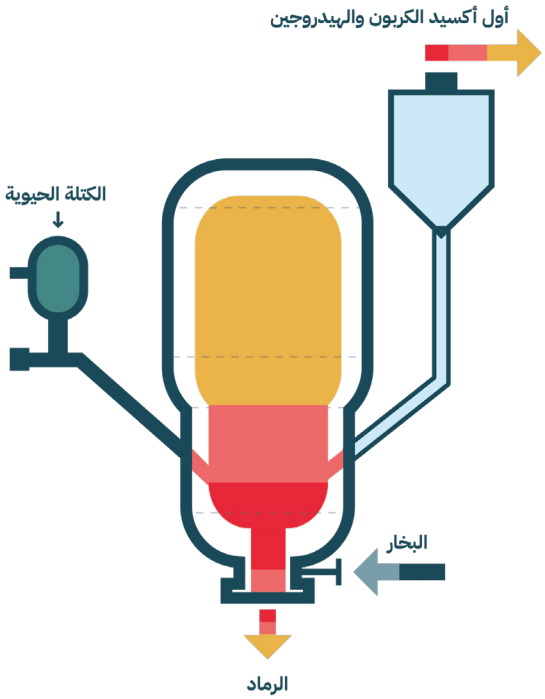
طريقة أخرى لإنتاج الهيدروجين هي من خلال إعادة التشكيل البخاري لغاز الميثان، كما هو موضح في الشكل ٨. من خلال هذه الطريقة، يتم حقن البخار عالي الضغط في غاز الميثان لإنتاج غاز الاصطناع (Syngas)، وهو خليط من الهيدروجين وأول أكسيد الكربون. ثم يتم تحويل أول أكسيد الكربون السام إلى ثاني أكسيد الكربون (Elshout، ٢٠١٠).



الشكل ٨ إعادة التشكيل البخاري للغاز الطبيعي لإنتاج الهيدروجين (Elshout، ٢٠١٠)

التغويز

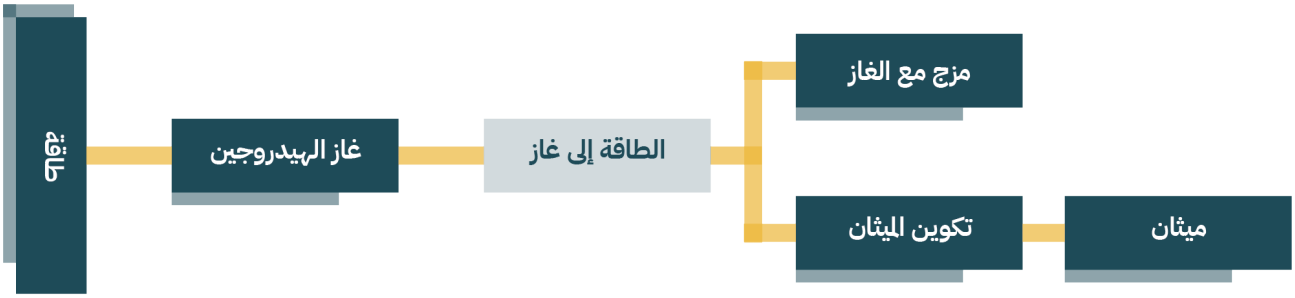
التغويز هو عملية حرارية تحول المواد العضوية إلى هيدروجين وأول أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكربون من خلال تطبيق درجات حرارة عالية. هذه العملية لها تطبيق معروف في صناعة البترول والفحم لتوليد الكهرباء عن طريق تحويل الفحم والزيوت الثقيلة إلى غازات. تمر العملية بعدة مراحل، كما هو موضح في الشكل ٩. تبدأ العملية بحرق المادة الأولية، تليها مرحلة التبريد ومرحلة أخيرة من معالجة الغاز، والتي تستهدف إزالة أي شوائب مثل أول أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكربون والماء (المختبر الوطني لتكنولوجيا الطاقة، بدون تاريخ).



الشكل ٩ عملية تغويز الكتلة الحيوية (Shaohua، ٢٠٠٩)

٢.٥.٢ الطاقة إلى غاز

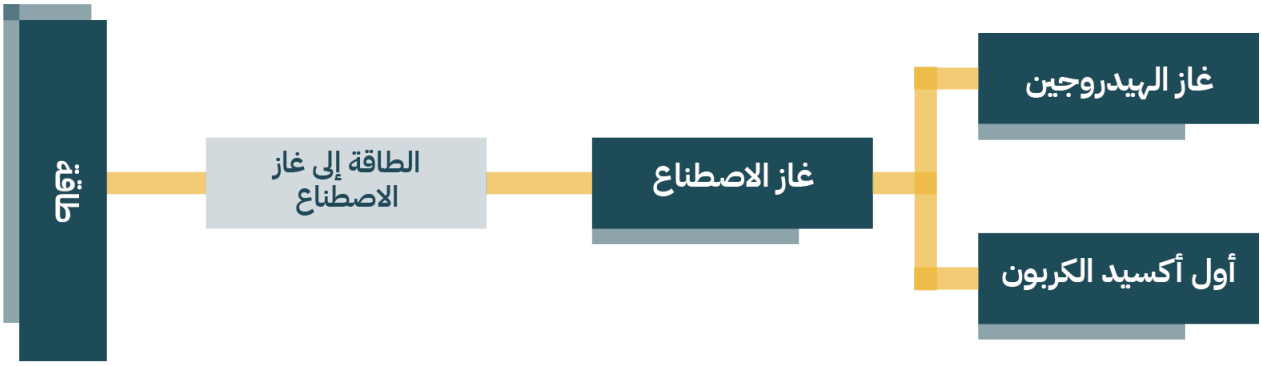
عند استخدام الهيدروجين في نظام خط الغاز وحقنه بالغاز الطبيعي، لا تتطلب البنية التحتية تغييرات كبيرة في المادة أو التصميم (انظر الشكل ١٠). وبدلاً من ذلك، يمكن إنتاج الميثان من خلال هدرجة ثاني أكسيد الكربون باستخدام الهيدروجين. تتضمن العملية نزع الكربون من الغلاف الجوي وإنتاج وقود الميثان.



الشكل ١٠ الطاقة إلى الغاز

٢.٥.٣ الطاقة إلى غاز الاصطناع

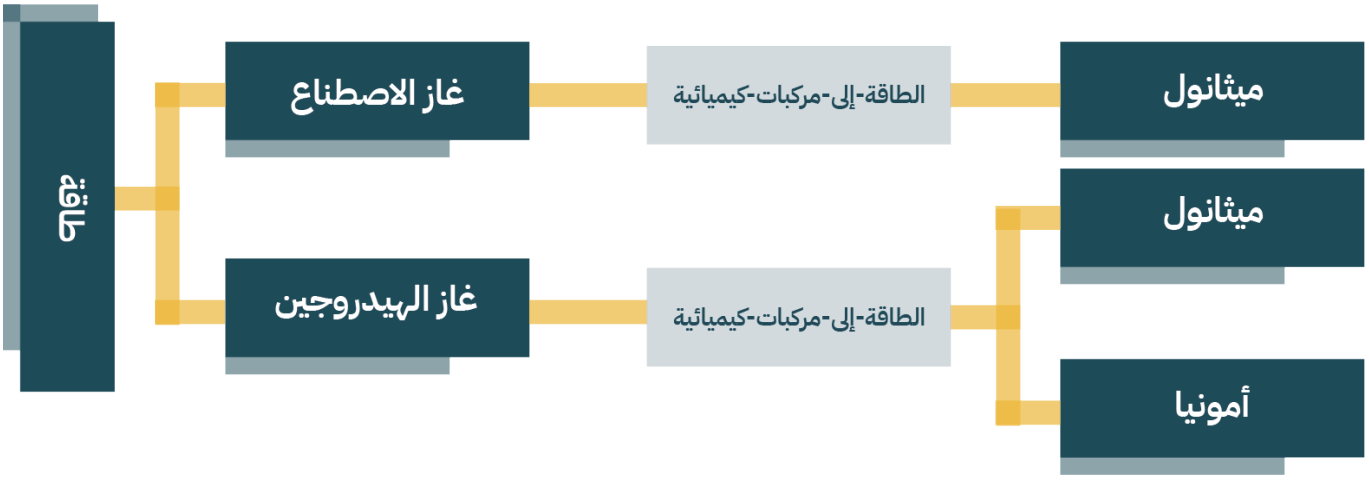
كما هو مبين في الشكل ١١، عند استخدام طريقة إعادة التشكيل البخاري لغاز الميثان، أو تغويز الفحم والكتلة الحيوية الصلبة لإنتاج الهيدروجين، يتم إنتاج ثاني أكسيد الكربون. يسمى هذا المزيج من الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون بالغاز الاصطناعي، ويمكن استخدامه كوقود وكمادة أولية لإنتاج مواد كيميائية أخرى مثل الميثانول.



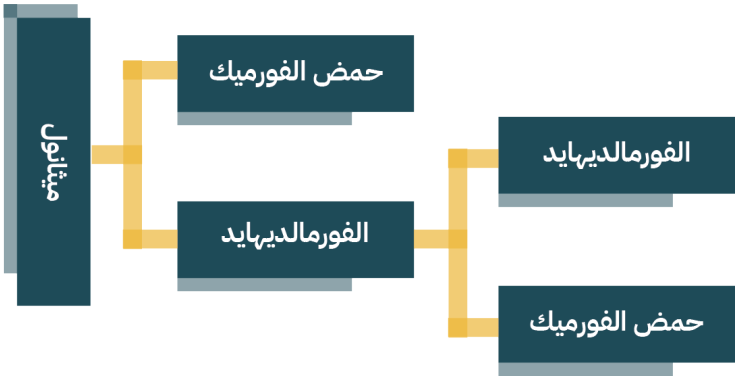
الشكل ١١ الطاقة إلى غاز الاصطناع

٢.٥.٤ الطاقة إلى مركبات كيميائية

يوضح الشكل ١٢ مثالاً على الطاقة-إلى-مركبات-كيميائية حيث يتم استخدام غاز الاصطناع لإنتاج الميثانول. الميثانول هو سائل غني بالهيدروجين، ويمكن استخدامه لتخزين الهيدروجين كيميائيًا. في الواقع، للميثانول تطبيق صناعي أوسع (انظر الشكل ١٣). يستخدم بشكل شائع كمادة وسيطة لإنتاج حمض الفورميك (HCO_2H) والفورمالديهايد (H_2CO)، وهما من المواد الكيميائية شائعة الاستخدام في الصناعة. يمكن أيضًا إنتاج حمض الفورميك من هدرجة ثاني أكسيد الكربون. مثال آخر على الطاقة-إلى-مركبات-كيميائية هو إنتاج الأمونيا، والذي تم شرحه سابقًا.



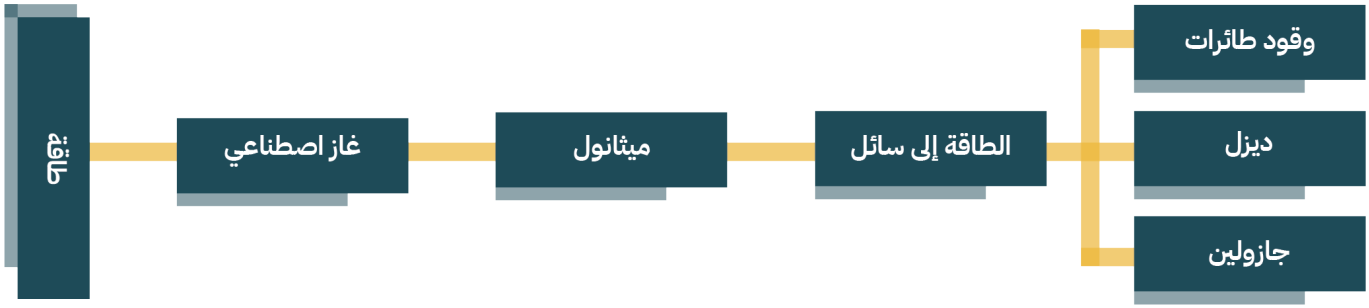
الشكل ١٢ الطاقة إلى مركبات كيميائية



الشكل ١٣ الميثانول إلى مركبات كيميائية

٢.٥.٥ الطاقة إلى سائل

يعتبر الميثانول أيضًا مادة أولية مهمة لإنتاج الأوليفينات وثنائي ميثيل الأثير والوقود السائل، مثل وقود الطائرات ووقود الجازولين ووقود الديزل أو الألكانات بشكل عام (انظر الشكل ١٤). يعتبر ناقل مناسب للطاقة حيث يتم تخزينه في صورة سائلة. وبهذا، فمن الأسهل التعامل معه ونقله.



الشكل ١٤ الطاقة إلى سائل

الطاقة إلى طاقة

يمكن استخدام الهيدروجين مباشرة لتوليد الكهرباء أو الطاقة، مما يلغي المصدر الرئيسي لانبعاثات الكربون في قطاع الطاقة والنقل.

الطاقة إلى حرارة

نظرًا لأن الهيدروجين له كثافة حرارية عالية، يمكن استخدامه كوقود تسخين بديل للفحم والغاز الطبيعي. قد تختلف تطبيقات التدفئة من المباني إلى التدفئة الصناعية كما هو الحال في الاختزال المباشر القائم على الهيدروجين لأكسيد الحديد. يمكن أيضًا تحويل الطاقة مباشرة إلى كهرباء لتوفير الحرارة.

