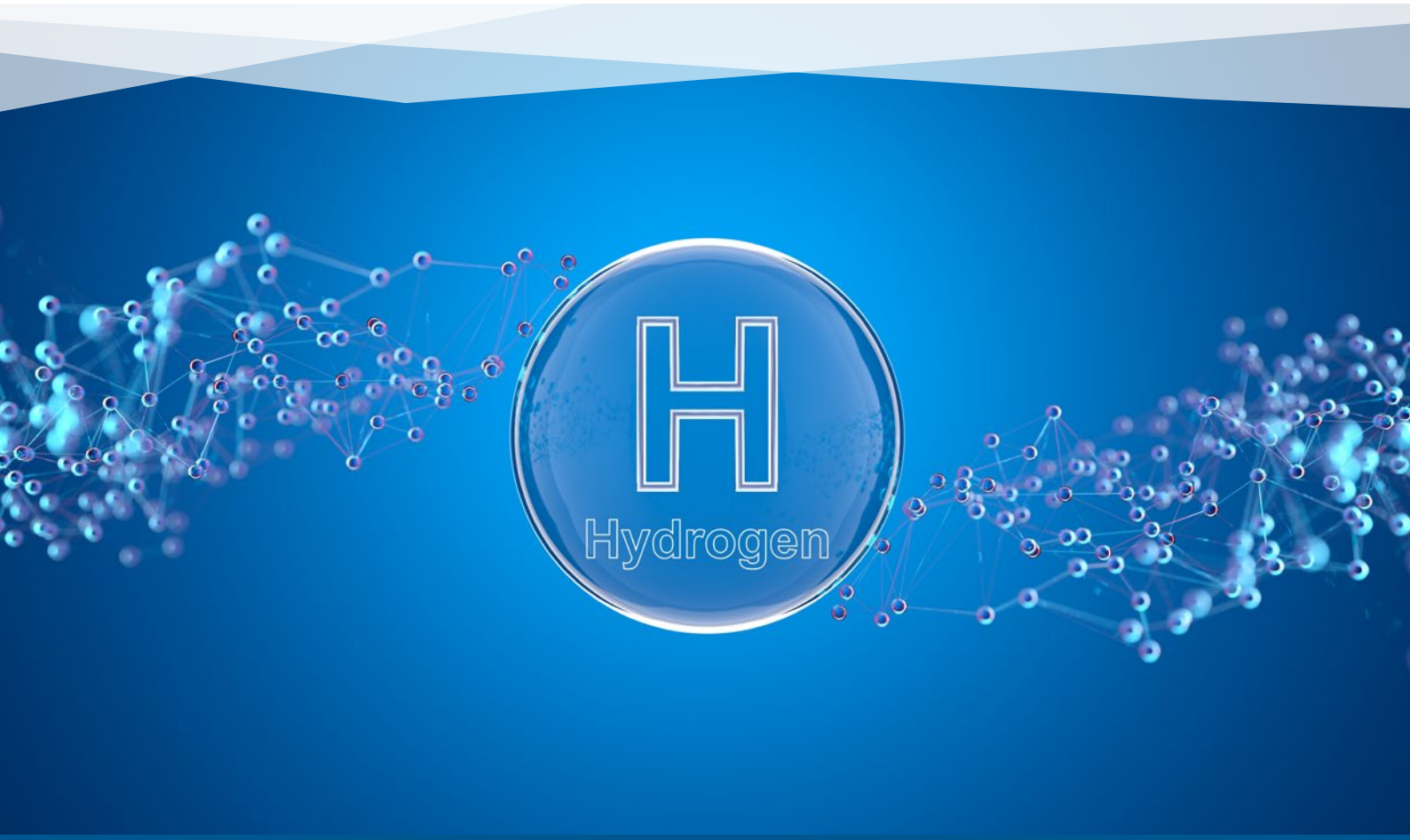
Wuppertal Institut

ENVIRONMENTAL made PROTECTION in Germany



الحوار الألماني الأردني للمياه والهيدروجين

العلاقة بين المياه كمورد وإنتاج الهيدروجين واستخدامه

بيانات الناشر

جهة النشر:
معهد فوبرتال للمناخ والبيئة والطاقة gGmbH
دوبرس بيرج 19
42103 فوبرتال
www.wupperinst.org

المؤلف/المؤلفة:
توماس أديسورن
thomas.adisorn@wupperinst.org
مايكا فينياكوب
maike.venjakob@wupperinst.org
يوليا بوسينجر
julia.poessinger@wupperinst.org

ترجمة
Lingua World GmbH
486-Bonner Straße 484
D-50968 Köln

التصميم
Melters Werbeagentur GmbH
Karlstraße 88
D-40210 Düsseldorf
www.melters-werbeagentur.com

طبعة
فبراير 2023

مصادر الصور
getty images
Adobe Stock

Supported by:

Federal Ministry
for the Environment, Nature Conservation,
Nuclear Safety and Consumer Protection

based on a decision of
the German Bundestag

فهرس المحتويات

1 | مقدمة **5**

2 | مشروع GJWHD – الحوار الألماني الأردني للمياه والهيدروجين **6**

3 | تطوير مفهوم العلاقة بين المياه والهيدروجين مع التركيز على ألمانيا **9**

3.1 عمليات الإنتاج المركزية، وخيارات استخدام الهيدروجين 9

3.2 الهيدروجين في إمدادات المياه والصرف الصحي في ألمانيا 12

3.3 الاشتراطات الإطارية في ألمانيا 15

3.4 العلاقة بين المياه والهيدروجين 18

4 | آفاق اقتصاد الهيدروجين الأردني **19**

4.1 فرص وتحديات الهيدروجين في الأردن 19

4.2 مساهمات في اقتصاد الهيدروجين للأردن 26

4.3 توقعات بشأن معايير استيراد الهيدروجين 30

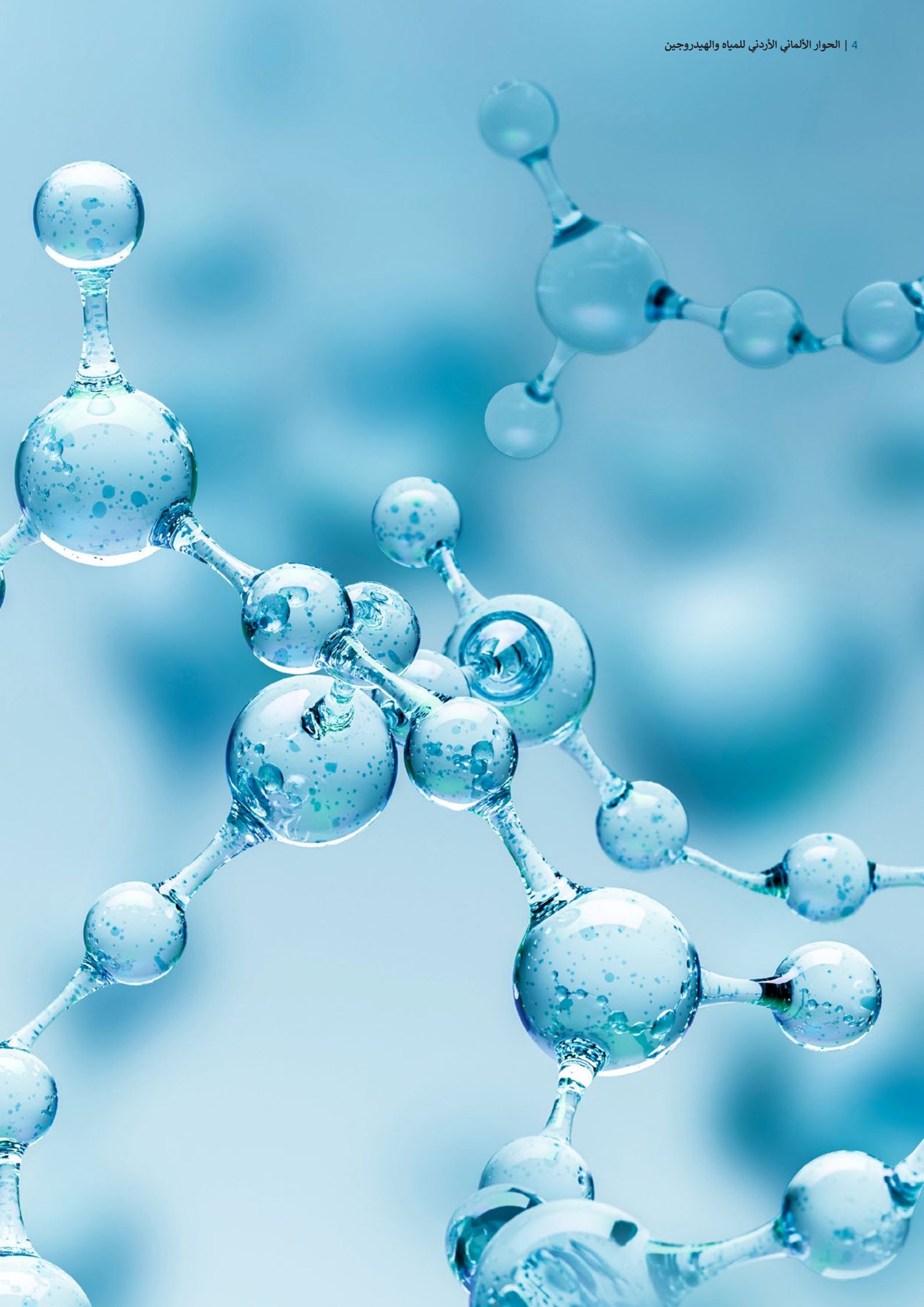
5 | ملخص وتوقعات **30**

6 | الفهارس والمراجع **32**

6.1 المراجع 32

6.2 فهرس الصور 33

6.3 فهرس الاختصارات، والوحدات، والرموز 34



1 | مقدمة

يُعد هذا الكتيب جزءًا من الحوار الألماني الأردني للمياه والهيدروجين (بالإنجليزية German-Jordanian Water-Hydrogen-Dialogue, GJWHD) الذي تموله الوزارة الاتحادية للبيئة، وحماية الطبيعة، والسلامة النووية، وحماية المستهلك (BMUV). بالإضافة إلى ورش العمل التي تم عقدها، يهدف هذا الكتيب إلى توفير المعلومات حول هذا الموضوع لأصحاب المصلحة المهتمين بشكل خاص بالقضايا المتعلقة بالمياه من أجل اقتصاد الهيدروجين في المستقبل.

ويشكل اهتمام الأردن باقتصاد الهيدروجين على خلفية الموارد المائية المحدودة للغاية السياق المباشر لعمل المشروع. ونظرًا لأن الماء (H_2O) مطلوب على وجه الخصوص للتحليل الكهربائي - كعملية مركزية لاقتصاد الهيدروجين العالمي - يمكن أن يؤدي اقتصاد الهيدروجين المستقبلي في البلاد إلى خلافات حول تكثيف الموارد. وبناءً على ذلك، هناك بالفعل حاجة للعمل، والتزام بعيد النظر.