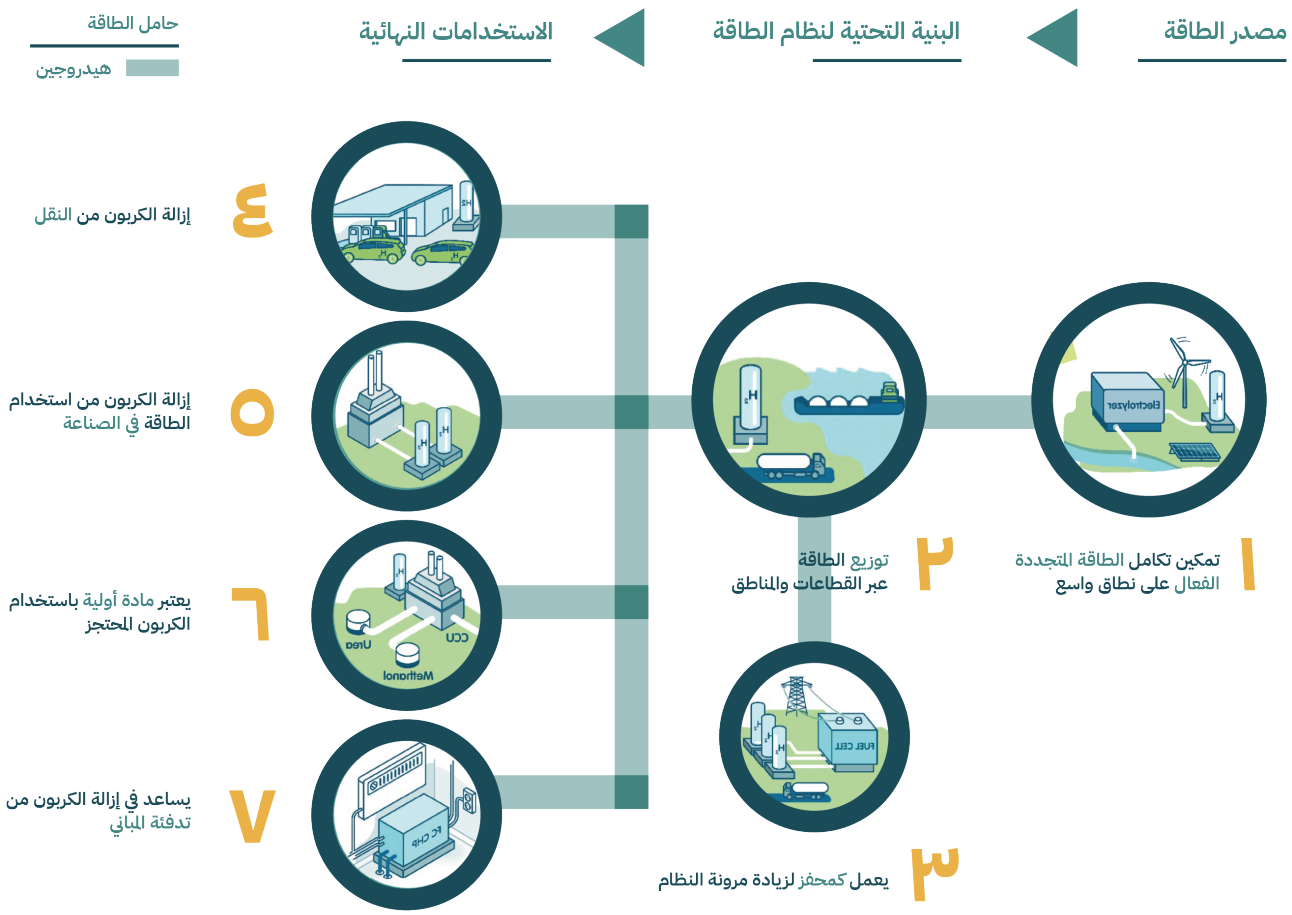
١ دور الطاقة-إلى-X في تحول استخدام الطاقة

٣.١ تعريف تحول استخدام الطاقة

يعتبر تحول استخدام الطاقة، كما حددته الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA)، "طريقًا نحو تحول قطاع الطاقة العالمي من الاعتماد على الوقود الأحفوري إلى صفرية الكربون بحلول النصف الثاني من هذا القرن" (IRENA، ٢٠٢٠). ومع ذلك، فإن التحول من الوقود الأحفوري إلى موارد الطاقة النظيفة، مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح أو المياه، يواجه العديد من التحديات. يعد تقطع الطاقة أحد أكبر تحديات التحول إلى الطاقة المتجددة في قطاع الكهرباء. يمكن التغلب على هذا التحدي باستخدام الهيدروجين الأخضر لإدارة الانتقال إلى نسبة أكبر من الكهرباء المتجددة في شبكة الطاقة. تتمثل إحدى السمات الرئيسية للهيدروجين الأخضر في قدرته على تحسين استخدام الطاقة المتجددة من خلال دمجها بشكل صحيح مع القطاعات القائمة بالفعل، مثل الكهرباء والغاز والنقل (بروس وآخرون، ٢٠١٨).

لتحقيق نظام اقتصادي أكثر استدامة، يجب إزالة الكربون عن قطاع الطاقة وتحقيق مزيج طاقة متنوع. تستمر الانبعاثات العالمية في الارتفاع، على الرغم من التطورات الهامة في مجال الطاقة المتجددة. ويجب اتخاذ إجراءات عاجلة لتقديم حلول طاقة أنظف، وتحسين كفاءة الطاقة، وتسريع الاستثمارات والابتكار في احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه.

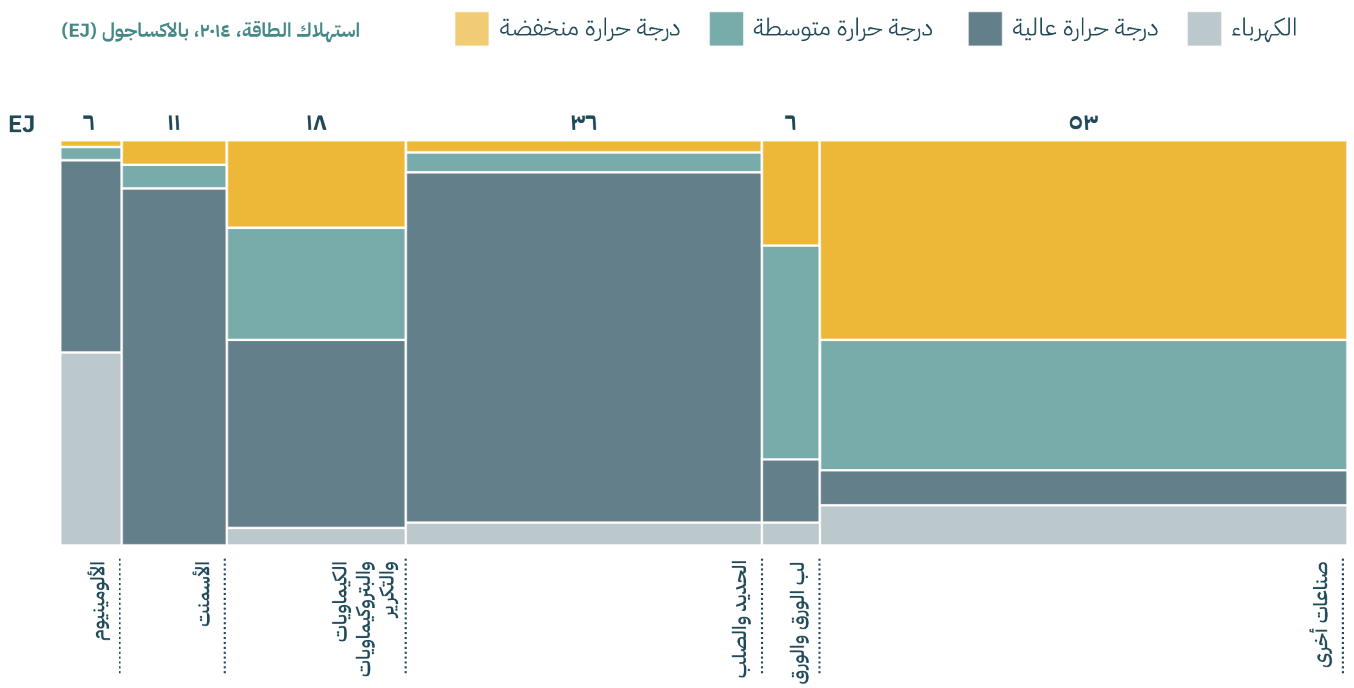
تتمثل الرؤية لاقتصاد الهيدروجين في المستقبل في استخدام الهيدروجين الأخضر كوقود في مجموعة متنوعة من القطاعات، مثل الصناعة وتوليد الطاقة والتدفئة والنقل. الهدف هو تجنب الاستثمارات في البنية التحتية للهيدروجين من خلال استخدامه كمواد خام لإنتاج أنواع وقود اصطناعية أخرى خالية من الكربون لتسهيل التخزين (جولدن، ٢٠٢١).



الشكل ١٥ الأدوار التي يمكن أن يلعبها الهيدروجين في إزالة الكربون من القطاعات الرئيسية

٣.٢ قطاع الصناعة

يعد قطاع الصناعة من أكبر مستهلكي الطاقة. وفقًا لمجلس الهيدروجين (٢٠١٧ ب)، "تستهلك خمس صناعات فقط ثلثي إجمالي الطاقة: الألمنيوم والكيماويات والبتروكيماويات والتكرير". يصرح مجلس الهيدروجين (٢٠١٧ ب) أيضًا بأن صناعات الأسمنت والحديد والصلب ولب الورق والورق يحتاجون إلى كميات هائلة من الطاقة لتشغيل الغلايات ومولدات البخار والأفران. يوضح الشكل ١٦ النسبة العالية من الطاقة المستخدمة في درجات الحرارة العالية في الصناعات الثقيلة.



الشكل ١٦ تشكل الحرارة العالية الدرجة جزءًا كبيرًا من استخدام الطاقة في الصناعات الثقيلة (مجلس الهيدروجين، ٢٠١٧ب)

يمكن تنفيذ العديد من الأساليب لإزالة الكربون من قطاع الصناعة:

- **استخدام الأجهزة والتقنيات الموفرة للطاقة ومواد إعادة التدوير.**
- **استخدام الوقود الحيوي والكهرباء المتجددة و/ أو الهيدروجين بدلاً من الوقود الأحفوري.**
- **استخدام احتجاز الكربون وتخزينه أو احتجاز الكربون واستخدامه (مجلس الهيدروجين، ٢٠١٧ب).**

ستساهم الصناعات كثيفة الاستخدام للطاقة والتي تتبنى الهيدروجين كبديل في دفع هذا القطاع نحو تحقيق أهداف خفض ثاني أكسيد الكربون الوطنية والعالمية. ويمكن استخدام الهيدروجين لإزالة الكربون في الصناعات المختلفة المذكورة أعلاه. ويمكن استخدام الهيدروجين من الطاقة المتجددة ليحل محل الوقود الأحفوري في قطاعات الاستخدام النهائي. سيؤدي هذا إلى تحويل هذه الصناعات إلى أن تصبح صديقة للبيئة بالكامل. لتحقيق هذا الهدف، يجب تنفيذ العديد من التطبيقات، مثل استبدال الغاز الطبيعي وأنواع الوقود الأحفوري الأخرى بالهيدروجين للحصول على حرارة عالية الجودة (> ٦٥٠ درجة مئوية). يتم ذلك من خلال احتراق الهيدروجين في مواقد الهيدروجين المتخصصة.

هناك تطبيق آخر وهو في أفران الصهر لصناعة الحديد، حيث تستخدم فحم الكوك لتوليد الحرارة وصهر الحديد. تتيح هذه العملية تفاعلًا كيميائيًا بين الأكسجين في خام الحديد وأقطاب الكربون في فحم الكوك لصهر الخام إلى حديد. في هذه الحالة، يمكن تعديل المعدات باستخدام الهيدروجين (أو باستخدام الهيدروجين أو مزيج من الهيدروجين وأنواع الوقود الأخرى القابلة للاحتراق) لتعزيز حرارة الفرن العالي (مجلس الهيدروجين، ٢٠١٧ب).

٣.٣ قطاع النقل

قطاع النقل هو قطاع آخر يعتمد بالكامل تقريبًا على الوقود الأحفوري. وهو مساهم رئيسي في غازات الدفيئة حيث تصدر أكثر من ٢٠٪ من جميع انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، ومن المتوقع أن تزداد هذه الكمية في السنوات القادمة. يستهدف كل من الاتحاد الأوروبي والولايات المتحدة هذا القطاع لإزالة الكربون باستخدام الهيدروجين في منتصف العقد ٢٠٢٠-٢٠٣٠، بينما ستستهدفه الهند والصين في منتصف عقد ٢٠٣٠-٢٠٤٠. يقدر مجلس الهيدروجين (٢٠١٧ب) أن إدخال ٨٠ مليون سيارة كهربائية هجينة عديمة الانبعاثات و٨٠ مليون سيارة كهربائية هجينة تعمل بالكهرباء، سيحقق سيناريو الدرجتين في عام ٢٠٣٠. وهذا سيتطلب مجموعة واسعة من التقنيات (مجلس الهيدروجين، ٢٠١٧ب).

يتم تحديد قطاع النقل (بما في ذلك جميع القطاعات من الدراجات البخارية إلى سفن الحاويات التي ترتاد المحيطات) من خلال مقياسين: المدى والحمولة. يعتمد الأداء المطلوب من كل من المحرك والتخزين على تلك المقاييس، وتعتمد جميع القطاعات حاليًا إلى حد كبير على الوقود الأحفوري. لذلك، فإن "خلايا الهيدروجين والوقود هي عناصر مهمة في إزالة الكربون من قطاع النقل" (مجلس الهيدروجين، ٢٠١٧ب). ومع ذلك، فإن درجة صعوبة إزالة الكربون من النقل تختلف عبر القطاعات.