الهدف من المشروع هو تبادل المعرفة حول العلاقة بين المياه كمورد وإنتاج الهيدروجين واستخدامه، مع التعرف على الظروف الخاصة بكل من الأردن وألمانيا، والتي تلعب دورًا مهمًّا. وفي هذا السياق، كان التركيز بشكل خاص على اقتصاد الهيدروجين اللامركزي، والذي يسمح أيضًا بتطبيقات الهيدروجين الميدانية.

لتعزيز التبادل، تم عقد ورشتي عمل في فوبرتال (ألمانيا) وعمان (الأردن). ومن أجل إلقاء الضوء على الموضوع من أكبر عدد ممكن من الزوايا الفكرية المختلفة، تألفت الوفود من الأردن وألمانيا، وكذلك المتحدثون من مجموعات مختلفة من أصحاب المصلحة (على سبيل المثال، القطاع الخاص في مقابل القطاع العام في مقابل الهيئات العلمية، مرافق المياه (الصرف) في مقابل اقتصاديات الطاقة). وتم صياغة مفهوم لمحتوى ورشة العمل، والذي يُشار إليه أدناه بالعلاقة بين المياه والهيدروجين.

وحتى لو كان التركيز في البداية على بلدين مختارين، الأردن وألمانيا، فإن مختلف جوانب ومحتويات هذا الكتيب قابلة للتحويل.

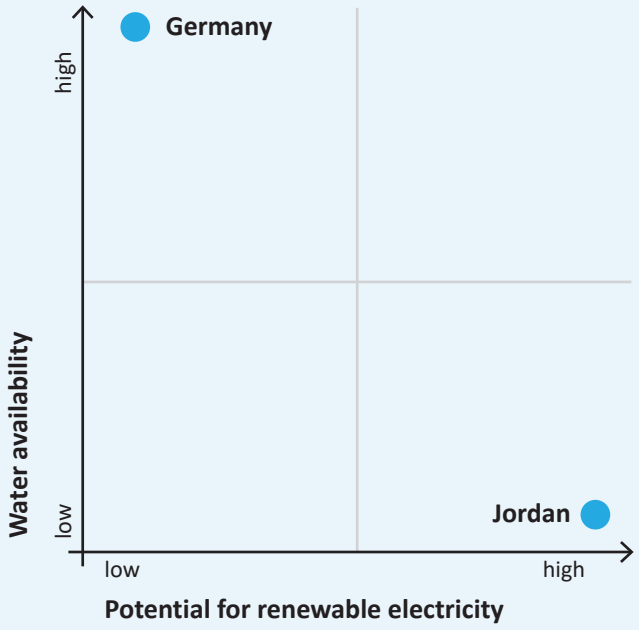
ونود أن نشكر الوزارة الاتحادية للبيئة، وحماية الطبيعة، والسلامة النووية، وحماية المستهلك (BMUV) على التعليقات والملاحظات المهمة، والدعم النشط من المنظمة الوطنية لتكنولوجيا الهيدروجين وخلايا الوقود (NOW) طوال فترة المشروع. علاوة على ذلك، نود أن نعرب عن خالص شكرنا لجميع المشاركين في الوفود، والمتحدثين في ألمانيا والأردن على المدخلات المحفزة، والمناقشات المنفتحة. لقد أخذوا وقتهم، وملؤوا المشروع بالحيوية.

2 | مشروع GJWHD – الحوار الألماني الأردني للمياه والهيدروجين

إن الأردن وألمانيا لديهما متطلبات مختلفة للغاية لإنتاج واستخدام الهيدروجين الأخضر. وهذا لا يخص فقط مناخ الاستثمار (Weltbank, 2021)، ولكن أيضًا هبات الموارد الطبيعية المتوافرة. وفي هذا السياق، فإن توافر الكهرباء والمياه المتجددين له أهمية مركزية، خاصة لإنتاج الهيدروجين الإلكتروليتي الأخضر. ولأنه لا يمكن تشغيل المحلل الكهربائي إلا بطريقة مستدامة مع الكهرباء الخضراء لفصل المياه (H_2O) إلى الهيدروجين (الأخضر) (H_2) والأكسجين (O_2). وعلى الرغم من أن هذا ضروري بنفس القدر، إلا أن الإمداد المستدام بالمياه للمحللات الكهربائية يحظى بأولوية أقل. ونظرًا لأن التحليل الكهربائي سيلعب دورًا مركزيًّا في سوق الهيدروجين العالمي (IEA, 2022b)، فإن هذه العملية مناسبة أيضًا مقارنة بعمليات إنتاج الهيدروجين البديلة لجميع البلدان التي تفكر في إنتاج الهيدروجين في المستقبل. وعليه، يجب مراعاة الموارد الحالية والمستقبلية للتحليل الكهربائي فيما يتعلق بالكهرباء والمياه.

بحسب **صورة 1**، هناك قيود على إنتاج الهيدروجين الأخضر في كل من الأردن وألمانيا. وهذه الاختلافات بالتحديد هي التي تُستخدم في المشروع لاستكمال المناقشات الحالية حول موضوع الهيدروجين، ولتعزيز التبادل بين أصحاب المصلحة الأردنيين والألمان؛ بهدف خلق فهم للظروف المحددة في البلدان المعنية.

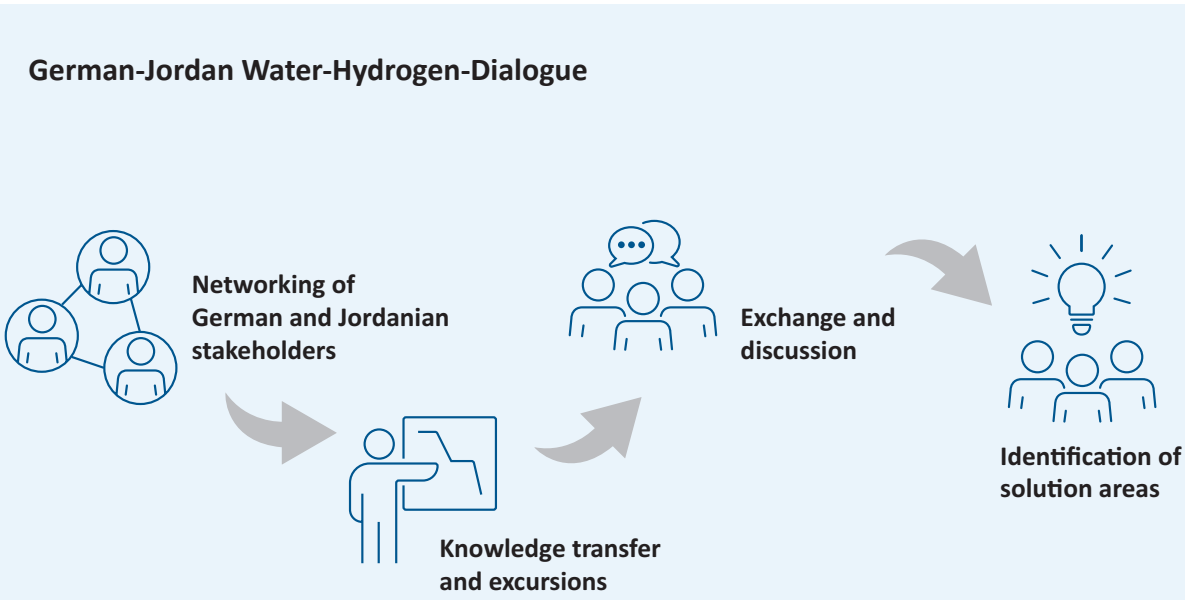
في حين أن النقاش السياسي والعلمي حول إنتاج الهيدروجين غالبًا ما يكون مدفوعًا بالطاقة أو الكهرباء، إلا أنه من الاهتمامات المهمة للمشروع إضافة منظور مهم لهذا المنظور الأحادي الجانب. وحتى إذا استمرت الكهرباء في لعب دور مركزي، خاصة في التحليل الكهربائي، فإن المشروع يحاول أيضًا العمل على موضوع الهيدروجين من منظور المياه كمورد.



صورة 1
نقاط البدء المختلفة في ألمانيا والأردن كخلفية للمشروع (عرض خاص)

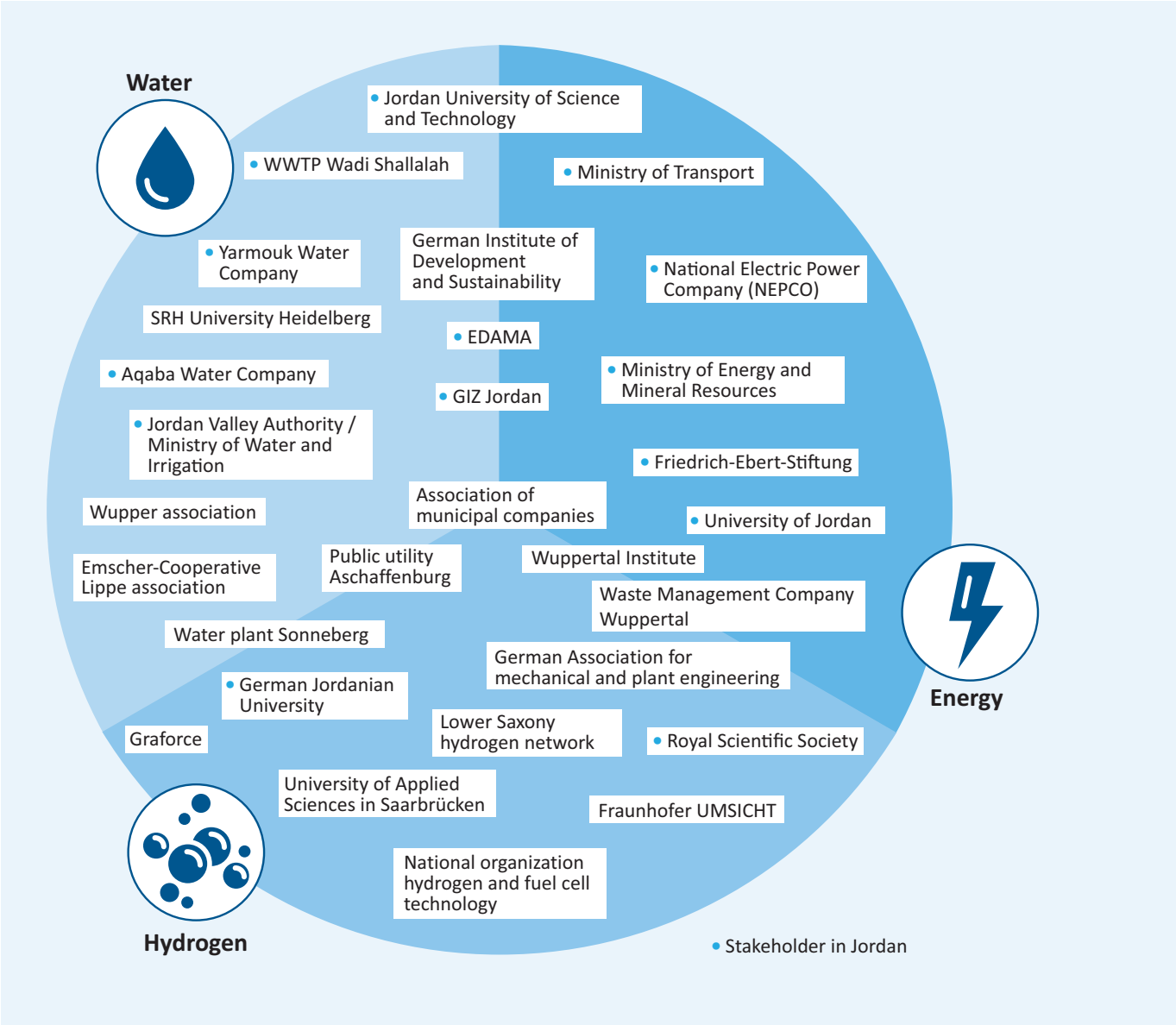
وبالإضافة إلى ذلك، يضيف المشروع جانبًا آخر للمناقشة. ولأنه بينما تتم مناقشة الأردن، ودول الشرق الأوسط، وشمال أفريقيا بشكل متكرر كمصدرين مهمين للهيدروجين لألمانيا وأوروبا، يركز المشروع على الإنتاج اللامركزي، واستخدام الهيدروجين. ويوجد بالفعل العديد من نتائج المشاريع المثيرة والناجحة في ألمانيا، والتي يمكن أن تمثل ممرات الحل للبلدان الأخرى. وحتى لو ارتبطت هياكل الهيدروجين اللامركزية بالتحديات؛ فقد تنشأ أيضًا فرص هائلة (مثل تخزين الكهرباء على المدى الطويل، والخفض المحلي للانبعاثات). إن الهدف الأسمى للمشروع هو تبادل المعرفة الخاصة بكل بلد، والتي لها صلة ببناء (توسيع) اقتصاد الهيدروجين.

من أجل هذا التبادل، تم تنظيم وتنفيذ ورشتي عمل كجزء من المشروع في خريف 2022 في فوبرتال (ألمانيا) وعمان (الأردن). ولصياغة محتوى التبادل، تم تجميع المعرفة الحالية حول العلاقة بين المياه كمورد وإنتاج الهيدروجين (باختصار: العلاقة بين المياه والهيدروجين) بناءً على مواد الأبحاث. وتم فحص هذه العلاقة بين المياه والهيدروجين بشكل موضوعي، ومناقشتها من وجهات نظر مختلفة.



صورة 2
نهج تخطيطي للعمل في المشروع (عرض خاص)

1 يشير المصطلح MENA إلى "الشرق الأوسط وشمال أفريقيا".



صورة 3
المؤسسات المشاركة في ورش عمل المشروع في فوبرتال (ألمانيا)، وعمان (الأردن)
(عرض خاص)

من خلال تنفيذ ورش العمل، يمكن استكمال نتائج مواد الأبحاث حول العلاقة بين المياه والهيدروجين بشكل كبير. ولإعداد ورش العمل ومتابعتها، تم إنشاء ما يُسمى بأوراق الحقائق، والتي تم تطويرها كوثائق مستقلة. يحتوي الفصلان التاليان على أوراق الحقائق هذه، ويجمعان نتائج تقييم المواد مع نتائج ورش العمل في هذا الكتيب.

3 | تطوير مفهوم العلاقة بين المياه والهيدروجين مع التركيز على ألمانيا

فيما يلي، تم اشتقاق مفهوم العلاقة بين المياه والهيدروجين (الفصل 3.1 إلى 3.3)، وعرضه في آخر الأمر (الفصل 3.4).

3.1 عمليات الإنتاج المركزية، وخيارات استخدام الهيدروجين

ورقة الحقائق 1:
العمليات المركزية لإنتاج الهيدروجين

الوضع الحالي

من أجل إنتاج الهيدروجين الأخضر، تحتل تقنيات المحلل الكهربائي مركز المناقشات السياسية؛ لأنها تتيح فصل الماء إلى هيدروجين وأكسجين. الجدير بالذكر أنه يتم تشغيل المحلل الكهربائي بالكهرباء. وفي حالة ورود الكهرباء من الشبكة، التي لا تزال تعتمد في ألمانيا على الوقود الأحفوري؛ فإن الهيدروجين يعتبر أصفر. وبالنسبة للهيدروجين الأخضر، يجب تشغيل المحلل الكهربائي بكهرباء متجددة (إضافية). وهناك ثلاث تقنيات رئيسية للمحلل الكهربائي تختلف في النضج التكنولوجي، والتكلفة، والخصائص الأخرى (AEL، و PEMEL، و HTEL).

كما يمكن إنتاج الهيدروجين من الغاز الطبيعي؛ عن طريق الإصلاح البخاري، أو الانحلال الحراري. ومع ذلك، فإن إصلاح الغاز الطبيعي يرتبط بانبعاثات ثاني أكسيد الكربون CO_2. وعند إطلاقه في الغلاف الجوي، يكون الهيدروجين رماديًّا. وإذا تم توصيل محطة احتجاز الكربون بمحطة الإصلاح البخاري، ثم يتم تخزين ثاني أكسيد الكربون CO_2 تحت الأرض، فسيكون الهيدروجين أزرق. ويُنتج الانحلال الحراري للغاز الطبيعي الكربون الصلب كمنتج ثانوي للهيدروجين الفيروزي (MWIDE 2020).

يوفر المحلل الكهربائي PEMEL مستقبلًا رائعًا لدمج الكهرباء المتجددة المتقلبة؛ حيث إن هذا النوع من المحلل الكهربائي هو الأكثر مرونة؛ نظرًا لقصر أوقات بدء التشغيل. وعلى النقيض من ذلك، فإن التحليل الكهربائي ذا درجة الحرارة العالية (HTEL) له أوقات بدء تشغيل طويلة جدًّا، ولكن نظرًا لأنه يعمل مع حرارة عالية الحرارة، يمكنه دمج الحرارة المهدرة من العمليات الصناعية. واليوم يتمتع التحليل الكهربائي القلوي (AEL) بأفضل أداء عام، خاصةً عندما تكون الطاقات المتجددة أقل تقلبًا في البلدان المعنية.

ويمكن أيضًا معالجة الهيدروجين وتحويله إلى منتجات أخرى، والتي تتطلب المزيد من العمليات الاصطناعية. ويتيح التوليف (التركيب الاصطناعي) فيشر - تروبش، على سبيل المثال، إنتاج الكيروسين الصناعي والديزل. ومع ذلك، تتطلب مثل هذه الأنواع من الوقود المتجدد ثاني أكسيد الكربون CO_2، والذي يمكن أن يأتي من التقاط الهواء المباشر، أو من الكتلة الحيوية أو من المنشآت الصناعية. وتتطلب منتجات التوليف الأخرى؛ مثل الأمونيا النيتروجين، والذي يأتي عمومًا من الهواء المحيط (Ausfelder & Dura, 2019).

وتجدر الإشارة إلى أن هناك أيضًا فرصًا تكنولوجية لتصبح الكتلة الحيوية جزءًا من اقتصاد الهيدروجين (FVEE, 2021). وبالنسبة لبقايا النفايات؛ مثل حمأة الصرف الصحي، هناك طرق كيميائية حرارية؛ مثل التغويز، أو الإصلاح، أو الانحلال الحراري للميثان، أو التحويل الحراري المائي. ومع ذلك، يبدو أن الأجندة السياسية تركز على PtX.

التوقعات

من المتوقع أن تنخفض تكلفة المحلل الكهربائي بشكل كبير. وتسعى ألمانيا جاهدة لزيادة إنتاج الهيدروجين المحلي. كما تهدف الإستراتيجية الوطنية للهيدروجين إلى تركيب 5 جيجاواط من قدرة التحليل الكهربائي بحلول عام 2030 (Bundesregierung, 2020).

ومع انتخابات نهاية عام 2021 تضاعف الهدف. وعلى عكس التركيز السياسي على المحلل الكهربائي، هناك نقاش أقل حول الهيدروجين الحيوي في ألمانيا. ونظرًا للطلب الكبير المتوقع على الهيدروجين في صياغة نماذج السيناريو، ستعتمد ألمانيا أيضًا على واردات الهيدروجين، والمنتجات القائمة على الهيدروجين (Wuppertal Institut & Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung Econ, 2020).

جوانب العلاقة

على وجه الخصوص، يتطلب إنتاج الهيدروجين من خلال التحليل الكهربائي - وكذلك مسارات التكنولوجيا الأخرى - المياه. ويبلغ الحد الأدنى المطلوب لإنتاج كيلوجرام واحد من الهيدروجين 8.92 لترات من المياه منزوعة المعادن بالكامل (Beswick et al., 2021). ويتطلب الحصول على هذه الكمية من المياه عالية النقاء ما بين 15 و 30 لترًا من الإمداد العمومي (Energy Sector Management Assistance Program, 2020). ويمكن أن تحتوي التقنيات المساعدة أيضًا على متطلبات مائية للتشغيل، فبالنسبة للطاقة الشمسية الكهروضوئية، يلزم ما بين 0.01 م³/ ميجاواط ساعة، وما يصل إلى 0.1 م³/ ميجاواط ساعة لتنظيف الوحدات (Zelt et al., 2021). ويستخدم الهيدروجين الوردي - الذي يعمل بالطاقة النووية - حوالي 270 كجم من مياه التبريد لكل كجم من الهيدروجين (Hydrogen Council, 2021). وعند استيراد الهيدروجين من المناطق القاحلة بشكل خاص، من المهم مراعاة مدى تأثير الإنتاج المحلي على إدارة المياه المحلية.

ورقة الحقائق 2:
خيارات استخدام الهيدروجين

الوضع الحالي

يمكن أن يلعب الهيدروجين الأخضر دورًا محوريًّا في تحقيق وفورات في الانبعاثات في مختلف القطاعات. ومع ذلك، فإن العيب الرئيسي للهيدروجين وغيره من منتجات الكهرباء إلى X (PtX) هو فقدان الكفاءة. فعلى سبيل المثال، تُقدر كفاءة التحويل في إنتاج الهيدروجين عن طريق التحليل الكهربائي بحوالي 61٪ اليوم، وبنسبة 70٪ في المستقبل (Oeko-Institut, 2019)، واعتمادًا أيضًا على تقنية التحليل الكهربائي المستخدمة. وبالنسبة لمنتجات PtX، تكون خسائر التحويل أعلى. ومع ذلك، هناك بعض الأمثلة في ألمانيا التي يصعب تزويدها بالكهرباء؛ ولذلك اختارت الهيدروجين كمسار لإزالة الكربون. ويعتمد معظم الهيدروجين المنتج في ألمانيا الآن على الغاز الطبيعي، ويُستخدم في القطاع الكيميائي، وفي المصافي (DIHK, 2020).