وفقًا لمجلس الهيدروجين، ستلعب المركبات الكهربائية التي تعمل بخلايا الوقود، دورًا أساسيًا في إزالة الكربون من قطاع النقل. ويتوقع أن تمثل هذه المركبات ما يقرب من ٣٪ من مبيعات السيارات الجديدة في عام ٢٠٣٠ مقابل ٤ ملايين مركبة كمبيعات إجمالية. من المتوقع أن يرتفع الرقم إلى ٣٥٪ في عام ٢٠٥٠. ومن المتوقع أن تقود ألمانيا واليابان وكاليفورنيا وكوريا الجنوبية الأسواق العالمية في تطبيق المركبات الكهربائية التي تعمل بخلايا الوقود.

يتزايد الاهتمام أيضًا بالحافلات ذات خلايا الوقود بسبب مشاكل التلوث المحلية، خاصة في أوروبا واليابان وكوريا الجنوبية والصين. من ناحية أخرى، ستعمل الحافلات الصغيرة والحافلات ذات المتطلبات قصيرة المدى على البطاريات. كما ستعمل الحافلات الأكبر حجمًا على خلايا الوقود، مما يسمح لها بالسفر لمسافات أطول مع انقطاعات أقل. لا تشكل قضية البنية التحتية مصدر قلق للحافلات، التي تعتمد على مرافق التزود بالوقود المبنية لهذا الغرض.

بالإضافة إلى المركبات الكهربائية التي تعمل بخلايا الوقود قد يلعب الهيدروجين دورًا كمادة وسيطة للوقود الاصطناعي في شحن البضائع والطيران. هذه الأنواع من الوقود لها خصائص مشابهة للوقود الأحفوري التقليدي الذي ينتج الطاقة عن طريق الاحتراق في المحركات. هذه الأنواع من الوقود الاصطناعي التي تتضمن استخدام ثاني أكسيد الكربون والهيدروجين تخلق دورة كربون مغلقة. وبالتالي، تعد هذه الطريقة خيارًا قيمًا لإزالة الكربون من محركات الاحتراق. من المرجح أن يتم استخدام الوقود الاصطناعي بحلول عام ٢٠٥٠ بسبب خسائر الكفاءة أثناء العملية (مجلس الهيدروجين، ٢٠١٧ب).

٣.٤ التدفئة

من حيث التدفئة، يتم استهلاك ٨٠٪ من الطاقة السكنية للتدفئة وتزويد المياه الدافئة. يمكن أن يساهم الهيدروجين في تقليل هذا الاستهلاك وإزالة الكربون من تدفئة المباني. يمكن استخدامه كوقود "نقي أو ممزوج بالغاز، مع إزالة الكربون جزئيًا من شبكة الغاز". ويمكن استخدام تقنيات الهيدروجين، مثل خلايا الوقود الصغيرة الجامعة بين الحرارة والكهرباء، كمحولات للطاقة. توفر هذه التقنيات كفاءة عالية تزيد عن ٩٠٪ لتوليد الحرارة والطاقة. علاوة على ذلك، هناك فرصة لتبديل المنازل المتصلة بشبكة الغاز الطبيعي بالتدفئة القائمة على احتراق الهيدروجين باستخدام شبكة الغاز الحالية. "مع تعديلات واستثمارات صغيرة نسبيًا، يمكن للشبكة أن تنقل بأمان خليطًا من الهيدروجين والغاز الطبيعي". استخدم مشروع في اليابان بالفعل خلايا الوقود الصغيرة الجامعة بين الحرارة والكهرباء، لتدفئة ١٩٠ ألف مبنى. أظهر المشروع قدرة الخلايا الصغيرة على تلبية متطلبات التدفئة ودعم توازن الكهرباء. تشير التقديرات إلى أن ٥,٣ مليون أسرة يابانية ستستخدم هذه التكنولوجيا بحلول عام ٢٠٣٠ (مجلس الهيدروجين، ٢٠١٧أ).

٣.٥ المواد الأولية

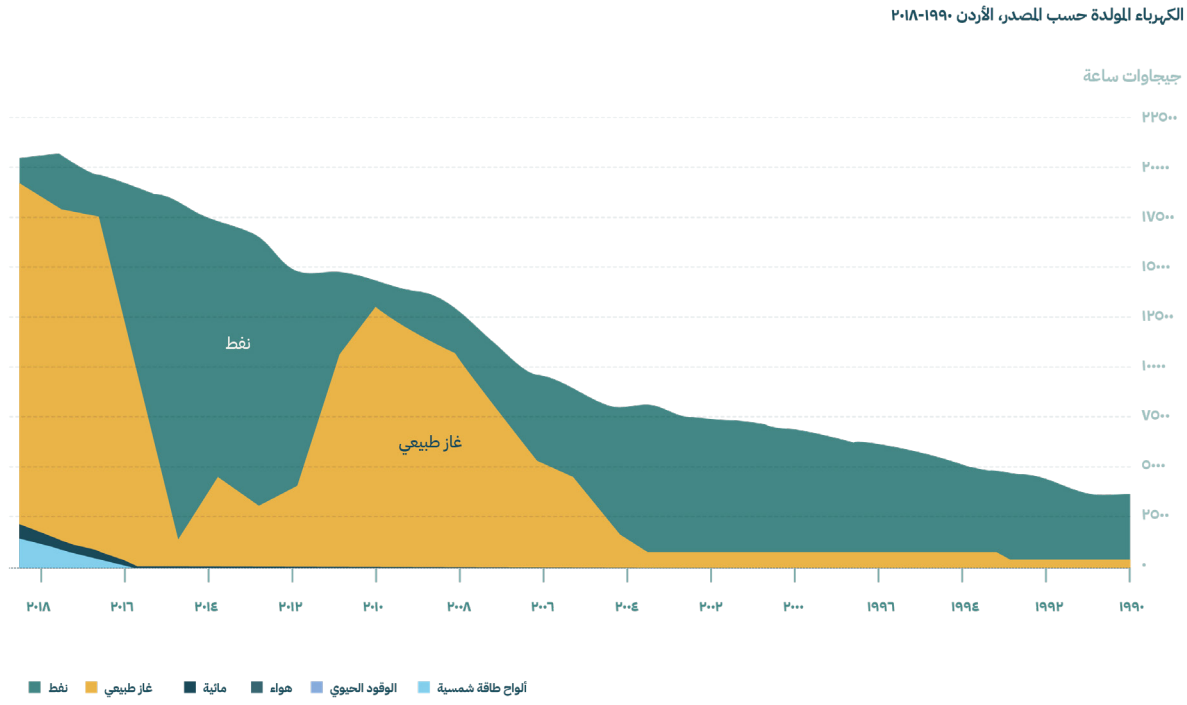
وفقًا لمجلس الهيدروجين (٢٠١٧أ)، "يمكن أن تعمل الكيمياء القائمة على الهيدروجين كبالوعة للكربون وتكمل أو تزيل الكربون عن أجزاء من سلسلة القيمة البتروكيماوية". في الوقت الحاضر، تستخدم المواد الكيميائية الصناعية والوقود والبلاستيك والسلع الصيدلانية النفط الخام (المشتقات) كمادة أولية في عملية إنتاجها. تمتلك غالبية هذه المنتجات الكربون وكذلك الهيدروجين. يذكر مجلس الهيدروجين (٢٠١٧ أ) أنه "إذا انطلق تطبيق لالتقاط الكربون واستغلاله (كجزء من اقتصاد دائري أو كبديل لتخزين الكربون)، فستحتاج التكنولوجيا إلى الهيدروجين (الأخضر) لتحويل الكربون الملتقط إلى مواد كيميائية قابلة للاستخدام مثل حمض الفورميك أو الميثان أو الميثانول أو اليوريا. هذا الاستخدام للهيدروجين من شأنه أن يجعل التقاط الكربون واستغلاله بديلاً قابلاً للتطبيق للقطاعات الأخرى التي يصعب إزالة الكربون منها مثل إنتاج الأسمنت والصلب، وسيساهم في إزالة الكربون عن جزء من سلسلة القيمة البتروكيماوية ".

يصرح مجلس الهيدروجين (٢٠١٧ أ) أيضًا على أن استخدام الهيدروجين و التقاط الكربون واستغلاله لإنشاء مواد أولية كيميائية، حاليًا في مرحلة البحث والتطوير (R&D)، وبدأت المشاريع التجريبية الأولية. يوجد في أيسلندا محطة طاقة حرارة جوفية عاملة تنتج الهيدروجين والميثانول باستخدام ثاني أكسيد الكربون الحراري الأرضي وتوليد الكهرباء. ومن المتوقع أن تكون طريقة إنتاج الميثانول هذه تنافسية من حيث التكلفة، حيث يبلغ سعر الكهرباء المتوقع ٣٠ يورو/ ميجاوات ساعة (مجلس الهيدروجين، ٢٠١٧أ).

١ الأردن - قطاع الطاقة واستخدام الهيدروجين

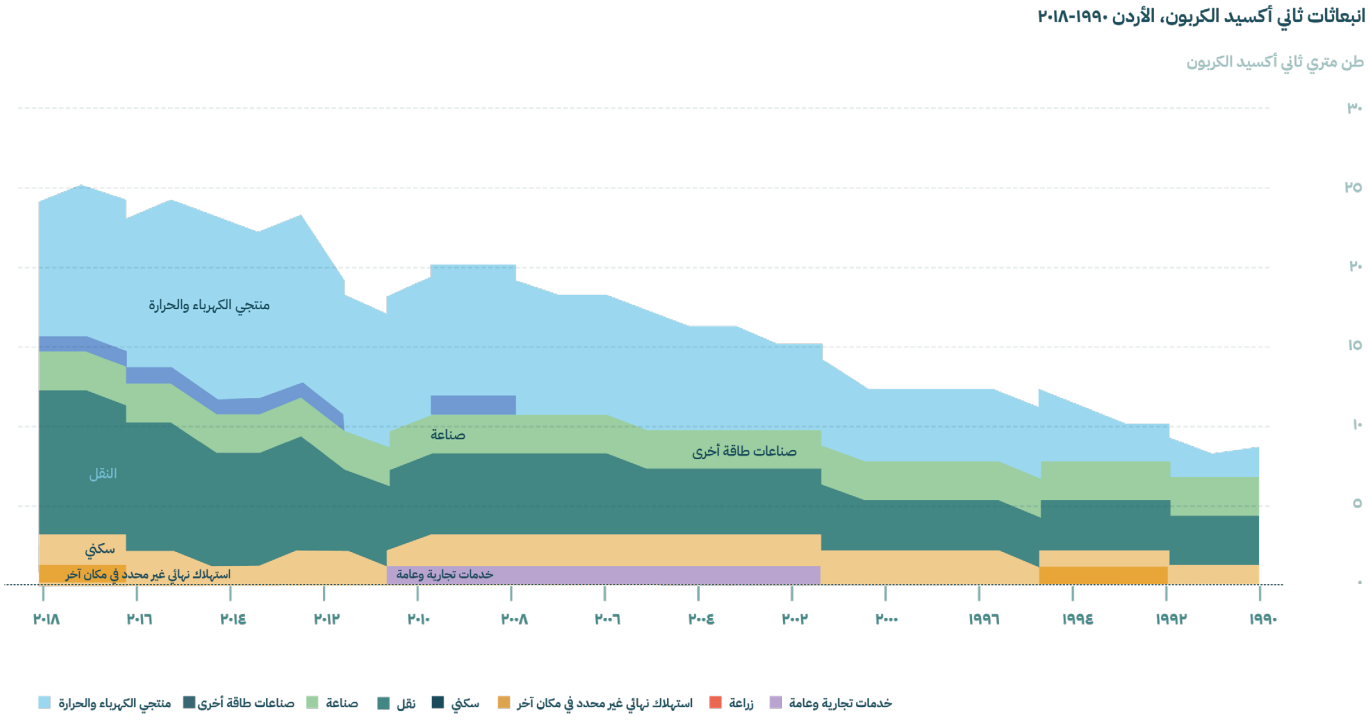
٤.١ حالة الطاقة في الأردن

التحدي الرئيسي الذي يواجه الأردن هو أمن الطاقة، حيث تعاني الأردن من ندرة الموارد الطبيعية، فضلاً عن عدم الاستقرار والصراعات الإقليمية. كما هو مبين في الشكل ١٧، هيمن الوقود الأحفوري (النفط والغاز الطبيعي) على مزيج الطاقة في الأردن بين عامي ١٩٩٠ و٢٠١٨. هناك فرصة لدمج الطاقة المتجددة في مزيج الطاقة كمصدر محلي، ولكن سيكون من الصعب تحقيق هذا الهدف. علاوة على ذلك، تستورد الأردن حوالي ٩١٪ من إمدادات الطاقة. ومن ثم، فهي بحاجة ماسة إلى التحرك نحو استخدام الهيدروجين الأخضر من أجل تقليل اعتمادها على الوقود الأحفوري المستورد وزيادة تغلغل الطاقة المتجددة من المصادر المحلية.