وبشكل عام، تعتبر الصناعة كثيفة الاستهلاك للطاقة محركًا مهمًا للطلب على الهيدروجين في ألمانيا. فعلى سبيل المثال، يمكن لصانعي الصلب استخدام الهيدروجين عن طريق التحول من إنتاج الصلب التقليدي، الذي يعتمد بشكل كبير على الفحم/فحم الكوك، إلى تكنولوجيا الاختزال المباشر المبتكرة. وسيمكن الهيدروجين الأخضر من تحقيق وفورات كبيرة في ثاني أكسيد الكربون CO_2 في إنتاج الصلب (Agora Energiewende & Wuppertal Institut, 2019).

وفي قطاع التنقل، تُعد الكهرباء المباشرة أهم خيار تم تحقيقه لسيارات الركاب. ومع ذلك، بالنسبة لمجالات أخرى؛ مثل النقل الثقيل، والآلات المتنقلة، والشحن البحري، والطيران، تُعتبر منتجات الهيدروجين أو PtX أكثر ملاءمة أو حتى بدون بديل (Nationaler Wasserstoffrat, 2021). وفي مدينة فوبرتال الألمانية - على سبيل المثال - تعمل الحافلات العامة بالهيدروجين وخلايا الوقود، وأيضًا بسبب التضاريس (الجبلية). وبالإضافة إلى

مدينة فوبرتال، يتم أيضًا تشغيل عربة جمع النفايات المزودة بخلايا وقود الهيدروجين في مدينة دويسبورغ. وفي الوقت الحالي، لا يبدو أن هذه التطبيقات وغيرها من تطبيقات الهيدروجين اقتصادية دون تمويل إضافي.

كما يمكن إضافة كمية محدودة من الهيدروجين إلى شبكة الغاز الطبيعي، ولا سيما لتلبية متطلبات التدفئة. ولا توجد حدود للخلط لمزيد من المعالجة للميثان. وفيما يتعلق باستخدام الهيدروجين المخلوط أو الميثان الاصطناعي، يجب أيضًا مراعاة البدائل المرتبطة بفواقد منخفضة الكفاءة. كما تتم حاليًا مناقشة واختبار إعادة تحويل الهيدروجين في محطات توليد الطاقة الغازية المحولة.

التوقعات

في السيناريوهات، من المتوقع أن تتراوح متطلبات الهيدروجين في ألمانيا بين 18 و66 تيراواط ساعة لعام 2030، وبالنسبة لعام 2045 من المتوقع أن تزداد المتطلبات إلى ما بين 237 و 500 تيراواط ساعة تقريبًا. وحتى لو رفع الائتلاف الحاكم الجديد أهداف التوسع للمحللات الكهربائية؛ فستظل هناك حاجة كبيرة لواردات الهيدروجين (الأخضر). ففي حين أن هناك العديد من العوائق المرتبطة بالهيدروجين الأخضر، فإن تكلفة الإنتاج هي إحدى العوائق الرئيسية (Tholen et al., 2021). وقبل أزمة الغاز الطبيعي الناتجة عن الغزو الروسي لأوكرانيا، افترض الخبراء أن الهيدروجين الرمادي سيظل خيارًا رخيصًا. وسيكون تحسين تطوير الأسعار، وإزالة الحواجز الأخرى أمام إنتاج واستخدام الهيدروجين أمرًا بالغ الأهمية.

جوانب العلاقة

تختبر مرافق البلدية، وشركات إدارة المياه البلدية في العديد من المشاريع التجريبية التي يمكن بموجبها إنتاج الهيدروجين بالشروط التقنية، وفي أي مجالات مختلفة للتطبيق يمكن استخدامه (Stock, 2022). وينتج عن احتراق الهيدروجين المياه (والحرارة). وتتميز المواد التي تعالج إعادة تدوير المياه لإنتاج الهيدروجين بأنها محدودة. وإذا لم يتم إنتاج واستخدام الهيدروجين في نفس المكان؛ فإن إدارة الدورة هذه تمثل تحديًا.

3.2 الهيدروجين في إمدادات المياه والصرف الصحي في ألمانيا

ورقة الحقائق 3:
الهياكل، والتشغيل، والعمليات في قطاع الصرف الصحي

الوضع الحالي

تُعتبر معالجة مياه الصرف الصحي في ألمانيا - إلى حد كبير - مهمة عامة تقوم بها البلديات. وهناك 7000 شركة صرف صحي بلدية، وبالتالي هيكل تنظيمي مجزأ. وتستهلك محطات معالجة مياه الصرف الصحي 20٪ من احتياجات الكهرباء في منطقة البلدية، وبالتالي أكثر بكثير من المرافق البلدية الأخرى؛ مثل المدارس، أو المستشفيات، أو المباني الإدارية. وفي ألمانيا، تبلغ هذه الحصة البالغة 20٪ حوالي 4400 جيجاواط ساعة من الكهرباء سنويًا. وفي ضوء ارتفاع أسعار الطاقة، والحاجة الكبيرة للعمل في مجال المناخ وحماية البيئة، تتم مناقشة دور محطات معالجة مياه الصرف الصحي بشكل متزايد في هذا السياق. وتعتمد مسألة مدى توفر الإمكانيات التقنية، وكذلك الإمكانات الاقتصادية لاستخدام التقنيات المبتكرة في محطات معالجة مياه الصرف الصحي - من بين أمور أخرى - على حجم المحطة المعنية.

تنقسم محطات معالجة مياه الصرف الصحي إلى خمس فئات من حيث الحجم، تتراوح من أقل من 1000 معادل من السكان (فئة الحجم 1) إلى أكثر من 100000 معادل من السكان (فئة الحجم 5). ويتكون حوالي ثلث تكاليف تشغيل محطة معالجة مياه الصرف الصحي من تكاليف الطاقة. وتتمثل إحدى طرق تقليل ذلك في تخمير حمأة مياه الصرف الصحي التي تتراكم في محطة معالجة مياه الصرف الصحي، وتحويل غاز التخمير الناتج إلى كهرباء في محطة توليد الطاقة الحرارية (BHKW) في الموقع. ويتم تصنيف الغاز المستخدم على أنه محايد لثاني أكسيد الكربون CO_2، ويساعد ليس فقط على تغطية الكهرباء، ولكن أيضًا متطلبات الحرارة لمحطة معالجة مياه الصرف الصحي.

وهناك إمكانية أخرى لتحقيق وفورات تتعلق بتشغيل خزانات التنشيط، والتي - حسب حجم محطة معالجة مياه الصرف الصحي - تمثل حوالي 50٪ من تكاليف الكهرباء - وفي بعض الحالات تصل إلى 80٪. ويتم توفير الهواء لخزان التنشيط؛ مما يضمن زيادة إمداد الأكسجين للكائنات الحية الدقيقة في الخزان. إن تركيب المراوح التوربينية الفعالة، ذات الأبعاد الجيدة يؤتي ثماره في غضون بضع سنوات، وهو ممارسة شائعة. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يقلل استخدام الأكسجين النقي، أو يعوض تمامًا عن الحاجة إلى الهواء المضغوط.

يمكن أيضًا تجنب الانبعاثات؛ من خلال تجفيف حمأة مياه الصرف الصحي الحرارية الشمسية. وتُعد محطة معالجة مياه الصرف الصحي في بوتروب واحدة من أكبر محطات معالجة مياه الصرف الصحي في أوروبا. وتتم معالجة حمأة مياه الصرف الصحي التي يبلغ حجمها 4 ملايين نسمة في الموقع. وقبل التحويل، تم تخصيب حمأة الصرف الصحي بالفحم الصلب والليجنيت؛ لضمان القيمة الحرارية اللازمة للاحتراق الذاتي. ومع إنشاء أكبر محطة تجفيف حمأة مياه الصرف الصحي الحرارية الشمسية في العالم، يمكن الآن الاستغناء عن الفحم الصلب والليجنيت. وهذا يوفر حوالي 70.000 طن من ثاني أكسيد الكربون CO_2 سنويًا. وضمن روبوتات الخراطة الكهربائية أن حمأة الصرف الصحي يتم تدويرها باستمرار. وإذا لم يكن الإشعاع الشمسي كافيًا، يتم توفير الحرارة من النظام نفسه، أو من محطة توليد طاقة حرارية.

التوقعات

بسبب التغيير الديموغرافي، سينخفض عدد السكان الألمان من 83.7 مليون نسمة حاليًا إلى 67 حتى 73 مليون نسمة في عام 2060. وهذا الانخفاض يؤدي إلى انخفاض حجم مياه الصرف الصحي. كما أن فترات الجفاف الأطول المتوقعة ستؤدي أيضًا إلى انخفاض الجريان السطحي مؤقتًا. ويمكن أن تؤدي الرواسب في نظام الصرف الصحي إلى التآكل، وتكون الروائح، وزيادة انتشار الحشرات. فإجراء المواءمات أمرًا ضروريًا. وينطبق هذا أيضًا على العدد المتزايد من الأمطار الغزيرة، والتي تتطلب على سبيل المثال بناء مرافق تخزين مؤقتة، وأيضًا فتح

المناطق. وأخيرًا، ونظرًا للتغير الديموغرافي في العقود القادمة، من المتوقع حدوث زيادة في استهلاك الأدوية؛ مما سيزيد من الطلب على معالجة مياه الصرف الصحي.

جوانب العلاقة

تعتبر الهياكل اللامركزية لقطاع الصرف الصحي شرطًا أساسيًا لاقتصاد الهيدروجين اللامركزي. ويمكن استخدام الأكسجين كمنتج ثانوي للتحليل الكهربائي في التنقية البيولوجية أو معالجة الأوزون. وفي المواقع التي يتم فيها تخمير حمأة مياه الصرف الصحي، واستخدام محطة توليد الطاقة الحرارية BHKW، يوفر إنتاج الميثانول مزايا. ويمكن إنتاج الميثانول مع الهيدروجين من التحليل الكهربائي، وفصل ثاني أكسيد الكربون CO_2 من غازات العادم في محطة توليد الطاقة الحرارية BHKW؛ حيث يمكن دمج التقنيات المختلفة بشكل تحفيزي. ويمكن استخدام الميثانول في محطة معالجة مياه الصرف الصحي كمادة مضافة لإزالة النتروجين في مرحلة الحمأة المنشطة (Europäisches Patentamt, 2006).