الشكل ١٧ توليد الطاقة في الأردن حسب المصدر (IEA، ٢٠١٩)

كما هو موضح في الشكل ١٨، كان قطاعا الكهرباء والحرارة أكبر المساهمين في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في الأردن في عام ٢٠١٨، وهو ما يقرب من ضعف كمية الانبعاثات الناتجة عن قطاع النقل. كما يوضح الشكل ١٧، كان النفط والغاز الطبيعي أكثر الموارد استخدامًا في توليد الكهرباء، مع زيادة استخدام الغاز الطبيعي في عام ٢٠١٨. إن معرفة هذه البيانات أمر ضروري للوصول إلى هدف الأردن المتمثل في خفض انبعاثات غازات الدفيئة بنسبة ١٤٪ حتى عام ٢٠٣٠.

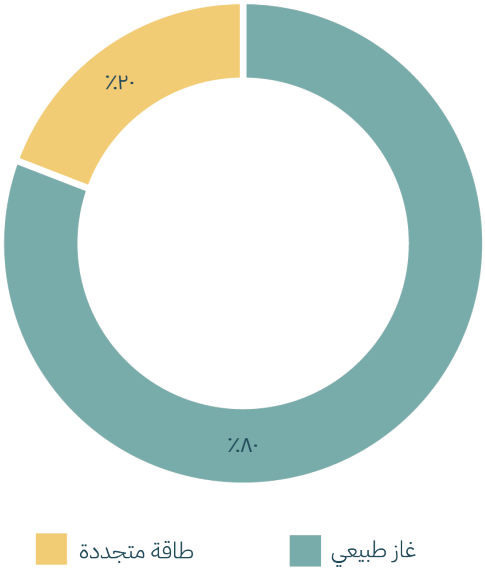


الشكل ١٨ انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في الأردن على مر السنين حسب القطاع (IEA، ٢٠١٩)

في يوليو ٢٠٢٠، أصدرت وزارة الطاقة والثروة المعدنية استراتيجية الطاقة للأعوام ٢٠٢٠-٢٠٣٠. وتهدف إلى تنويع موارد الطاقة، والتوسع في استخدام مصادر الطاقة المتجددة، وزيادة الاستثمارات في الموارد المعدنية، وتأييد العلاقات والتعاون الدولي. وتعتزم خفض تكلفة الكهرباء وإشراك منتجي الطاقة المحليين في مزيج الطاقة في الأردن. علاوة على ذلك، يعد تحسين كفاءة الطاقة من خلال تعزيز التشريعات الوطنية لكفاءة الطاقة وتنفيذ الخطط أحد الأهداف الأساسية للاستراتيجية. على المستوى الوطني، تهدف الوزارة إلى تعزيز الخدمات المقدمة للمجتمع بالتوزيع المتكافئ، وتحاول تشجيع الاستثمارات الأجنبية والمحلية في الأردن (وزارة الطاقة والثروة المعدنية، ٢٠٢٠)

٤.٢ استخدام الطاقة المتجددة في الأردن

في عام ٢٠٢٠، تم توليد ٨٠٪ من الكهرباء في الأردن من الغاز الطبيعي، بينما تم توليد ٢٠٪ المتبقية من الطاقة المتجددة (انظر الشكل ١٩). في نفس العام، كان هناك ٣٠ شركة للطاقة المتجددة تنتج الكهرباء، ٧ منها عن طريق طاقة الرياح، و٢٢ من خلال الطاقة الشمسية، وواحدة من خلال الطاقة الحيوية (وزارة الطاقة والثروة المعدنية). بين عامي ٢٠١٥ و٢٠٢٠، زادت الأردن مساهمة الطاقة المتجددة في مزيج الطاقة من ٢٪ إلى ١١٪، وهو ما كان إنجازًا كبيرًا (أبو دية، ٢٠٢٠).



الشكل ١٩ النسبة المئوية لإنتاج الكهرباء حسب المصدر

تخطط استراتيجية الطاقة ٢٠٢٠-٢٠٣٠ لزيادة حصة الطاقة المتجددة من مزيج الطاقة بأكمله من ١١٪ في ٢٠٢٠ إلى ١٤٪ بحلول عام ٢٠٣٠. كما تدعو الاستراتيجية إلى خفض توليد الكهرباء عن طريق الغاز الطبيعي لتصل إلى ٥٣٪ في عام ٢٠٣٠، وهي تهدف إلى زيادة الطاقة المتجددة إلى ٣١٪ (وزارة الطاقة والثروة المعدنية، ٢٠٢٠). يمثل هذا ٨٤٪ فقط من إجمالي توليد الكهرباء، مما يترك ١٦٪ كاحتمال لدخول مصادر أخرى السوق، مثل الصخر الزيتي.

٤.٣ طرق دعم الهيدروجين الأخضر للاندماج في السوق المحلي

من الضروري أن نفهم أنه لكي يكون للهيدروجين الأخضر مساحة في السوق، يجب اتخاذ العديد من الخطوات مسبقًا. هناك العديد من العوامل التي يمكن أن تمكن الهيدروجين من اختراق السوق، والتي يمكن تقسيمها إلى عدة طرق رئيسية في سلسلة التوريد من المورد أو المنتج إلى المستخدم النهائي.

الإنتاج والاستيراد

يتم الحصول على مصادر الهيدروجين الأخضر إما من خلال الإنتاج المحلي أو من خلال الواردات. ومع ذلك، فإن هذه الأساليب تواجه العديد من الحواجز، والتي تشمل نقص التكنولوجيا، وعدم توافرية البحث والتطوير، والافتقار إلى السياسات التي تدعم إنتاج واستيراد الهيدروجين الأخضر. ونتيجة لذلك، فإن الإنتاج لديه نفقات رأسمالية وتشغيلية عالية، مما يترك السوق محاصرًا بمصادر قليلة ومنافسة عالية.
يجب اعتبار إنتاج الهيدروجين الأخضر في الأردن فرصة تجارية عظيمة. يمكن لظروف الشمس المواتية والأسعار القياسية السابقة للطاقة المتجددة جذب الشركات الدولية لإنتاج الهيدروجين الأخضر بأسعار تنافسية. يمكن للحكومة دعم المنتجين من خلال تسهيل التمويل، ويمكنها تأمين سوق مستدام بسياسات داعمة مستقرة وواضحة. لتقليل المخاطر على المنتجين، يجب تشكيل تعاون بين القطاعين العام والخاص، ويجب وضع استراتيجية وطنية واضحة للهيدروجين الأخضر. علاوة على ذلك، فإن الجهود المشتركة مع الشركاء الدوليين وكذلك الإعانات والحوافز التي تقدمها

الحكومة من شأنها أن تقسم المخاطر، مما يسمح للمنتجين بالتعلم معًا وتقليل الأخطاء. وبالتالي، يتم تخفيض التكاليف وتسريع التقدم. يجب أن تكون الاستراتيجية الحكومية الواضحة بمثابة مرجع للقطاع الخاص عند وضع أهداف لصناعة الهيدروجين الأخضر، ويجب أن تساعد في جذب التمويل. ويجب وضع السياسات للتطبيقات الأكثر قيمة، ويجب ألا تأخذ الاستراتيجية في الاعتبار سياسات الطاقة فحسب، بل أيضًا سياسات المناخ والنقل والسياسات الصناعية. كل هذا يمكّن من تسويق الهيدروجين الأخضر من خلال تكوين سوق وخفض التكاليف. يمكن أن يكون العقد طويل الأجل مع القطاع الخاص مهمًا للغاية في توفير الأمن للمستثمرين وجعل دخول السوق أكثر سهولة. وهذا يسمح للمنتجين بتوسيع عملياتهم، وبالتالي سد فجوة التكلفة.

جدير بالذكر أن عملية تشجيع القطاع الخاص على الاستثمار في الهيدروجين الأخضر يجب ألا تؤثر سلبًا على موارد الأردن الذاتية. لقد نجح الأردن في نشر الطاقة المتجددة كجزء من مزيج الطاقة الوطني، وحصة الطاقة المتجددة هذه ملك الآن لشعب الأردن، ولن يتم استخدامها لتشغيل منشأة إنتاج الهيدروجين الأخضر. إذا كان سيتم بناء منشأة للهيدروجين، فيجب بناء مشروع مخصص للطاقة المتجددة معها.

الإنتاج والتصدير

من المتوقع أن يكون سوق الهيدروجين الدولي أكثر نضجًا من السوق الوطني في السنوات القادمة. لقد أدخلت البلدان والمناطق بالفعل استراتيجياتها ورؤى الهيدروجين الخضراء. لذلك، يتراكم المستهلكون المحتملون في الخارج، الأمر الذي سيعيد إحياء دراسة الجدوى المتعلقة بإنتاج الهيدروجين الأخضر في الأردن. سيتم بعد ذلك تصدير هذا الهيدروجين الأخضر إلى الأسواق الجاهزة، إذا كانت الظروف مناسبة. ومع وجود منشأة عاملة للهيدروجين الأخضر، يمكن أن يصبح الاستخدام الداخلي للهيدروجين أكثر جدوى ويمكن تحقيقه، خاصة وأن منشأة الهيدروجين تم بناؤها وتشغيلها من قبل القطاع الخاص، مما يزيل الكثير من المخاطر.

النقل والتخزين

يجب أخذ الهيدروجين خطوة أخرى إلى الأمام للمستخدم النهائي أو السوق التالية. بينما يتم تعيين قطاعات البحث والتطوير والسياسات للتركيز على الإنتاج، من المهم التركيز على نقل وتخزين الهيدروجين أيضًا. البنية التحتية ضرورية للغاية لجذب المنتجين المحليين والدوليين وتقليل تكلفة الخدمات اللوجستية، مما يؤدي في النهاية إلى انخفاض تكلفة الهيدروجين ويشجع المستثمرين المحليين وغير المحليين. لا تزال تقنية التخزين والنقل قيد التطوير لتلبية توقعات السوق. وتعد إمكانات استخدام الهيدروجين في قطاع النقل ضخمة، لا سيما في قطاع سوق المركبات الثقيلة. ومع ذلك، فإن هذا النشر يتطلب تدخلًا أكبر في السياسة.

استخدام الهيدروجين

يمكن استخدام الهيدروجين بعدة طرق، ويكون المستخدم النهائي في نهاية سلسلة توريد الهيدروجين. يتكون هذا القطاع من صناعات الطاقة-إلى-X التحويلية، وتجارة التجزئة، وتجار الجملة، والصادرات، والنقل (التجاري وغير التجاري). هذه المجالات تحتاج لان يتم تطويرها على نطاق تجاري، وأهم عامل تمكين هو الحكومة، التي يمكن أن تخفض التكلفة وتخلق سوقًا. من نواحٍ عديدة، يمكن للحكومة وضع سياسات تحفز جميع أصحاب المصلحة على المشاركة في التحول.

يمكن للحكومة أن تتخذ الاتجاهات السابقة وتتبع الإجراءات التي تم أخذها في الاعتبار في الماضي، مع إدخال الطاقة المتجددة إلى السوق. خلافًا لذلك، يمكن أن تبدأ من خلال اعتماد سياسات وتدابير تمكينية لإنشاء مساحة اجتماعية اقتصادية تسمح للهيدروجين الأخضر بأن يصبح جزءًا

من نظام الطاقة. ويجب تطوير مخطط يوفر شهادة واضحة لمنتجات الهيدروجين والهيدروجين لزيادة الوعي بين العملاء، كما يجب أن يفرق بين الهيدروجين الأخضر والهيدروجين المنتج من الوقود الأحفوري أو الفحم (بيانكو وبلانكو، ٢٠٢٠). من المهم أيضًا مراعاة مبدأ الإضافية، مما يعني أنه في حالة وجود طاقة من مصدر متجدد تستهلك في شبكات التوزيع، فلا ينبغي تحويل هذه الطاقة إلى الهيدروجين الأخضر (بيانكو وبلانكو، ٢٠٢٠). لتسهيل ودفع تحول الصناعات من استخدام الوقود الأحفوري، يمكن أن يكون تفويض مزيج الوقود بما في ذلك إضافة الهيدروجين محركًا كبيرًا لعملية التحول.

وضع سعر على الكربون

انبعاثات الكربون لها آثار بيئية وصحية عالية. وبالتالي، من المهم تحديد سعر الكربون أو فرض ضرائب على الكربون من خلال فرض رسوم على انبعاثات الكربون من الشركات. يمكن أن يكون هذا بمثابة دافع للتحول إلى مصادر الطاقة المتجددة، ويمكن أن يعطي الهيدروجين الأخضر فرصا أعلى في السوق.

إنشاء فرص العمل

يعد سوق الطاقة المتجددة في الأردن من أكبر الأسواق في المنطقة. اجتذبت الطفرة التجارية التي حدثت في السنوات الست الماضية العديد من المهندسين والعمال المهرة وغيرهم من المهنيين. اختار المزيد من الطلاب دراسة هذا المجال ومن المتوقع أن ينضموا إلى القوى العاملة في هذا القطاع في المستقبل. ومع ذلك، فإن القيود المفروضة على الشبكة الكهربائية في الأردن تجبر سوق الطاقة المتجددة على الانكماش في السنوات القادمة، مما يعني انخفاضًا في عدد المشاريع وانخفاض الطلب على الوظائف. في الواقع، بدأ فقد الناس في هذا القطاع وظائفهم.

تتطلب منشآت الهيدروجين الخضراء قدرًا كبيرًا من الطاقة المتجددة. يمكن لمرفق واحد فقط أن يتطلب سعة النظام الكهربائي بالكامل في الأردن. يمكن لمشاريع الطاقة المتجددة الكبيرة أن توفر مئات الوظائف، مما يضمن استمرارية هذا القطاع، ناهيك عن الوظائف غير المباشرة التي قد تنتج عن مثل هذا المشروع، وخاصة لمقدمي الخدمات اللوجستية.

تحديد الأولويات

ضمن هذا النطاق، من المهم العثور على التطبيقات ذات الأهمية الأعلى وتحديد أولويات الإجراءات وفقًا لذلك. ويجب أن يتم الأخذ بعين الاعتبار أن يكون إنتاج الهيدروجين منسجما مع مفهوم الإضافة للأنظمة القائمة. حيث لا ينبغي تحويل الكهرباء من الطاقة المتجددة المستخدمة للاستهلاك المباشر، لإنتاج الهيدروجين الأخضر.ويجب أن تنسجم استخدامات الهيدروجين مع الخطط الوطنية للأردن، مع التركيز على الاستخدامات في الصناعات المحتملة مثل الأمونيا الخضراء، أو تطبيقات الطاقة إلى سائل التي يمكنها في الوقت الحالي توفير وقود للطائرات (IRENA ، ٢٠٢٠)

١ تحديات الطاقة-إلى-X في الأردن (بالتركيز على الهيدروجين الأخضر)

مثل أي تقنية جديدة أخرى، هناك العديد من التحديات المرتبطة بالطاقة-إلى-X أو الهيدروجين الأخضر. يناقش هذا الفصل التحديات الرئيسية المحتملة في الأردن.

١.٥ البنية التحتية

يحتاج الهيدروجين إلى أن يتم نقله، وستكون هناك حاجة إلى أشكال مختلفة من البنية التحتية لنقل وتخزين الهيدروجين الأخضر أو الوقود الاصطناعي القائم على الهيدروجين. هناك طرق مختلفة لنقل الهيدروجين، اعتمادًا على شكل الهيدروجين. إذا كان الهيدروجين مضغوطًا، فيمكن نقله عبر خطوط الأنابيب. خط أنابيب الغاز في الأردن هو شبكة خط الغاز العربي الذي يربط الأردن حالياً بمصر. وهناك خطط لنشر هذه الشبكة عبر بلاد الشام في المستقبل. لا تزال هذه الشبكة تتعافى من الهجمات والأوضاع السياسية غير المستقرة حول الأردن، وخطط القائمة هي لاستخدامها من أجل الغاز الطبيعي. وسيتطلب إدخال الهيدروجين إليها الكثير من الجهد والتخطيط.

طريقة أخرى لنقل الهيدروجين ستكون من خلال السفن. يجب تسييلها أو تحويلها إلى أمونيا أو ناقلات هيدروجين عضوي سائل، لزيادة محتوى الطاقة من حيث الحجم. تتطلب أي تحويلات إضافية استهلاك الطاقة للإسالة والتبريد المستمر. يجب دراسة جاهزية ميناء العقبة والبنية التحتية اللازمة له بعناية من قبل أي شركة ترغب في إنتاج الهيدروجين في الأردن وتصديره إلى الخارج.

البنية التحتية للنقل هي الفرق الرئيسي بين أسواق الغاز الطبيعي والهيدروجين. بدون وجود سوق مادي أساسي يخدم بنية تحتية قائمة للعرض/الطلب، سيكون من الصعب تطور سوق للهيدروجين. يجب العمل على بنية تحتية جديدة، مثل خطوط الأنابيب والموانئ والتخزين والمحركات الجاهزة للهيدروجين وتوربينات الغاز وسيارات الهيدروجين. كبداية، قد يكون من الممكن المزج بين الهيدروجين والبنية التحتية الحالية للغاز الطبيعي أو استخدامها في الموقع. ومع ذلك، فإن تصميم وتنفيذ هذا المشروع سيستغرق وقتا طويلا.

تركز العديد من المشاريع في أوروبا على تبني البنية التحتية للهيدروجين الأخضر. على سبيل المثال، "دعامة الهيدروجين الأوروبية" هو مشروع بنية تحتية جديد مهم لخطوط الأنابيب للهيدروجين، شكلها ١١ مشغل نظام النقل. لقد نشروا تقريرهم الأول في يوليو ٢٠٢٠ وأضافوا ٢٣ مشغل نظام نقل آخرين من ٢١ دولة. في أبريل ٢٠٢١، نشروا تقريرًا محدثًا يتكون من مزيد من التفاصيل عن خطة الشبكة وتحليل التكلفة (بارنز وآخرون، ٢٠٢١). بحلول عام ٢٠٣٠، سيربط هذا المشروع مجموعات الهيدروجين الناشئة بشبكة خطوط أنابيب أولية تبلغ ١١٦٠٠ كيلومتر (بارنز وآخرون، ٢٠٢١). مثال آخر هو ميناء روتردام وخطته ليصبح مركزًا دوليًا لإنتاج الهيدروجين واستيراده وتطبيقه ونقله إلى بلدان أخرى في شمال غرب أوروبا (هيئة ميناء

روتردام، بدون تاريخ). وتعمل هيئة الميناء ومشغل شبكة الغاز Gasunie على مبادرة لانشاء خط أنابيب للهيدروجين يمر عبر الميناء في وقت مبكر من عام ٢٠٢٣. وسيزود خط الأنابيب الشركات بالهيدروجين المنتج في مجمعات التحويل في الميناء. وسيتم ربط "دعامة الهيدروجين الأوروبية" بالبنية التحتية الوطنية لشركة Gasunie في جميع أنحاء هولندا والممرات المؤدية إلى المناطق الصناعية في شيميلوت في ليمبورج وشمال الراين-وستفاليا. هناك أيضًا خطط لتطوير بوابة في الميناء لتسهيل استيراد الهيدروجين.

تُظهر الاستراتيجية المذكورة أعلاه من قبل "دعامة الهيدروجين الأوروبية" أهمية التعاون بين دول الاتحاد الأوروبي في تطوير البنية التحتية للهيدروجين مع الدول المجاورة. يجب على الأردن تطوير خطة لتعزيز البنية التحتية الوطنية للنقل والتوزيع، بالنظر إلى أن البنية التحتية تعتبر عقبة رئيسية. يجب تحديد الأولويات من قبل الحكومة الأردنية، ويجب حشد الاستثمارات لبناء البنية التحتية للهيدروجين.

٥.٢ ندرة المياه

في عام ٢٠١٩، سجلت الأردن المرتبة الرابعة من حيث ندرة المياه في العالم (دورميدو، ٢٠١٩)، حيث تراوحت معدلات هطول الأمطار بين ٣٠-٦٠٠ ملم/ سنة. أكثر من ٨٠٪ من مساحة الأرض صحراوية وتستقبل أقل من ١٠٠ مم/ سنة؛ و٤٪ فقط تتلقى أكثر من ٣٠٠ ملم/ سنة. بصرف النظر عن الاعتماد على هطول الأمطار، تتلقى الأردن أيضًا المياه من الأنهار الدولية، مثل نهر اليرموك. إن سحب المياه من قبل البلدان المشاطئة الأخرى يعني أن كميات محدودة فقط متاحة للأردن. كما يؤدي تغير المناخ إلى زيادة التحدي من خلال تقليل كمية المياه المتاحة للأردن. نتيجة لذلك، تواجه الأردن ندرة شديدة في المياه.

لذلك، يعد استخدام الماء كمادة أولية لتطوير الهيدروجين الجزيئي لوقود ووسيط تخزين للطاقة أحد التحديات الرئيسية. يتطلب إنتاج الهيدروجين الرمادي والأزرق كمية كبيرة من الماء للبخار في عملية إعادة التشكيل. يتطلب إنتاج الهيدروجين عن طريق التحليل الكهربائي الماء بالإضافة إلى أحد المدخلات الرئيسية. لتكوين ١كجم من الهيدروجين، يلزم ٩ لترات من الماء عالي النقاء التي تستخدم للحد من التفاعلات الجانبية التي تسببها الأيونات (الأملاح) الموجودة في المياه الطبيعية (خطة العمل والطاقة الوطنية، ٢٠١٥) ومع ذلك، لا يزال من الممكن توفير مصدر المياه لمنشأة الهيدروجين الأخضر في الأردن من خلال تحلية المياه من البحر الأحمر عبر العقبة، ولكن فقط إذا لم يتعرض الأمن المائي للأردن للخطر. ومع ذلك، يجب التحقق من صحة هذا النهج من خلال دراسات الجدوى المختلفة والتنسيق المناسب بين أصحاب المصلحة.

٥.٣ الإطار التنظيمي

لا يمكن أن يتحقق تحليل المستقبل المحتمل لسوق الهيدروجين الأخضر المتداول بدون إطار سياسي وتنظيمي. إنه العنصر الأكثر أهمية في الاعتبار. يجب أن تعزز هذه الأطر استخدام الهيدروجين بشكل مباشر أو غير مباشر عبر الاستخدامات النهائية المختلفة، وتدعم السوق، وتهيء البيئة المناسبة لجذب المشاركين في السوق.

على الرغم من أن الهيدروجين الأخضر والهيدروجين الرمادي هما نفس الغاز، إلا أن تتبع الأصل ضروري لتطبيق الحوافز والسياسات الصحيحة. لوضع السياسات التي من شأنها تمكين السوق، يجب أن تكون التطبيقات ذات القيم الأكبر هي النقطة المحورية. يتضمن ذلك توقعات لشكل السوق في العقود القادمة. وإلى جانب السياسات التمكينية، يجب أن يمكّن السوق نفسه أيضًا من إقامة شراكات مناسبة، وبنية تحتية، وتمويل، وبحث. يجب أن توفر الحكومة سياسة آمنة وداعمة لتسهيل الاستثمار الخاص الكافي عبر شبكة سلسلة توريد الهيدروجين بأكملها. على سبيل المثال، يجب أن تقدم لشركات تصنيع المعدات، وشركات مقاولات البنية التحتية ومصنعي المركبات. وسيكون الوقت اللازم لاستبدال أسطول المركبات

والوصول إلى خفض تكاليف في التقنيات الجديدة جزءًا من التحدي. ويمكن للحكومة أيضًا تقديم حوافز، مثل التخفيضات الضريبية وخطة بسيطة للتخلص التدريجي من التكنولوجيا القديمة.

٥.٤ التكلفة الرأسمالية والتشغيلية

التكلفة هي عائق أمام تمكين سوق الهيدروجين في الأردن. ترتبط هذه العقبة بالتحديات المذكورة أعلاه. إذا كان الهيدروجين يتنافس من حيث التكلفة مع الوقود الأحفوري التقليدي، لكان قد تم استخدامه بالفعل. أحد التحديات الرئيسية في هذا الصدد هو التكلفة المرتبطة بتوليد الهيدروجين الأخضر، والذي ينتج انبعاثات كربونية قريبة من الصفر أو منخفضة. ومع ذلك، فإن إنتاج الهيدروجين الحالي يستخدم احتراق المواد القائمة على الوقود الأحفوري (مثل الفحم والغاز الطبيعي) التي تولد كميات كبيرة من ثاني أكسيد الكربون. تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر مرتفعة نسبيًا (٢ إلى ٣ مرات) مقارنة بتكلفة إنتاج الهيدروجين الرمادي. وتعتمد تكلفة الهيدروجين الأخضر أيضًا على التكلفة الاستثمارية لنظام التحليل الكهربائي، وعوامل قدرتها ، وتكلفة إنتاج الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة.

ومع ذلك، بعد الانخفاض العالي في أسعار الطاقة الشمسية، من المتوقع أيضًا أن تنخفض أسعار الهيدروجين في النهاية. هذا أمر طبيعي، حيث أن اقتصاد الهيدروجين سيتغير بمرور الوقت بسبب اقتصاديات التطبيق الواسع، والطلب المتزايد، والتقدم التكنولوجي الذي يجعل التكنولوجيا أرخص.

يمكن للأردن أيضًا أن تتعلم من الجهود الحالية في المغرب لإنشاء اقتصاد هيدروجين أخضر، فالمغرب والأردن يشتركان في الكثير من أوجه التشابه من حيث ملف الطاقة والمصالح المشتركة بينهما وبين أوروبا. يمكن الاطلاع على معلومات عن التجربة المغربية في الملحق ١.