وتتمثل خيارات الاستخدام البديلة في الصناعة الكيميائية، أو كوقود.

ورقة الحقائق 4:
تقنيات الهيدروجين في إمدادات المياه والصرف الصحي في ألمانيا

الوضع الحالي

يُنظر إلى محطات معالجة مياه الصرف الصحي على أنها إمكانية لإنتاج الهيدروجين اللامركزي في ألمانيا. ويمكن لمحطات معالجة مياه الصرف الصحي استخدام الأكسجين، وهو منتج ثانوي للتحليل الكهربائي؛ لمعالجة مياه الصرف الصحي، إما بالأكسجين النقي في خزان التنشيط، أو باستخدام الأوزون لإزالة آثار العناصر العنيدة. وبالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تساهم حرارة العملية من المحلل الكهربائي في إنتاج غاز التخمير. ويمكن استخدام الهيدروجين نفسه لتوليد الكهرباء في الموقع؛ لإضافته إلى شبكة الغاز الطبيعي، أو لأغراض التنقل.

تم تنفيذ عدد قليل من مشاريع الهيدروجين، معظمها في مرحلة البحث والتطوير، في محطات معالجة مياه الصرف الصحي. في وقت مبكر من عام 2003/2002، تم تركيب محلل كهربائي PEMEL في محطة معالجة مياه الصرف الصحي في بارث جنبًا إلى جنب مع نظام الكهروضوئية لتشغيل المحلل الكهربائي. وأثناء استخدام الهيدروجين في حافلة تعمل بخلايا الوقود، تم استخدام الأكسجين في محطة معالجة مياه الصرف الصحي لمعالجة المياه. وأدت الزيادة في عدد العملاء - بما في ذلك موقعان للتخييم - إلى زيادة حمل المياه العادمة التي تطلبت التدخل. وتمت إدارة قمم الحمل هذه عن طريق التغذية بأكسجين إضافي من المحلل الكهربائي PEMEL (Jentsch & Büttner, 2019). وفي مشروع LocalHy، تم إنشاء محطة اختبار صغيرة لمعالجة مياه الصرف الصحي مع محلل كهربائي PEMEL في موقع محطة معالجة مياه الصرف الصحي العاملة في زونينبيرج. وهنا، أيضًا، كان التركيز على استخدام الأكسجين لمعالجة مياه الصرف الصحي في مرحلة المعالجة البيولوجية، والتي تستهلك طاقة عالية جدًا (~55٪). ونظرًا للتكلفة المنخفضة للأكسجين التقليدي في الغلاف الجوي، كان أحد الاستنتاجات هو أن أكسجين المحلل الكهربائي لا يمكن أن يقلل بشكل كبير من تكلفة الهيدروجين الأخضر في وقت المشروع. وفي ظل ظروف معينة، يمكن أن يكون الأكسجين النقي خيارًا مثيرًا للاهتمام لمحطات معالجة مياه الصرف الصحي.

تم تركيب محلل كهربائي في معمل حرق النفايات في مدينة فوبرتال. وبينما يعمل الهيدروجين على تشغيل جزء من أسطول حافلات المدينة، فإنه لا يتم استخدام الأكسجين. وبدأت المناقشات بين مشغل محطة حرق النفايات وشركة التخلص من مياه الصرف المحلية حول كيفية استخدام الأكسجين من المحلل الكهربائي لمعالجة مياه الصرف. ويعاني خط أنابيب أكسجين بين الموقعين من عقبات مالية.

وقامت جميعة فوبرتال، وهي مشغل لمحطات معالجة مياه الصرف الصحي في بيرجشس لاند بالتحقيق في دور الهيدروجين كخيار المرونة، والأكسجين الإلكتروليتي للأوزون في المشاريع البحثية.

وبالنسبة للأوزون، يجب تجفيف الأكسجين النقي، وإزالة الهيدروجين المتبقي.

وقد تم إنتاج الهيدروجين عالي النقاء لخلايا الوقود المتنقلة والثابتة في منشأة اختبار في محطة معالجة مياه الصرف الصحي التابعة لجمعية إمشر التعاونية في مدينة دينسلاكن. وهنا، تمت معالجة غاز الصرف الصحي. وفي مشروع آخر، تم إنتاج الميثانول (القائم على الهيدروجين) في مدينة دينسلاكن. وبينما يُستخدم الغاز الحيوي غالبًا في محطات معالجة مياه الصرف الصحي الألمانية في التوليد المشترك لتزويد كل من الكهرباء والحرارة للعمليات ذات الصلة، قام الباحثون بتحويل الغاز الحيوي من محطة معالجة مياه الصرف الصحي من خلال تخليق الميثانول. وعلى وجه الخصوص، افترضوا أنه يمكن أن يكون من المنطقي - من الناحية الاقتصادية - إنتاج مصدر طاقة خفيف وقابل للتخزين والنقل في الأوقات التي يوجد فيها فائض من الكهرباء في الشبكة، وقليل من الطلب على الحرارة، خاصة في الصيف (Klein, 2022).

يهدف الباحثون في مشروع Sludge2P إلى تطوير مفهوم عملية جديد لاستعادة الفوسفات، وإنتاج غاز منتج وسماد صالح للاستخدام. وفي هذه العملية، يجب فصل الهيدروجين عن غاز المنتج. ويتم استخدام الغاز المتبقي لتسخين مفاعل الصهر. ويمكن لشركة GRAFORCE الألمانية تقديم تقنيتين لإنتاج الهيدروجين في محطة معالجة مياه الصرف الصحي من أجل إنتاج الهيدروجين من حمأة الصرف الصحي ومن الغاز الحيوي (Opitz, 2022). وقد استخدمت مرافق بلدية أشافنبورج حتى الآن الهيدروجين الرمادي لنزع النتروجين من المياه الجوفية القريبة من السطح. وتم نقل النترات من خلال الزراعة (المكثفة) عبر التربة إلى المياه. كما يتم معالجة مياه الشرب بواسطة الهيدروجين. وفي المستقبل، سيتم استخدام الهيدروجين الأخضر لهذا الغرض (Gerlach, 2022).

التوقعات

لا يعتبر إنتاج الهيدروجين عن طريق التحليل الكهربائي في محطات معالجة مياه الصرف الصحي في الوقت الراهن حالة اقتصادية. ومن المفترض أن تكاليف إنتاج الهيدروجين في محطات معالجة مياه الصرف الصحي تزيد عن 7 يورو/كجم هيدروجين (Niederste-Hollenberg et al., o. J.).

ويمكن خفض تكاليف إنتاج الهيدروجين باستخدام الأكسجين في معالجة مياه الصرف الصحي، ولكن يبدو أن هناك حاجة إلى دعم سياسي. ولا توجد بيانات موثوقة متاحة عن تكاليف إنتاج الهيدروجين من حمأة الصرف الصحي (عن طريق الانحلال الحراري، أو التغويز). ونادرًا ما يتم النظر في إنتاج الهيدروجين المحلي، أو اللامركزي في الإطار السياسي للحكومة الفيدرالية الألمانية.

جوانب العلاقة

باختصار، يمكن القول إن صناعة المياه والصرف الصحي توفر موارد مختلفة لإنتاج الهيدروجين. وبالإضافة إلى المياه العذبة ومياه البحر المُحلاة، يشمل ذلك أيضًا مياه الصرف الصحي المعالجة، وحمأة الصرف الصحي، والمياه المعالجة، والغاز الحيوي. وهناك أيضًا استخدامات محتملة، اعتمادًا على عملية إنتاج الهيدروجين المستخدمة والمنتجات الثانوية المرتبطة (المرغوبة). ويمكن لمحطات معالجة مياه الصرف الصحي من الناحية النظرية استخدام جميع المنتجات الناتجة عن التحليل الكهربائي، على الرغم من أنها ليست مجدية اقتصاديًا بعد. كما يمكن أن تجعل إشارات الأسعار المقابلة من نظام الكهرباء استخدام المحلل الكهربائي (أو عمليات أخرى) أكثر جاذبية كخيار مرونة.

3.3 الاشتراطات الإطارية في ألمانيا

ورقة الحقائق 5:
الاشتراطات الإطارية للهيدروجين

الوضع الحالي

يلعب الهيدروجين دورًا رئيسيًّا في خطط الحكومة الاتحادية لتنفيذ انتقال الطاقة بنجاح، وتحقيق أهداف حماية المناخ. وينصب التركيز على الهيدروجين الأخضر. فالهدف هو استخدام هذا الهيدروجين الأخضر لتقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون CO_2 بشكل كبير، لا سيما في الصناعة والنقل. وبالإضافة إلى جوانب سياسة المناخ، يُقال إن تقنيات الهيدروجين الخضراء لديها إمكانات كبيرة للوظائف والأسواق الجديدة. لذلك فإن هدف ألمانيا هو توسيع دورها العالمي الرائد في تكنولوجيا الهيدروجين والحفاظ عليه. ويتم إنتاج واستهلاك ما يقرب من 55 إلى 60 تيراواط ساعة من الهيدروجين في ألمانيا اليوم، ومعظمها من الهيدروجين الرمادي من الغاز الطبيعي، وحوالي 5٪ فقط من الهيدروجين الأخضر.

وكخطوة أولى ملموسة، نشرت الحكومة الاتحادية إستراتيجيتها الوطنية للهيدروجين في عام 2020. وتحدد هذه الإستراتيجية الخطوات اللازمة للمساعدة في تحقيق أهداف المناخ، وإنشاء سلاسل قيمة جديدة للاقتصاد الألماني، وزيادة توسيع التعاون الدولي في سياسة الطاقة.

التوقعات

يخطط الاتحاد الأوروبي لتقليل الاعتماد بشكل كبير على الواردات من روسيا. ويتعين تحقيق ذلك أيضًا في إطار إستراتيجية "Repower EU" من خلال زيادة استخدام الهيدروجين (Kantz, 2022). ويجب أن تحقق ألمانيا أهدافًا طموحة لحماية المناخ بحلول عام 2030، والتي لا يمكن تحقيقها دون التوسع الطموح في اقتصاد الهيدروجين. ووفقًا لمجلس الهيدروجين المعين من قبل الحكومة الاتحادية (كهيئة استشارية مستقلة وغير حزبية)، فإن بعض متطلبات سياسة الطاقة الرئيسية ضرورية لاقتصاد الهيدروجين الفعال. وتشمل هذه، على سبيل المثال، 1) التوسع الطموح للطاقات المتجددة في ألمانيا وأوروبا، 2) التصنيع وإنشاء صناعة فعالة للمحلل الكهربائي؛ بما في ذلك محيط المورّد، وخفض تكلفة الهيدروجين، 3) إصلاح نظام الضرائب والجباية والدفع أولًا بأول، 4) توسيع البنية التحتية أو 5) اللوائح والتشريعات الفنية الأوروبية الموحدة.