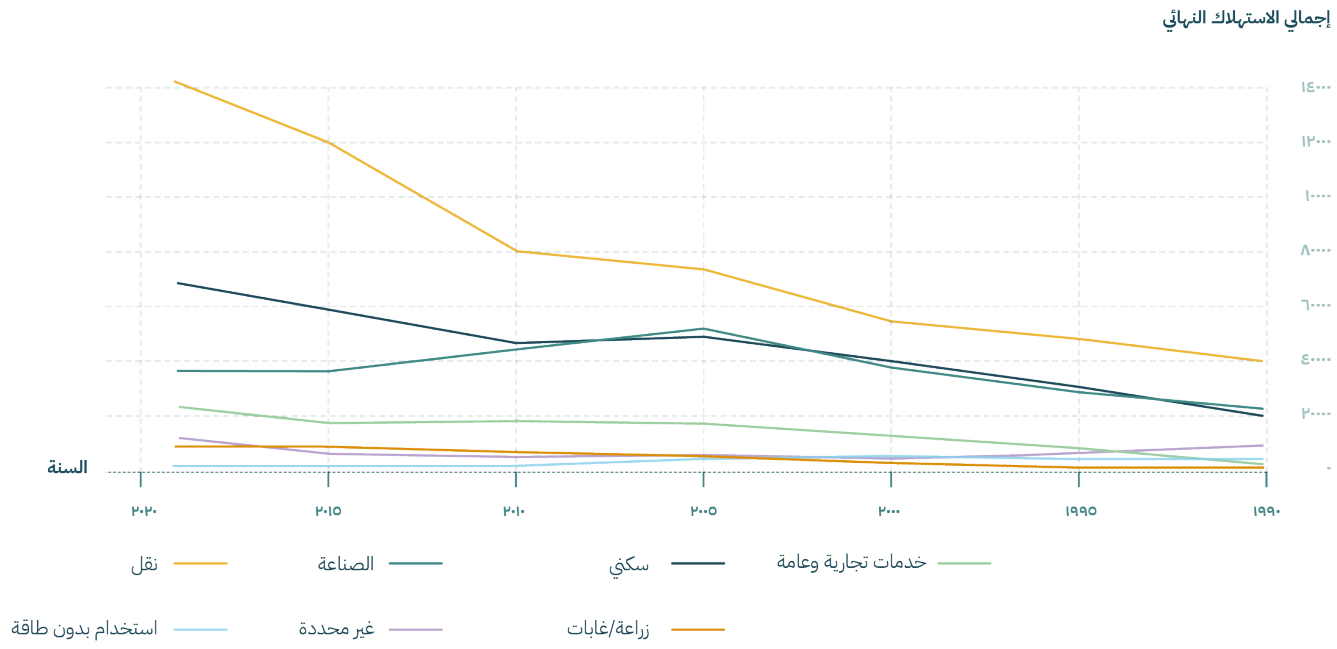
٦ توصيات لتطبيق الطاقة-إلى-X في الأردن

أظهر التحليل في الفصول السابقة كيف يمكن للهيدروجين الأخضر أن يلعب دورًا حيويًا في إزالة الكربون العالي للعديد من القطاعات، مثل قطاعات الطاقة والصناعة والنقل. وأظهر التحليل أنه يمكن استخدام الهيدروجين في العديد من التطبيقات. ومع ذلك، فإن الاهتمام الدقيق بالسياسة مطلوب لمواجهة التحديات المذكورة في الفصل ٥. لن يحفز اقتصاد الهيدروجين الأخضر النمو الاقتصادي فحسب، بل سيوفر أيضًا إمكانية إنشاء وظائف جديدة في هذا القطاع. يمكن النظر في النقاط التالية لواضعي السياسات والباحثين:

٦.١ تحديد الأولويات

من أجل تمكين وضمان دخول سهل للهيدروجين الأخضر إلى السوق، من الضروري إعطاء الأولوية للقطاعات التي يسهل للهيدروجين الأخضر اختراقها وحيث يمكن أن تكون فعالة في تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في البلاد. يمكن تحقيق ذلك من خلال النظر في العوامل التالية:

- إزالة الكربون من القطاعات التي يصعب كهربتها مثل صناعات الحديد والصلب والإسمنت.
- يجب أن تكون القطاعات الأكثر تأثيراً على بيئة الأردن على رأس الأولويات. يظهر هذا في الشكل ١٨ في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المقاسة حسب القطاع.
- تعتبر القطاعات كثيفة الطاقة من الأمور المهمة التي يجب مراعاتها، خاصة مع خطط الأردن لتقليل استخدام الغاز الطبيعي في التوليد الكهربائي ومع كون الهيدروجين ناقلًا كبيرًا للطاقة (انظر الشكل ٢٠).
- تختلف التطورات التكنولوجية في مجال النقل عن تلك التي حدثت في إنتاج الأمونيا. وبالتالي، فإنه من الأسهل اختراق سوق لديه أدوات تكنولوجية وبحثية أكثر من سوق بدونها بسبب الإنتاج الأرخص والجدوى الاقتصادية. يجب إجراء دراسة ومعايير مختلفة للتحقيق في تلك الجوانب.



الشكل ٢٠ إجمالي استهلاك الطاقة النهائي في الأردن (حسب القطاع) (IEA، ٢٠١٩)

ويمكن أن يؤدي تحديد قطاعات التركيز إلى جذب المستثمرين وتركيز الأموال على الأنشطة الاقتصادية المهمة، وبالتالي تمكين الهيدروجين من دخول السوق من خلال بعض الأنشطة بينما يتم تطوير أسواق أخرى.

٦.٢ خارطة الطريق وإطار سياسي

يجب إضافة الهيدروجين الأخضر إلى استراتيجية الأردن للطاقة ٢٠٢٠-٢٠٣٠ ليكون بمثابة أساس لإدخال سياسات أخرى ولجذب الاستثمارات الأجنبية والتعاون الإنمائي. بعد ذلك، يجب وضع خارطة طريق استراتيجية للهيدروجين وخلايا الوقود. يجب أن تتضمن خارطة الطريق استخدام الهيدروجين في الصناعة، وسلسلة توريد الهيدروجين، والتنقل. ويجب تضمين إطار سياسة داعم ومستقر لتشجيع الاستثمارات الخاصة المناسبة، والتغلب على المقاومة الأولية، لشق الطريق نحو السوق المحلي. في قطاع التنقل، سيسمح إطار السياسة لتكنولوجيا المركبات الكهربائية التي تعمل بخلايا الوقود بالتنافس مع التقنيات الأخرى، مثل السيارات الهجينة والمركبات الكهربائية. وسيساعد الإطار أيضًا في تقليل التكاليف في محطات التعبئة والتخزين والنقل، وسيقلل إطار العمل من التكلفة الإجمالية ويزيد من الخيارات للمستخدمين النهائيين. ويجب أن تسهل السياسات تمويل تطوير البنية التحتية للهيدروجين، وقد تكون هناك حاجة إلى أموال من القطاعين العام والخاص لتحقيق توسع كبير في الشبكة.

٦.٣ الحوافز

يمكن تقديم الحوافز بأشكال مختلفة. في قطاع النقل، يمكن تطبيق الإعانات المباشرة والضرائب والخصومات لتحفيز المركبات الكهربائية التي تعمل بخلايا الوقود. على سبيل المثال، قامت الحكومة الأردنية بإعفاء المركبات الكهربائية من الضرائب والرسوم الجمركية بين عامي ٢٠١٥ و٢٠١٩. ونتيجة لذلك، زاد استخدام السيارات الكهربائية خلال هذه الفترة.

في القطاع الصناعي، يمكن أن تجتذب الإعانات أو القروض الاستثمارية الاستثمارات. وخصص صندوق الطاقة والمناخ في ألمانيا ٤٥ مليون يورو للمساعدة في إزالة الكربون من الصناعات، مثل الصلب والإسمنت والصناعات الكيماوية، ودعم مسار الهيدروجين بحلول عام ٢٠٢٤.

٦.٤ المشاريع التجريبية

من المحتمل أن تكون المشاريع التجريبية الاستراتيجية جزءًا مهمًا من تطوير أي تقنية جديدة، كما هو الحال مع المركبات الكهربائية التي تعمل بخلايا الوقود. في هذه الحالة سيساعد توفير البنية التحتية الأولية بالإضافة إلى إظهار فائدة وسلامة تقنيات هذه المركبات في إدارة المخاطر بأقل قدر من الاستثمارات. وسيؤدي ذلك أيضًا إلى اكتساب المزيد من الخبرة في مواقف الحياة الواقعية مع المتغيرات التكنولوجية والاقتصادية والتنظيمية. على المدى الطويل، ستساعد المشاريع التجريبية في إنشاء رموز ومعايير وفقًا للنتائج المكتسبة. ستساهم المشاريع التجريبية أيضًا في تثقيف الجمهور حول استخدام وفوائد الهيدروجين.

٦.٥ إنشاء لجنة توجيهية للهيدروجين الأخضر

بتنسيق من وزارة الطاقة والثروة المعدنية، يمكن لأعضاء لجنة مؤلفة من صانعي السياسات وكذلك الكيانات البحثية والحكومية والقطاع الخاص، أن يصبحوا أصحاب مصلحة في سوق الهيدروجين الأخضر الناشئ والصناعات المرتبطة به. يمكن للجنة أن تقود السوق من خلال إجراء دراسات الجدوى، وإلقاء الضوء على الآثار البيئية والاجتماعية لاستخدام الهيدروجين الأخضر في الأردن، وتقديم المشورة للحكومة في جميع الأمور المتعلقة بالهيدروجين الأخضر. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تعمل اللجنة كجهة اتصال لأصحاب المصلحة الدوليين في مجال الهيدروجين، مثل الشركات أو شراكات الطاقة أو اللجان التوجيهية للهيدروجين من البلدان الأخرى، والتي ستكون أساسًا للتعاون الثنائي أو متعدد الأطراف مع البلدان والكيانات الأخرى.

٦.٦ التعاون مع دول الجوار

كما ذكرنا سابقاً، هناك حاجة إلى اتفاقيات وتعاون بين الأردن ودول الجوار لتسهيل التجارة عبر الحدود. البنية التحتية محدودة حاليًا، ولكن يجب أن تتضمن الاتفاقيات طرقًا تجريبية وشركات النقل، ومعايير السلامة التشغيلية، ومتطلبات سلامة خطوط الأنابيب لضمان استدامة سلسلة التوريد بمرور الوقت. إن بدء اتفاقيات على المستوى الحكومي بين الأردن والدول الأخرى سيساعد في بناء شبكات إمداد الهيدروجين وتقليل التكاليف المرتبطة بالنقل والتخزين.

٦.٧ استخدام المحلل الكهربائي لزيادة الطلب على الكهرباء

تتطلب منشأة الهيدروجين الأخضر طاقة متجددة لتوفير الكهرباء للمحلل الكهربائي من أجل إنتاج الهيدروجين. في حالة الأردن، سيكون مصدر الطاقة المتجددة هو الطاقة الشمسية الكهروضوئية، والتي يمكنها فقط توليد الكهرباء خلال النهار. هذا يعني أن المحلل الكهربائي لن يعمل في الليل. إذا تم توفير هذه المحللات الكهربائية عن طريق الكهرباء من الشبكة الوطنية مقابل تعرفة معينة، فسوف تعمل بمثابة تحكم في حمل متغير مع قدرة استهلاك عالية جدًا. وبهذا يمكن أن يستفيد مشغل منشأة الهيدروجين من خلال إنتاج الهيدروجين غير الأخضر بسعر مناسب للتصدير أو الاستخدام المحلي. وأيضًا ستستفيد الشبكة الكهربائية الأردنية بتشغيل محطات التوليد التي قد لا تعمل أحيانا بسبب قلة الطلب على الكهرباء.

قد يكون هذا مهمًا لدعم النموذج المالي لشركة الكهرباء الوطنية، حيث توجد مشكلة السعة التوليدية الزائدة في الأردن، مما يتسبب في بقاء بعض محطات التوليد في وضع الاستعداد بينما يتم دفع رسوم التوافرية لهم. وبالتالي، سيكون من الأفضل استخدام محطات التوليد والدفع لهم لتوليد الكهرباء بدلاً من الدفع بدون مقابل.

٦.٨ محطة تحلية في مدينة العقبة

لإنتاج الهيدروجين الأخضر سواء للتصدير أو للاستخدام المحلي، فإن أهم قضية يجب حلها هي توفير المياه. من المهم توفير المياه دون التأثير على نصيب الشعب الأردني. تتمثل إحدى طرق تحقيق ذلك في بناء محطة لتحلية المياه في العقبة على البحر الأحمر، وتحديداً لمنشأة إنتاج الهيدروجين. يجب تزويد محطة تحلية المياه هذه في العقبة بالطاقة المتجددة فقط للحفاظ على نوع الطاقة النظيفة التي تدخل على طول عملية إنتاج الهيدروجين. ويجب إجراء دراسة جدوى مفصلة مع الأخذ في الاعتبار جميع العوامل من أجل التخطيط لمثل هذا المشروع.
إذا كان سيتم إنشاء محطة لتحلية المياه من قبل مشغل منشأة الهيدروجين، فمن الممكن فرض ناتج معين من المياه المحلاة للاستخدام الوطني في الأردن.

٦.٩ الاستثمار في البحث والتطوير

البحث والتطوير ضروريان للغاية لنمو الهيدروجين وتوسيع سلسلة التوريد. ينبغي النظر في دعم البحث والتطوير لتحسين كفاءة أنظمة التحليل الكهربائي ولتوحيد التصميمات لأنظمة التحليل الكهربائي واسعة النطاق. قد يؤدي مثل هذا البحث إلى تطورات في التكنولوجيا وتقليل تكاليف الهيدروجين للمستخدمين النهائيين.
يمكن تصميم مرفق بحثي وتجهيزه في الأردن بجميع الأدوات اللازمة لتمكين التفاعل بين العلماء والصناعة. وستعمل منشأة البحث في هذا المجال على تعزيز فرص البحث وخلق المعرفة. كما أنه سيحل المشكلات المتعلقة بتكنولوجيا الهيدروجين الأخضر. يمكن لمركز الأبحاث أن يلعب دورًا حيويًا في تعزيز ونشر المعرفة.

قائمة المراجع

Abu-Dayyeh, A. (2020, July 20). Energy strategy 2020 — 2030. The Jordan Times. http://jordantimes.com/opinion/ayoub-abu-dayyeh/energy-strategy-2020-%E2%80%94%C2%A02030

Barnes, A., Fattouh, B., Heather, P., Grubnic, P., Hawkes, A., Isaac, T., Al-Khowaiter, A., Koyama, K., Lambert, M., Lewis, A., Medlock, K., Meidan, M., Mills, R., Moore, B., Mufti, Y., Norman, D., Patonia, A., Poudineh, R., & Schöffel, M. (2021). The role of hydrogen in the energy transition. The Oxford Institute for Energy Studies. https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2021/05/OEF-127.pdf

Bianco, E., & Blanco, H. (2020). Green hydrogen: A guide to policy making. IRENA. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_hydrogen_policy_2020.pdf

Bimbo, N. (2019, August 16). The unbearable lightness of hydrogen. The Chemical Engineer. https://www.thechemicalengineer.com/features/the-unbearable-lightness-of-hydrogen/

Blank, T., & Molloy, P. (2020). Hydrogen's decarbonization impact for industry: Near-term challenges and long-term potential. Rocky Mountain Institute.