تقدم الحكومة الاتحادية أموالًا ضخمة لتنفيذ إستراتيجية الهيدروجين الوطنية. وكجزء من حزمة التحفيز الاقتصادي لعام 2020، خصصت الحكومة الاتحادية تسعة مليارات يورو (سبعة مليارات يورو للسوق الوطنية، وملياري يورو للشراكات الدولية) لتنفيذ الإستراتيجية. وتخصص الوزارة الاتحادية للاقتصاد وحماية المناخ 900 مليون يورو لبرنامج "H2Global". ومع هذا البرنامج، سيتم الترويج لسوق الهيدروجين الأخضر عبر ما يُسمى بإجراءات المزاد المزدوج. ومن أجل التوفيق بين العرض والطلب، يبرم الوسيط عقود شراء طويلة الأجل على جانب العرض، وعقود بيع قصيرة الأجل على جانب الطلب. ومع الأخذ في الاعتبار معايير الاستدامة، يتم منح العقد أقل سعر عرض، أو أعلى سعر بيع.

تهدف إستراتيجية الهيدروجين الوطنية إلى إنتاج محلي من الهيدروجين الأخضر يبلغ 5 جيجاواط لعام 2030، والذي تمت زيادته بمقدار 5 جيجاواط إضافية بواسطة الائتلاف الحكومي الجديد في ألمانيا. ونظرًا لأن هذا الإنتاج سيكون بعيدًا عن أن يكون كافيًا لتلبية الطلب، فسيتعين استيراد الكثير من الهيدروجين. لذلك يدعو مجلس الهيدروجين الألماني أيضًا إلى زيادة قدرة التحليل الكهربائي بشكل ملحوظ، والتي سيتم تأمينها من خلال توسيع الطاقات المتجددة الإضافية.

ومن أجل ضمان تنفيذ الإستراتيجية، يجب تعديل أو إعادة صياغة العديد من القوانين، واللوائح، والبرامج، والمعايير الحالية. وعلى وجه

الخصوص، هناك حاجة كبيرة لتطوير نظام موحد أو أوروبي منسق من إثباتات المنشأ المعتمدة والموحدة للهيدروجين المحايد مناخيًا.

جوانب العلاقة

حتى الآن، لا توجد تحديات معروفة لإنتاج الهيدروجين في ألمانيا فيما يتعلق بتوافر ناقلات H من صناعة المياه والصرف الصحي، على الرغم أن هذا قد يشير إلى وجود فجوة بحثية. وكان استخدام المياه في الشركات محور الاحتجاجات المحلية الأخيرة (على سبيل المثال لونبيرج وجرونهايده) وقد يُنذر بمعارضة اقتصاد التحليل الكهربائي المستقبلي الذي يحتاج في النهاية إلى المياه. وسيكون للطقس القاسي تأثير على توافر المياه في ألمانيا، وسيؤدي إلى تفاقم الظروف موسميًا. ويمكن أن يؤدي استخدام الموارد من صناعة الصرف الصحي إلى حل هذا الصراع جزئيًا. وفي سياق فترات الجفاف المتزايدة، ومحدودية توافر المياه العذبة، يمكن أن يساعد استخدام موارد المياه العادمة في استقرار إنتاج الهيدروجين خلال الفترات الحارة. ومع ذلك، نظرًا لأن ألمانيا ستستورد الهيدروجين بشكل أساسي، فمن المرجح أن تحدث النزاعات في الخارج. ويقع الهيدروجين الإلكتروليتي حاليًا في دائرة التركيز السياسي والعامة؛ مما يعني أن العمليات الأخرى التي يمكنها أيضًا تمكين إنتاج الهيدروجين اللامركزي تحظى باهتمام أقل.

ورقة الحقائق 6:
الاشتراطات الإطارية في قطاع المياه والصرف الصحي

الوضع الحالي

منذ أحداث الجفاف في صيف 2018-2020، والفيضانات القاتلة في صيف 2021، أصبح مورد "المياه" في ألمانيا محط اهتمام الجمهور والدوائر السياسية بشكل متزايد. وقد اعتاد السكان الألمان على توفير المياه في جميع الأوقات، وبأي كمية، وبأفضل جودة. وفي المتوسط، استهلك كل شخص في ألمانيا حوالي 123 لترًا من مياه الشرب يوميًا في عام 2016. ومع ذلك، بسبب تغير المناخ، تتعرض الموارد المائية لضغوط متزايدة. كما يتسبب الصيف الجاف في انخفاض مستويات المياه الجوفية، وانخفاض رطوبة التربة، ويجب أن تتكيف خزانات المياه وأنظمة الصرف الصحي مع الظروف المتغيرة. بالإضافة إلى ذلك، أصبحت النترات مشكلة للمياه الجوفية، خاصة في المناطق ذات الزراعة المكثفة. ومع ذلك، لا تزال مياه الشرب متوفرة بجودة عالية، ويتم فحص جودة المياه بشكل متكرر – غالبًا بشكل يومي. كما أنها أرخص بكثير من المياه المعبأة في زجاجات: حيث يكلف لتر من مياه الشرب من الصنبور أقل من يورو واحد.

وتعتبر إمدادات المياه، والتخلص من مياه الصرف الصحي من المهام الأساسية للخدمات العامة ذات الاهتمام العام في ألمانيا، وتقع على عاتق البلديات. وتتخذ هيئاتهم الشرعية ديمقراطيًا قرارات إستراتيجية بشأن الأشكال التنظيمية، والمشاركة، والتعاون.

يُعد التوجيه الإطاري الأوروبي للمياه بمثابة الإطار التنظيمي المركزي لحماية، وإدارة، واستخدام المسطحات المائية في أوروبا، ويضع أهدافًا بعيدة المدى للحالة البيولوجية، والبيئية، والفيزيائية، والكيميائية، والكمية للمياه الجوفية، والمياه السطحية، والمياه الساحلية. وقد تم تنفيذ توجيه الاتحاد الأوروبي هذا في القانون الألماني. ومع ذلك، على الرغم أن تلوث المسطحات المائية مع مدخلات المواد البشرية المنشأ في ألمانيا قد انخفض في العقود الأخيرة، إلا أن المياه السطحية على وجه الخصوص لا تفي بالمعايير؛ بسبب وجود مواد في كل مكان؛ مثل الزئبق، أو الإيثرات الثنائية الفينيل المبرومة، وكذلك الأسمدة، ومبيدات الآفات. وبالإضافة إلى التوجيه الإطاري الأوروبي للمياه، هناك مجموعة واسعة ومعقدة في كثير من الأحيان من القواعد الخاصة بالمواد. وتشمل هذه - على سبيل المثال - متطلبات التسجيل، والترخيص للمواد

الكيميائية، ومبيدات الآفات، والمستحضرات الصيدلانية، والانبعاثات من تصريف مياه الصرف الصحي، ومعايير جودة المسطحات المائية. ومن أجل الحماية، والاستخدام المستدام للمياه كمورد؛ توجد حاليًا مسودة للإستراتيجية الوطنية للمياه تم تنسيقها داخل الحكومة الاتحادية.

التوقعات

من المتوقع أن يصبح التغير الديموغرافي، وتغير المناخ من التحديات الرئيسية لإدارة المياه الألمانية في العقود القادمة. وبشكل عام، الموارد المائية كافية، لكن الصناعة تتوقع فترات أطول من الجفاف (مما يؤدي إلى تفاقم الصراع بين الري ومياه الشرب)، وتواتر هطول الأمطار الغزيرة المحلية بسبب تغير المناخ. ومن المتوقع أيضًا أن يكون للتغيير الديموغرافي تأثيرات إقليمية: ففي بعض المناطق، سينخفض الطلب على المياه وإنتاج مياه الصرف الصحي، بينما سيزداد الطلب، لا سيما في المناطق الحضرية.

وفي إطار الصفقة الخضراء الأوروبية، نشرت المفوضية الأوروبية "خطة عمل لمكافحة تلوث الهواء، والمياه، والتربة" في عام 2021. وتدمج خطة العمل جميع سياسات الاتحاد الأوروبي ذات الصلة في مجال مكافحة التلوث والوقاية منه، مع التركيز بشكل خاص على استخدام الحلول الرقمية. ومن المتوقع أيضًا مراجعة تشريعات الاتحاد الأوروبي ذات الصلة؛ لتحديد الثغرات التي لا تزال موجودة فيها، وأين يلزم تنفيذ أفضل للوفاء بهذه الالتزامات القانونية.

وهناك قضية أخرى قادمة لقطاع المياه تتعلق بصيانة وتجديد البنية التحتية الحالية. وتُعد الصيانة المستمرة للبنية التحتية والأنظمة المرتبطة بها إحدى مهام مرافق المياه. وبهذه الطريقة، فإنها تضمن تشغيل وأداء الأنظمة. وفي السنوات القادمة، سيكون من الضروري إجراء استثمارات كبيرة في التجديد والتوسع الأساسيين للبنية التحتية والمرافق؛ من أجل تأمينها على المدى الطويل، وتكييفها مع المتطلبات الجديدة، والحفاظ على القيمة الجوهرية للبلديات.