Blasio, N., & Pflugmann, F. (2020). Geopolitical and market implications of renewable hydrogen: New dependencies in a low-carbon energy world. Harvard Kenndy School. https://www.belfercenter.org/publication/geopolitical-and-market-implications-renewable-hydrogen-new-dependencies-low-carbon

Bruce, S., Temminghoff, M., Hayward, J., Schmidt, E., Munnings, C., Palfreyman, D., & Hartley, P. (2018). National Hydrogen Roadmap: Pathways to an economically sustainable hydrogen industry in Australia. CSIRO.

Burre, J., Bongartz, D., Brée, L., Roh, K., & Mitsos, A. (2020). Power-to-X: Between electricity storage, e-production, and demand side managament. Chemie Ingenieur Technik, 92(1-2), 78-84. 10.1002/cite.201900102

Dormido, H. (2019, August 6). These countries are the most at risk from a water crisis. Bloomberg. https://www.bloomberg.com/graphics/2019-countries-facing-water-crisis/

Dufton, J. (2016, March 1). Accelerating progress on hydrogen fuel cells. The Chemical Engineer. https://www.thechemicalengineer.com/features/accelerating-progress-on-hydrogen-fuel-cells/

EIA. (2013, January 18). Hydrocracking is an important source of diesel and jet fuel. https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=9650

Eljack, F., & Kazi, M. (2021). Prospects and challenges of green hydrogen economy via multi-sector global symbiosis in Qatar. Frontiers in Sustainability. https://doi.org/10.3389/frsus.2020.612762

Elshout, R. (2010). Hydrogen production by steam reforming. Chemical Engineering, 117(5), 34-38.

Felder, R. M., & Roussaeu, R. W. (2005). Elementary principles of chemical processes. John Wiley & Sons, Inc.

Frawley, T. (2021, November 3). Safety in a green hydrogen economy. Fauske & Associates. LLC. https://www.fauske.com/blog/safety-in-a-green-hydrogen-economy

Freude, D. (2004). Molecular physics. Universität Leipzig. https://home.uni-leipzig.de/energy/freume.html

Golden, P. (2021, January 21). Power-to-X to play key role in accelerating the energy transition. Wärtsilä. https://www.wartsila.com/insights/article/power-to-x-to-play-key-role-in-accelerating-the-energy-transition

Hamedi, Z., Korban, R., Gönül, G., Nagpal, D., & Zawaydeh, S. (2021). The Hashemite Kingdom of Jordan: Renewables readiness assessment: IRENA. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Feb/IRENA_RRA_Jordan_2021.pdf

Hydrogen Council. (2017a). How hydrogen empowers the energy transition. https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/06/Hydrogen-Council-Vision-Document.pdf

Hydrogen Council. (2017b). Hydrogen scaling up: A sustainable pathway for the global energy transition. https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf

Hyrdogen Tools. (n.d.). Instructions. https://h2tools.org/hyarc/calculator-tools/lower-and-higher-heating-values-fuels

IEA. (2019) Data and statistics. https://www.iea.org/countries/jordan

IRENA. (2020). Energy transition. https://www.irena.org/energytransition

JGC. (n.d.). CO2-free ammonia synthesis-CO2-free energy carrier. https://www.jgc.com/en/business/tech-innovation/environment/co2-free.html

Matei, A., Drăgoescu, R., Ianc, N. Emeric Chiuzan, & Rădoi, F. (2020). Use of explosibility diagrams in potentially explosive atmospheres. MATEC Web Conferences, 305.

MEMR. (2010). 2010 Annual Report. https://www.memr.gov.jo/ebv4.0/root_storage/en/eb_list_page/annual_report_2010.pdf

MEMR. (2019). 2019 Annual Report. https://memr.gov.jo/ebv4.0/root_storage/ar/eb_list_page/memr_annual_report_2019_-_15.5.2020.pdf

MEMR. (2020). 2020 Annual Report.

Ministry of Education. (2018). Education Strategic Plan 2018-2022. https://moe.gov.jo/sites/default/files/esp_english_final.pdf

National Energy Technology Laboratory. (n.d.) Gasification introduction. https://netl.doe.gov/research/Coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/intro-to-gasification

Nationalgrid. (2021). The hydrogen colour spectrum. https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/hydrogen-colour-spectrum

National Strategy and Action Plan. (2015). National Strategy and Action Plan to combat desertification.

Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. (n.d.). Hydrogen production: Electrolysis. https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis

Port of Rotterdam Authority. (n.d.). Hydrogen vision.

Sander-Green, L. (2020). Do we really need coal to make steel? Wildsight. https://wildsight.ca/2020/06/01/do-we-really-need-steelmaking-coal/

Sandri, S., Hussein, H., & Alshyab, N. (2020). Sustainability of the energy sector in Jordan: Challenges and Opportunities. Sustainability, 12(24), 1-25. https://doi.org/10.3390/su122410465

Satyapal, S. (2017, February 21). Hydrogen: A clean, flexible energy carrier. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. https://www.energy.gov/eere/articles/hydrogen-clean-flexible-energy-carrier.

Shaohua, J. (2009). Ash agglomerating fluidized bed (AFB) coal gasification technology. Institute of Coal Chemistry, Chinese Academy of Sciences. http://english.sxicc.cas.cn/st/as/201501/t20150106_134879.html

Shri Hari Fabtech. (2018, February 13). Vegetable oil hydrogenation plant. indiaclickfind. 2018. https://www.indiaclickfind.com/products/detail/vegetable-oil-hydrogenation-plant-154

Taibi, E., Miranda, R., Vanhoudt, W., Winkel, T., Lanoix, J.C., & Barth, F. (2018). Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition. IRENA. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA_Hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf

UNESCO. (2021). Learn for our planet: A global review of how environmental issues are integrated in education.

Vasconcelos, B., & Lavoie, J. (2019). Recent advances in power-to-x technology for the production of fuels and chemicals. Frontiers in Chemistry. https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00392

ملحق: تجربة دولة - انتشار اقتصاد الهيدروجين الأخضر في المغرب: الاستراتيجية والتقدم المستمر

د. سمير رشيدي، مدير البحث والتطوير، معهد بحوث الطاقة الشمسية والطاقات الجديدة (IRESEN)

٧.١ تحول الطاقة في المغرب

منذ عام ٢٠٠٩، انخرطت المغرب في تحول طموح لاستخدام الطاقة، مستهدفًا ٥٢٪ من السعة المركبة من مصادر الطاقة المتجددة بحلول عام ٢٠٣٠. واليوم، يبلغ إجمالي قدرة الطاقة الخضراء للبلاد حوالي ٣,٩٥ جيجاوات (١,٧٧ جيجاواط مائية، ١,٤٣ جيجاواط رياح، و٠,٧٥ جيجاواط شمسية)، والتي تمثل حوالي ٣٨٪ من إجمالي السعة المركبة. وبالتالي، فإن البلد هو مثال رائد للبلدان في أفريقيا وكذلك في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا.

كما أثبتت الدولة قدرتها وقيادتها في تنفيذ محطات طموحة متجددة واسعة النطاق من خلال دمج التقنيات المبتكرة. هذا هو الحال مع مشاريع نور التي عرضت تكنولوجيا الطاقة الشمسية المركزة في ورزازات، والتي تضم بعض الأرقام القياسية العالمية من حيث الحجم (حجم التوربينات، المجال الشمسي، ارتفاع برج الطاقة الشمسية).

نتج عن هذا المسعى، على مدار العقد، إنجازات كبيرة، مما مهد الطريق نحو تحول ناجح للطاقة. على سبيل المثال، نجح المغرب في خفض اعتماده على الواردات الأحفورية بمقدار ٧ نقاط (من ٩٧,٥٪ في ٢٠٠٩ إلى ٩٠,٥٪ في ٢٠٢٠)، الأمر الذي (إلى جانب التأثير البيئي) يساعد في تعزيز اقتصاد البلاد وتوازن التجارة الدولية. بالإضافة إلى ذلك، ولدت هذه الديناميكية المتجددة جهودًا استثمارية إجمالية تبلغ حوالي ٦ مليار دولار أمريكي من خلال ما يقرب من ٥٠ مشروعًا وإنشاء أكثر من ٣٠ شركة من ١٢ دولة مختلفة.

بالنظر إلى عقد ما بعد فيروس كورونا ٢٠١٩ (COVID-19)، فإن الدولة على وشك أن تأخذ تحول الطاقة إلى مستوى أعلى، وتستهدف إزالة الكربون من اقتصادها وصادراتها. في الواقع، سيعمل الاتحاد الأوروبي، وهو أحد الشركاء الرئيسيين للمغرب، على تسوية ضرائب الكربون تدريجيًا بحلول ٢٠٢٣ و٢٠٢٥. وسيتعلق هذا، من بين أمور أخرى، بما قيمته ١٠ إلى ١٥ مليار دولار من الصادرات (بشكل رئيسي في السيارات وصناعات الطيران). لذلك، ستعزز الدولة خططها الاستراتيجية للاستدامة من حيث مصادر الطاقة المتجددة، وكفاءة الطاقة، والتنقل الإلكتروني، فضلاً عن إنتاج وتصدير واستخدام الجزيئات الخضراء ذات القيمة المضافة العالية، مثل الهيدروجين. في هذا الصدد، تجري المغرب دراسة كبيرة حول التنقل الإلكتروني لخفض انبعاثات غازات الدفيئة في قطاع النقل، مع خلق القيمة المحلية والوظائف والصادرات. علاوة على ذلك، نشرت الدولة مؤخرًا

استراتيجيتها الخضراء للهيدروجين، كرائدة في مجال الهيدروجين الأخضر في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا، مما يؤكد ريادتها في الاستدامة وإرادتها القوية.

٧.٢ الهيدروجين الأخضر في المغرب: رؤية واستراتيجية

بدأت المناقشات حول الهيدروجين الأخضر في المغرب في نهاية عام ٢٠١٧ من خلال شراكة الطاقة المغربية الألمانية (PAREMA). في عام ٢٠١٨، تم إطلاق دراستين أوليتين لتقييم الإمكانات التقنية، والفرص الاقتصادية، والأسواق، وكذلك التقنيات المتعلقة بهذه الصناعة. لقد ذُكر أن البلاد يمكن أن تصل إلى ٤٪ من سوق الطاقة-إلى-X لعالي بحلول عام ٢٠٥٠. في دراسة نشرها مجلس الطاقة العالي في ٢٠١٨، تم تحديد المغرب كبلد رائد فيما يتعلق باقتصاد الطاقة-إلى-X ذات "إمكانات عالية" لكل من طاقة الرياح والطاقة الشمسية، مما يتيح إنتاجًا تنافسيًا للغاية للهيدروجين الأخضر والجزيئات الخضراء الأخرى ذات القيمة المضافة العالية. في عام ٢٠١٩، تم إطلاق دراسة ثالثة أكثر تفصيلاً من أجل تحديد الخطوط العريضة لاستراتيجية الهيدروجين الأخضر المغربية، والتي نُشرت في أغسطس ٢٠٢١.

تحدد الاستراتيجية ٣ محاور عمل رئيسية لنشر اقتصاد الهيدروجين بشكل عام:

- تطوير التقنيات
- تحفيز السوق والطلب
- تعزيز الاستثمار والإمداد

وفقًا للمغرب، تم تحديد الفرص قصيرة الأجل **كسوق للتصدير**، لا سيما في الاتحاد الأوروبي. كما تم تحديد **سوق محلي متخصص** للأسمدة القائمة على الأمونيا، وهي إحدى الصناعات الرائدة في البلاد. وبالفعل تستورد صناعة الأسمدة المغربية نحو مليوني طن سنويًا من الأمونيا. لذلك، يمكن أن يساعد الإنتاج المحلي للأمونيا الخضراء (والتنافسية) في إزالة الكربون من صناعة الفوسفات في البلاد، مع خلق قيمة صناعية وتقليل الاعتماد على الاستيراد. إلى جانب ذلك، تم تحديد الأمونيا و ناقلات الهيدروجين العضوية السائلة (LOHC) في العديد من الدراسات كنواقل هيدروجين مثالية من حيث الاقتصاد التقني. وهكذا، يمكن للمغرب، في المستقبل، أن تكون أحد اللاعبين الرئيسيين في سلعة الأمونيا الخضراء ويمكن أن تسلم الهيدروجين الأخضر لعملائه في جميع أنحاء العالم.

بالإضافة إلى الأمونيا الخضراء، فإن الموقع الجغرافي الفريد للمغرب يمكّنها من إيصال الهيدروجين الأخضر إلى الاتحاد الأوروبي عبر خطوط الأنابيب، إما عن طريق مزجه مع الغاز الطبيعي في البنية التحتية الحالية أو من خلال إنشاء بنى مخصصة.

علاوة على ذلك، على المدى المتوسط والطويل، قد تظهر فرص أخرى في الأسواق المحلية والتصديرية، خاصة في قطاعات الوقود الاصطناعي وكذلك في قطاع التنقل الثقيل، مثل الخدمات اللوجستية والمناجم والبحرية والطيران. أخيرًا، على المدى الطويل، قد تصبح تطبيقات تخزين الطاقة، والتدفئة الصناعية والسكنية، وكذلك التنقل الحضري، ذات أهمية للدولة.