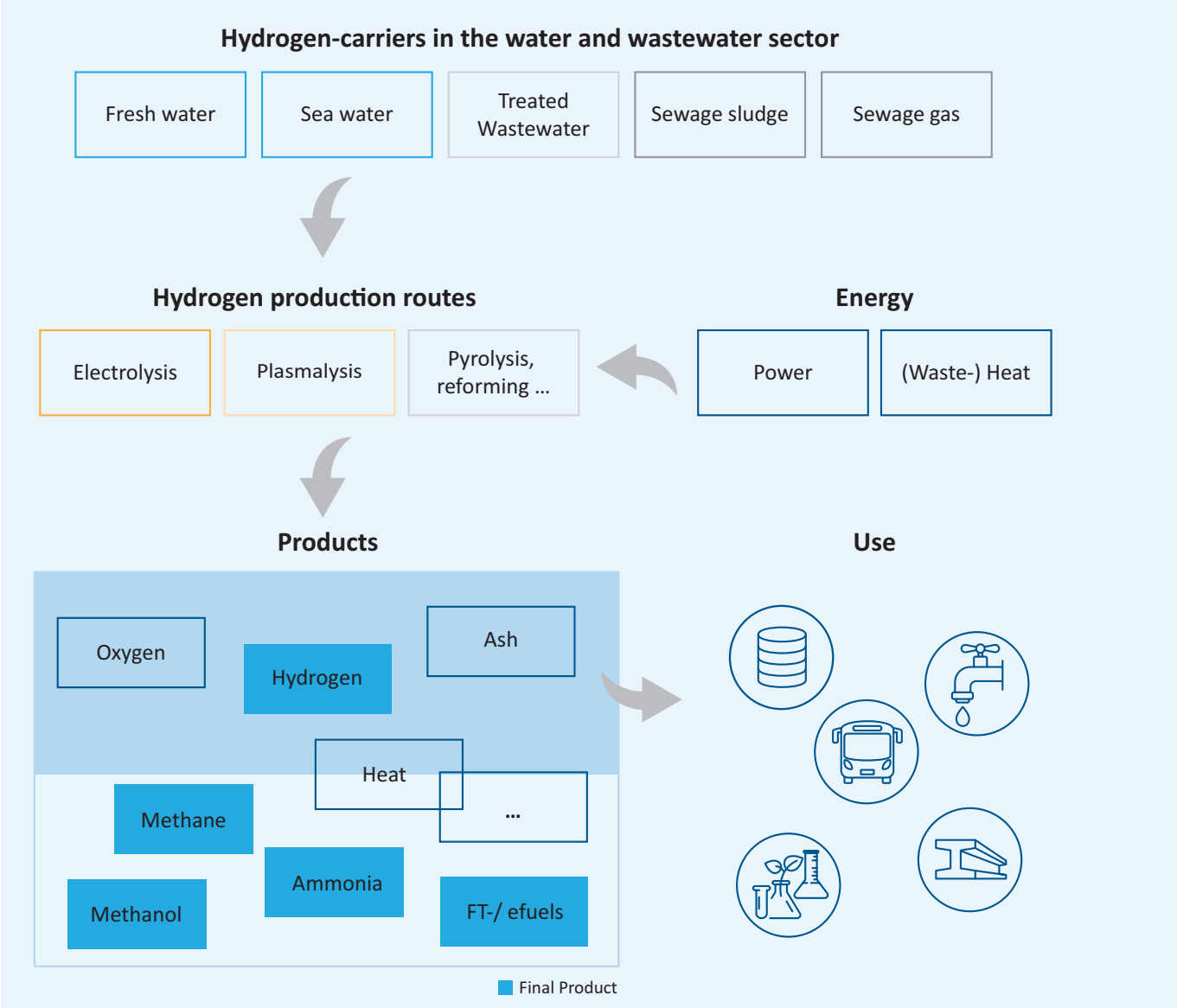
جوانب العلاقة

انخفض استهلاك المياه في ألمانيا بشكل كبير خلال السنوات القليلة الماضية. وإذا كان من الممكن استمرار هذا الاتجاه، فهناك احتمال لاقتصاد هيدروجين قائم على التحليل الكهربائي لا يؤدي إلى خلاف مع مستخدمي المياه الآخرين. وفي الإستراتيجية الوطنية للمياه، تمت مناقشة "مصادر الطاقة المبتكرة مثل الهيدروجين"، والتي يجب ألا يؤثر إنتاجها على استخدامات المياه الأخرى. ويجري حاليًا مناقشة مسألة ما إذا كان ينبغي إدخال مرحلة التنظيف الرابعة كشرط قانوني لمحطات معالجة مياه الصرف الصحي. ونظرًا لأن عملية أوزنة مياه الصرف هي أحد الاحتمالات، ويمكن إنتاج الأوزون عبر الأكسجين الإلكتروليتي، يمكن أن يصبح هذا التنظيم محركًا لاقتصاد الهيدروجين اللامركزي في محطات معالجة مياه الصرف الصحي، بشرط أن يتم استخدام الهيدروجين بشكل مناسب. ونظرًا لواردات الهيدروجين المستقبلية إلى ألمانيا، يجب تحليل الإطار القانوني للمياه والصرف الصحي في البلدان الشريكة.

3.4 العلاقة بين المياه والهيدروجين

تتميز العلاقة بين المياه والهيدروجين المفهومة هنا بحقيقة أن التركيز ينصب على قطاع المياه والصرف الصحي فيما يتعلق بإنتاج الهيدروجين. ويوضح هذا الأمر ناقلات H المختلفة من القطاع. وتتطلب شركات النقل المختلفة هذه عمليات مختلفة لإنتاج المنتج المستهدف (الهيدروجين)، والذي يمكن أخيرًا توفيره للتطبيقات الخاصة بالسياق (مثل حركة البضائع الثقيلة والنقل العام). كما تتطلب العمليات أيضًا شكلًا من أشكال الطاقة (مثل الكهرباء).

بالإضافة إلى المنتج المستهدف، هناك أيضًا منتجات ثانوية أخرى (مثل الأكسجين، والحرارة المهدرة) التي يمكن استخدامها بشكل مثالي (على سبيل المثال في عملية الأوزنة). ومن خلال إعادة التدوير الكاملة لجميع المنتجات، يمكن تقليل التكاليف، ويمكن تحقيق فوائد إضافية. ويعطي الشكل أدناه نظرة عامة على العلاقة بين المياه والهيدروجين.



صورة 4
العلاقة بين المياه والهيدروجين كأساس مفاهيمي في المشروع
(عرض خاص)

2 تتطلب عمليات الهيدروجين القائمة على الغاز الطبيعي - مثل الإصلاح البخاري - المياه أيضًا. ومع ذلك، نظرًا لأن الغاز الطبيعي مادة خام غير متجددة، فقد تم الاستغناء عن التضمين التخطيطي والمفاهيمي، أيضًا من أجل تركيز الانتباه خلال ورش العمل على الأشكال المستدامة طويلة الأجل لإنتاج الهيدروجين.

4 | آفاق اقتصاد الهيدروجين الأردني

لغرض تحديد الفرص والتحديات لاقتصاد الهيدروجين اللامركزي في الأردن، تم تطوير أوراق الحقائق بناءً على مواد الأبحاث ومحتويات ورش العمل.

4.1 فرص وتحديات الهيدروجين في الأردن

ورقة الحقائق 7:
اشتراطات الاستثمار في الأردن

الوضع الحالي

بناءً على رؤية غرفة الصناعة والتجارة الألمانية العربية (AHK, 2020)، فإن الأردن وجهة استثمارية جيدة؛ حيث يسعى الملك عبد الله الثاني إلى انفتاح الاقتصاد الأردني، وخلق بيئة مناسبة للمستثمرين الأجانب. وتسمح العديد من الاتفاقيات التجارية مع الاتحاد الأوروبي بالفعل للأردن بالوصول السلس إلى السوق الأوروبية. ووفقًا لمؤشر ممارسة أنشطة الأعمال، يحتل الأردن المرتبة 75 من بين 190 دولة من حيث مناخ الاستثمار. وللمقارنة: ألمانيا في المرتبة 22 (Weltbank, 2021). وبحسب التصنيف، فإن أداء الأردن أسوأ في مجالات بدء الأعمال التجارية وتصاريح البناء، في حين أن الظروف أفضل في مجالات الضرائب، والكهرباء، وتوافر الائتمان.

وفي إطار سياستها الدولية للطاقة، تدعم ألمانيا الأردن في تطوير قطاع الطاقة المتجددة. وفي هذا السياق، تم إطلاق "حوار الطاقة"، وتنفيذ "مبادرة تصدير الطاقة للوزارة الاتحادية للشؤون الاقتصادية والطاقة"، وضمانات ائتمانات التصدير؛ مثل "المبادرة الخاصة للطاقة المتجددة". بالإضافة إلى ذلك، يدعم بنك الائتمان لإعادة الإعمار (KfW) مشاريع الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، وأشهرها مشروع الطاقة الكهروضوئية في مخيم الزعتري للاجئين. وتلتزم فرنسا واليابان أيضًا بمشاريع أردنية في مجال الطاقات المتجددة: لقد أطلقت الوكالة الفرنسية للتنمية (AFD) مبادرة SUNREF (الاستخدام المستدام للموارد الطبيعية وتمويل الطاقة)، والتي تهدف إلى دعم المشاريع الأصغر في مجال الطاقة المتجددة في المنازل والشركات، بينما يقدم بنك اليابان للتعاون الدولي (JBIC) قروضًا للمشاريع الكبيرة؛ مثل مشروع شمس معان (المرجع نفسه). كما أطلق الاتحاد الأوروبي عدة برامج، ويعمل على تعزيز تنمية الطاقات المتجددة في الأردن على أساس "اتفاقية الشراكة بين الاتحاد الأوروبي، والمملكة الأردنية الهاشمية". وقد تم توفير ما مجموعه 410.10 مليون يورو للتنمية الاجتماعية والاقتصادية في الأردن بين عامي 2017 و2020؛ حيث شكلت الطاقات المتجددة إحدى الركائز الأساسية في هذه الصناديق. ويمول البنك الأوروبي لإعادة الإعمار والتنمية (EBRD) ما يصل إلى 35 ٪ من إجمالي تكاليف المشروع لمحطات الطاقة المتجددة، وقد خصص حتى الآن 1.5 مليار يورو لـ 50 مشروعًا. وعلى سبيل المثال، شارك البنك الأوروبي لإعادة الإعمار والتنمية في تمويل مزرعة الرياح الكبيرة في الرجيف، ومشروع شوبال لطاقة الرياح. كما توفر المنظمات الدولية الأخرى رأس المال لمشاريع كفاءة الطاقة والطاقة المتجددة في الأردن. فعلى سبيل المثال، شارك الصندوق الرئيسي العالمي لكفاءة الطاقة ومصادر الطاقة المتجددة (GEEREF)، أو صندوق الأوبك للتنمية الدولية (OFID) في بعض مشاريع الطاقة الشمسية، وطاقة الرياح. وأشهر مشروع مدعوم من صندوق الأوبك للتنمية الدولية هو مشروع طاقة الرياح في الطفيلة بقدرة 117 ميجاواط (AHK, 2020).

وفقًا لـ IRENA (IRENA, o. J.)، كان هناك العديد من التدفقات الدولية لتمويل الطاقات المتجددة إلى الأردن في العقود الأخيرة. وتشمل تدفقات التمويل أنواعًا مختلفة من التمويل؛ مثل استثمارات رأس المال، والسندات الخضراء، وصناديق الاستثمار والمنح والقروض من المؤسسات الدولية والمقرضين لتقنيات الطاقة المتجددة.

التوقعات

يتمتع الأردن بقطاع مصرفي مستقر وقوي؛ مما يسهل من ناحية الوصول إلى رأس المال، ومن ناحية أخرى يُحسن مناخ الاستثمار. وتجذب مناقصات الطاقة المتجددة التي تنشرها وزارة الطاقة والموارد الطبيعية بانتظام الشركات الخاصة للقيام بمشاريع (AHK, 2020). وعندما يتعلق الأمر بالهيدروجين الأخضر وسلسلة قيمته، لا يزال أمام الأردن طريق طويل لنقطعه. فهناك حاجة إلى آليات تمويل عامة وخاصة ملموسة لتمويل المشاريع. ويجب بناء المعرفة والخبرة بشأن الهيدروجين الأخضر بين المؤسسات المالية والمصرفية؛ لتسهيل الوصول إلى رأس المال. وفي هذا الصدد، يجب أن تكون الخبرة في جمع التمويل للطاقة المتجددة من البنوك المحلية، والمؤسسات المالية الدولية، ومناخ الاستثمار المستقر مفيدة، خاصة في بداية تطوير الهيدروجين الأخضر (Wuppertal Institut et al., 2022).