من أجل الوصول إلى مثل هذا الاقتصاد الهيدروجيني الأخضر التنافسي في المغرب، تم تقديم التوصيات التالية لاتخاذ الإجراءات:

- تهيئة الظروف المواتية للتصدير، وخاصة إلى الاتحاد الأوروبي، نظرًا لاستراتيجيته الخاصة بحياد الكربون، مثل التنظيم والتصاريح والبنية التحتية.
- جنبًا إلى جنب مع الشركاء وأصحاب المصلحة الدوليين، المساهمة في جهود خفض التكلفة على طول سلسلة توريد الطاقة-إلى-X بأكملها من خلال تشجيع المحتوى الصناعي المحلي من خلال بناء القدرات والتدريب ونقل التكنولوجيا إلى الشركات المغربية.
- إنشاء مجموعة صناعية مغربية، تجمع الشركات والمؤسسات الوطنية والدولية وأصحاب المصلحة في البحث والتطوير لتعزيز ظهور أول مظاهر ومشاريع تجارية على نطاق واسع.
- إنشاء مركز وطني وإقليمي للبحث والتطوير من أجل تعزيز البحوث التطبيقية لاختبار تكنولوجيات الهيدروجين الخضراء وتكييفها وتوسيع نطاقها من خلال البحث والتطوير والمشاريع التجريبية الصناعية والوحدات التوضيحية.
- تطوير سوق محلي للهيدروجين الأخضر من خلال تشجيع القطاع الخاص والمستثمرين على إنتاج واستخدام الهيدروجين الأخضر والجزيئات في قطاعات صناعية متعددة (مثل الصلب، والأعمال التجارية الزراعية، والمواد الكيميائية(.
- تعزيز الشراكة والتعاون الدوليين من أجل حشد التمويل ووضع خطط تمويل قادرة على إطلاق المشاريع الأولى (الإعانات، وضرائب الكربون، والحصص، والأسعار المميزة)

في هذا الصدد، أبرمت المغرب العديد من اتفاقيات التعاون مع ألمانيا والاتحاد الأوروبي والبرتغال و الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA). المغرب أيضا لديها مذكرة تفاهم بشأن الهيدروجين الأخضر مع البنك الدولي، وبنك الائتمان لإعادة الإعمار (KfW)، والبنك الأوروبي لإعادة الإعمار والتنمية (EBRD). المغرب أيضا عضو في Mission Innovation، وتحالف MENA Hydrogen، وHydrogen Europe وHydrogen Europe Research، ومجلس الطاقة العالمي، و DENA's PowerFuel Alliance، وشبكة أبحاث HYPOS.

٧.٣ الهيدروجين الأخضر في المغرب: الخطوات الأولى والأنشطة الجارية

في عام ٢٠١٩، من أجل مراقبة الأنشطة الوطنية وإنشاء أوجه تآزر بين أصحاب المصلحة المغاربة، أنشأت وزارة الطاقة والمعادن والبيئة اللجنة الوطنية للهيدروجين الأخضر مع المؤسسات الرئيسية التالية:

- وزارة الصناعة
- وزارة المالية
- وزارة النقل
- مكتب الشريفين للفوسفات OCP))
- المكتب الوطني للهيدروكربونات والمناجم (ONHYM)
- المكتب الوطني للكهرباء والمياه الصالحة للشرب (ONEE)
- الوكالة المغربية للطاقة الشمسية (Masen)
- معهد البحوث في الطاقة الشمسية والطاقات الجديدة
- الاتحاد العام لمقاولات المغرب (CGEM)

خلال عام ٢٠٢٠، عمل أعضاء اللجنة معًا لوضع استراتيجية الهيدروجين المغربية من أجل تحسين نشرها مع الظروف الحدودية ذات الصلة عبر القطاعات. حاليًا، تجري اللجنة دراسات متابعة متعمقة لتنفيذ خطة العمل المحددة في هذه الاستراتيجية.

بالإضافة إلى اللجنة، شهدت المغرب في وقت سابق من هذا العام إنشاء تجمع الهيدروجين الأخضر "GreenH2 Maroc: صناعة البحث والابتكار"، التي أسستها ما يقرب من ٤٠ شركة ومراكز بحث وتطوير وجامعات مغربية.

تعمل "GreenH2 Maroc" وتتكون من اللجان الست التالية:

- الطاقة ونقل الجزيئات الخضراء
- صناعة الطاقة المتجددة
- الصناعة الكيماوية
- مشاريع الهيدروجين الأخضر
- البحث والتطوير والابتكار
- الشراكة الدولية

هاتان المنظمتان تعملان الآن على أسس تكاملية وتقومان بإعداد متابعة ودراسات مفصلة من أجل تنفيذ الاستراتيجية المغربية للهيدروجين وخطة العمل المقابلة لها، مع مراعاة بعض الأولويات، مثل:

- التنظيم والإطار القانوني
- تشغيل ونشر سوق الطاقة-إلى-X
- البنية التحتية واستخدامات الأراضي
- خارطة طريق البحث والتطوير والابتكار
- تعزيز الشراكة والتعاون الدولي

بالتوازي مع هذه التطورات على الجانب التنظيمي، يتم تطوير بعض المشاريع الملموسة من قبل العديد من أصحاب المصلحة الرئيسيين. على سبيل المثال، هناك مشروع صناعي بقدرة ١٠٠ ميجاوات في مرحلة دراسة الجدوى بواسطة الوكالة المغربية للطاقة الشمسية (Masen). يجب أن يبدأ تشغيل المشروع بحلول عام ٢٠٢٥ وأن ينتج حوالي ١٠٠٠٠ طن/ سنة من الهيدروجين الأخضر. علاوة على ذلك، أطلقت العديد من الشركات الخاصة والعامة الأخرى دراسات الجدوى (مبدئية) الخاصة بها من أجل التنبؤ بتطبيقات الهيدروجين الأخضر في عملياتها المحددة (إنتاج الصلب، صناعة الزراعة/ الصناعات الغذائية، الصناعة الكيميائية، تخزين الطاقة، التنقل المستدام).

فيما يتعلق بالبحث والتطوير والابتكار، هناك بنية تحتية بحثية مخصصة "منصة الهيدروجين الأخضر والتطبيقات (Green H2A)" قيد التطوير ويجب أن تكون جاهزة للإطلاق بحلول أوائل عام ٢٠٢٢. هذا المنصة، هي مشروع مشترك بين معهد البحث في الطاقة الشمسية والطاقات الجديدة وجامعة محمد السادس متعددة التخصصات التقنية، ويهدف إلى اختبار تقنيات الطاقة-إلى-X وتكييفها والارتقاء بها من خلال إشراك الشركاء الوطنيين والدوليين الرئيسيين. سيتم التركيز أيضًا على النماذج الأولية بالإضافة إلى التجربة الصناعية والعرض التوضيحي. الهدف هو توطين المعرفة والملكية الفكرية وإتاحتها لجميع الشركاء. علاوة على ذلك، ستكون المنصة أداة قوية لبناء القدرات والتدريب وإعداد رأس مال بشري مؤهل تأهيلًا عاليًا لأبحاث وصناعة الطاقة-إلى-X. لذلك، ستساعد منصة Green H2A في إتاحة وظائف ذات قيمة ومهارات عالية في الدولة لهذا القطاع. سيكون أحد المشاريع الأولى لمنصة Green H2A هو "مصنع الأمونيا الخضراء التجريبي"، والذي يتكون من قدرة تحليل كهربائي ٤

ميجاوات وقدرة إنتاجية تبلغ حوالي ١٣٠٠ طن سنويًا من الأمونيا الخضراء. تتم كل هذه التطورات بالتعاون الوثيق مع مجموعة مكتب الشريفين للفوسفات، الشركة الرائدة في سوق الأسمدة القائمة على الفوسفات، والتي تستورد ما يقرب من ٢ مليون طن من الأمونيا سنويًا، وهي صاحبة المصلحة الوطنية الرئيسية ومهتمة بشدة، جنبًا إلى جنب مع الشركاء الآخرين، بإطلاق إنتاج الأمونيا الخضراء على نطاق واسع، بمجرد أن تصبح دراسة الجدوى قابلة للتحقيق.

٧.٤ خاتمة ووجهات نظر

مثل العديد من البلدان في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا، تنعم المغرب بإمكانيات استثنائية من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، والتي تمكنه من أداء أسعار تنافسية عالية للهيدروجين الأخضر والجزيئات الخضراء. بدأت الدولة في وقت مبكر نسبيًا (نهاية عام ٢٠١٧) للنظر في هذه الفرصة وهيكلة نفسها لتكون جاهزة لإطلاق اقتصاد الهيدروجين في المنطقة.

لهذا الغرض، أجرت المغرب دراسات استكشافية ومتعمقة، مما مكنها من أن تكون أول بلد في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا تنشر استراتيجيته الوطنية للهيدروجين في أغسطس ٢٠٢١ مع خطة عمل مقابلة تستهدف التصدير والأسواق المحلية. إلى جانب ذلك، أعدت المغرب إطارًا مؤسسيًا مناسبًا لرصد تطورات تقدم الهيدروجين الأخضر في البلاد في تآزر كامل بين أصحاب المصلحة المتعددين. تم تحقيق ذلك من خلال إنشاء اللجنة الوطنية للهيدروجين الأخضر بالإضافة إلى مجموعة Green H_2 Maroc الصناعية.

أداة استراتيجية أخرى قيد النشر هي Green H2A Platform. إنها بنية تحتية للبحث والتطوير، والتي ستلعب دورًا رئيسيًا في تعظيم إنشاء القيمة لأبحاث وصناعة الطاقة-إلى-X من خلال تعزيز بناء القدرات وتعزيز نقل التكنولوجيا.

علاوة على ذلك، بدأت الدولة بمتهيد الطريق لتطوير مشاريع الهيدروجين الأخضر بأحجام مختلفة ولتطبيقات مختلفة. أحد هذه المشاريع هو المصنع التجريبي للأمونيا الخضراء، والذي سيتم تشغيله بحلول عام ٢٠٢٣ وسيتألف من حوالي ٤ ميجاوات من قدرة التحليل الكهربائي، ينتج أكثر من ١٣٠٠ طن/ سنة من الأمونيا الخضراء. مشروع آخر قيد التطوير هو مصنع بقدرة تحليل كهربائي ١٠٠ ميجاوات و١٠٠٠٠ طن/سنة من الهيدروجين الأخضر ليتم تشغيله بحلول عام ٢٠٢٥.

أخيرًا، انضمت المغرب إلى تحالفات دولية متعددة وأقامت شراكات استراتيجية مع بلدان رئيسية أخرى وأصحاب مصلحة آخرين سيلعبون دورًا رئيسيًا في نشر اقتصاد الهيدروجين الأخضر. ومع ذلك، فإن خطة تعاون بين دول منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا ضرورية أيضًا من أجل حماية مصالحها وتعظيم تأثيرها الاقتصادي الإيجابي، نظرًا لأنها ستقود العالم في صادرات الجزيئات الخضراء.

مراجع

Eichhammer, W., Oberle, S., Haendel, M., Boie, I., Gnann, T., Wietschel, M., & Lux, B. (2019). Study on the opportunities of “power-to-x” in Morocco. Fraunhofer ISI. https://www.isi.fraunhofer.de/en/competence-center/energiepolitik-energiemaerkte/projekte/giz-ptx-morocco.html

Green H2 Maroc Cluster. (2021). Home. http://www.greenh2.ma/

IRESEN. (n.d.). Home [YouTube Channel]. https://www.youtube.com/channel/UC_EhFvR6oR3v_Ljta_K3PJw

The Ministry of Energy Transition and Sustainable Development. (2021). Hydrogène vert vecteur de transition énergétique de croissance durable [Green hydrogen as a vector for energy transition and sustainable growth]. https://www.mem.gov.ma/Pages/actualite.aspx?act=278

Strategie Nationale de l’Hydrogene Vert [Summary of Morocco’s Green Hydrogen National Strategy].https://www.mem.gov.ma/Lists/Lst_rapports/Attachments/28/Stategie%20nationale%20de%20l%20Hydrogene%20vert.pdf

World Energy Council. (2018). International aspects of a power-to-x roadmap: A report prepared for the World Energy Council Germany. https://www.weltenergierat.de/wp-content/uploads/2018/10/20181018_WEC_Germany_PTXroadmap_Full-study-englisch.pdf

قام مشروع الطاقة والمناخ الإقليمي في مؤسسة فريدريش إيبرت لمنطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا بالإشراف على إجراء هذه الدراسة وتحريرها ومراجعتها ونشرها.

السنة: 2022

عن مشروع الطاقة والمناخ الإقليمي في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا

يدعو مشروع الطاقة والمناخ الإقليمي في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا إلى إحداث التغيير في أنماط استخدام الطاقة ليتم الاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة والاستهلاك الأكثر كفاءة للطاقة. كما يعمل المشروع على البحث المتواصل عن حلول لتحقيق العدالة الاجتماعية في تحول قطاع الطاقة لنضمن الحماية لكوكب الأرض والناس على حد سواء.

ونظرًا لأنّ منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا هي واحدة من أكثر المناطق تأثرًا بتغير المناخ، فإننا نساهم في التغيير من خال تقديم المشورات السياسية، والبحث، والتوعية في مجال سياسات التغير المناخي، وتحول قطاع الطاقة، والاستدامة الحضرية. كل ذلك بالشراكة مع المؤسسات البحثية ومنظمات المجتمع المدني والشركاء الآخرين في المنطقة وفي أوروبا.

المسؤول:

سارة هب

مديرة المشروع الإقليمي للطاقة والمناخ في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا

للتواصل:

amman@fes.de

مؤسسة فريدريش إيبرت

مكتب عمان

صندوق بريد: 941876 عمان

11194 - الأردن