يمكن وصف مستوى تعليم الشباب بشكل عام بأنه جيد - وهو شرط أساسي مهم لإجراء الاستثمارات، والحفاظ عليها في المصانع كثيفة رأس المال. ومع ذلك، يجب إنشاء قدرات محددة لإنتاج ومعالجة الهيدروجين. ولهذا الغرض، تخطط الجامعة الألمانية الأردنية، وجامعة العلوم التطبيقية فورتسبورج - شفاينفورت لنقل منهج لتكنولوجيا الهيدروجين. ويخدم هذا التعاون أيضًا غرض تدريب المتخصصين ذوي الصلة خارج الحدود الأردنية (Al-Halhouli, 2022; Al-Salaymeh, 2022).

جوانب العلاقة

نظرًا للمناخ الاستثماري الجيد نسبيًا، والتزام مختلف الدول المانحة، وبعض الخبرة في مجال المشاريع الصديقة للمناخ؛ فإن الأردن يفي بشروط مهمة لتنفيذ مشاريع الهيدروجين كثيفة رأس المال. ومع ذلك، يجب معالجة التحديات المذكورة، ويجب النظر في جوانب العلاقة معًا. وتعتبر المياه كمورد عاملًا مهمًا من عناصر المدخلات لتشغيل المحطة على المدى الطويل، وخاصة في التحليل الكهربائي.

ورقة الحقائق 8:
العرض والطلب على الطاقة في الأردن

الوضع الحالي

على عكس البلدان الأخرى في المنطقة، لا يمتلك الأردن موارد نفطية وغازية وفيرة، باستثناء رواسب الصخر الزيتي، والتي تم تطويرها مؤخرًا فقط. لذلك، يستورد الأردن حوالي 90٪ من طاقته لتلبية الطلب الوطني المتزايد (IRENA, 2021). وفي عام 2018، تم إنفاق مبلغ كبير قدره 10٪ من الميزانية العامة على تأمين إمدادات الطاقة من خلال الواردات (Abu-Rumman et al., 2020). وعلى هذه الخلفية، وفي مواجهة انقطاع إمدادات النفط العراقي في عام 2003، وأزمة الغاز الطبيعي المصرية في عام 2011، والتدفق الهائل للاجئين، وما تبعه من زيادة في الطلب على الطاقة، ركز الأردن على تطوير الطاقة المتجددة كمصدر محلي للطاقة. وبالتالي، فإن انتقال الطاقة نحو الطاقة المتجددة مدفوع في المقام الأول بالحاجة إلى ضمان أمن الطاقة، وتقليل الاعتماد على الواردات. وقد قطع الأردن خطوات كبيرة في استخدام الطاقة المتجددة خلال العقد الماضي. وبلغت حصة الطاقات المتجددة في توليد الكهرباء 20٪ في عام 2020، ويمكن أن تزداد أكثر في المستقبل.

يتميز الأردن بتزايد الطلب على الطاقة بشكل مستمر نتيجة التطور الصناعي، والتوسع العمراني، والتغير الديموغرافي. ففي عام 2019، بلغ إجمالي استهلاك الطاقة النهائي في الأردن 6465 كيلو طن؛ حيث يستحوذ قطاع التنقل على الحصة الأكبر من الاستهلاك، يليه القطاع السكني، والصناعة، وقطاع الخدمات التجارية والعامة (IEA, 2022a). وتهيمن محطات توليد الكهرباء التي تعمل بالغاز الطبيعي على توليد الطاقة في الأردن. وتمتلك الأردن محطة للغاز الطبيعي المسال (LNG) في العقبة، والتي دخلت حيز التشغيل في عام 2015، ومن المقرر أن يتم توسيعها لتنويع موارد الغاز الطبيعي. ومنذ عام 2020، يستورد الأردن أيضًا الغاز الطبيعي من إسرائيل. وأحصت شركة الكهرباء الوطنية (NEPCO) القدرة الإجمالية المركبة البالغة 5424 ميجاواط في عام 2020. كما تبلغ سعة الطاقة المتجددة المثبتة والمتصلة بالشبكة 2280.5 ميجاواط، منها أكثر من 35٪ موصلة عبر نظام القياس الصافي ونظام النقل الكهربائي الوسيط. وبحلول عام 2030، من المتوقع أن تصل قدرة الطاقة المتجددة المركبة إلى 3300 ميجاواط.

وتتوقع الإستراتيجية الوطنية الشاملة لقطاع الطاقة للفترة 2020-2030 أنه بحلول عام 2030، سيأتي 31٪ من إجمالي توليد الكهرباء، و 14٪ من إجمالي مزيج الطاقة من مصادر الطاقة المتجددة (IRENA, 2021).

وكما هو الحال في معظم بلدان الشرق الأوسط وشمال أفريقيا (MENA)، يتميز قطاع الطاقة بمستوى عالٍ من المشاركة الحكومية والتنظيم. وعلى عكس البلدان الأخرى، بدأ الأردن في فك ارتباط قطاع الكهرباء منذ عام 1996. ففي عام 2002، حرر الأردن توليد الطاقة الخاص به، وسمح بالاستثمار الخاص من خلال منتجي الطاقة المستقلين (IPPs). ومع ذلك، تواصل شركة الكهرباء الوطنية NEPCO العمل كمشترٍ وحيد للكهرباء، وتواصل امتلاك وتشغيل نظام النقل. وتُعد شركة الكهرباء الوطنية NEPCO مسؤولة أيضًا عن التفاوض بشأن اتفاقيات شراء الطاقة مع منتجي الطاقة المستقلين IPPs. وعلى مستوى التوزيع، فإن شركات التوزيع الثلاث المسؤولة هي شركة الكهرباء الأردنية (JEPCO)، وشركة توزيع الكهرباء (EDCO)، وشركة كهرباء منطقة إربد (IDECO) (Franceschini, 2019).

تم طرح عدد من المبادرات والسياسات لتشجيع استخدام الطاقة المتجددة. فعلى سبيل المثال، يتم ضمان أولوية الوصول والتغذية للطاقة المتجددة، ويساعد إنشاء مركز اتصال شامل في هيئة تنظيم الطاقة والمعادن (EMRC) على تشجيع استثمار القطاع الخاص في الطاقة المتجددة؛ من خلال تبسيط العديد من الإجراءات (RCREEE, 2013). وبالإضافة إلى الحوافز المالية المستهدفة من الحكومة، على سبيل المثال، التعريفات الجمركية، والإعفاءات الضريبية والرسوم، ودعم استخدام الطاقة المتجددة (IRENA, 2018). وبشكل عام، يعتبر الإطار السياسي والتنظيمي للطاقة المتجددة في الأردن من أكثر الأطر تقدمًا في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا. ويتم تنفيذ مشاريع الطاقة المتجددة عادةً بثلاث طرق: حيث يمكن للمستثمرين المستقلين تقديم عطاءات لمشاريع في إطار النموذج بناء-تملك-تشغيل (BOO)، وتوقيع اتفاقيات شراء الطاقة طويلة الأجل (PPAs) مع شركة الكهرباء الوطنية NEPCO، المشاريع المملوكة للحكومة المقدمة في شكل عقود الهندسة والمشتريات والبناء (EPC)،

أو مشاريع الاستهلاك الذاتي (نظام النقل الكهربائي الوسيط، ونظام القياس الصافي). وتقع محطات الطاقة الكهروضوئية الكبيرة بشكل رئيسي في منطقة معان الجنوبية، وتبلغ طاقتها ما بين 10 و 50 ميجاواط. كما توجد العديد من مزارع الرياح؛ مثل محطة الطفيلة لطاقة الرياح بقدرة 117 ميجاواط (Abu-Rumman et al., 2020). لكن حتى الآن، سيطرت مشاريع نظام النقل الكهربائي الوسيط الصغير، ونظام القياس الصافي؛ مما ساهم بشكل كبير في حصة الطاقات المتجددة في مزيج الكهرباء. ومع ذلك، فإن القيود الفنية لشبكة الكهرباء تشكل عنق الزجاجة أمام التوسع الإضافي في الطاقات المتجددة في الأردن. ولمنع عدم استقرار الشبكة، حددت وزارة الطاقة والموارد الطبيعية (MEMR) سقفًا لمشاريع الطاقة المتجددة المتصلة بالشبكة فوق 1 ميجاواط لعام 2019، في انتظار تحليلات استقرار الشبكة (Franceschini, 2019; IRENA, 2021).

التوقعات

بالإضافة إلى التحديات العامة في قطاع الطاقة؛ مثل الاعتماد الكبير على الوقود الأحفوري المستورد، والتكاليف المرتبطة به، وكذلك تأمين إمدادات الطاقة مع زيادة الطلب، يُعد تكامل النظام واستقرار الشبكة من بين أهم التحديات لمزيد من التوسع في الطاقات المتجددة في الأردن (Aldohni, 2022). بالإضافة إلى ذلك، يوجد في الأردن حاليًا فائض في توليد الكهرباء؛ مما يثير المزيد من الأسئلة المتعلقة بالتخزين، وتوسيع الشبكة، والربط البيني، والتي أصبحت ملحة بشكل متزايد للإجابة عليها.

ولمواجهة هذه التحديات في ضوء الحصة المتزايدة للطاقة الشمسية وطاقة الرياح المتقطعة، تمت مناقشة تطوير خيارات التخزين والبحوث حول ربط القطاع، وخيارات المرونة الأخرى. فعلى سبيل المثال، تم التخطيط لمشروع بطاريات أيونات الليثيوم واسع النطاق بسعة تخزين طاقة تبلغ 12 ميجاواط ساعة، والذي سيتم ربطه بمزرعة كهروضوئية تبلغ 23 ميجاواط؛ من أجل التمكن من استخدام التخزين الكهربائي بمرونة. وهناك تقنية تخزين أخرى من المقرر أن تلعب دورًا مهمًا؛ وهي تخزين ضخ الطاقة الكهرومائية (PHES). وفي هذا السياق، يتم إجراء العديد من دراسات الجدوى لتقييم جدوى مشاريع الطاقة الكهرومائية PHES، مع أكبر إمكانات منسوبة إلى شركة "المجيب" بقدرة 200 ميجاواط (IRENA, 2021). كما يتم الترويج للتنقل الكهربائي في الأردن؛ حيث تُعد الدولة واحدة من الشركات الرائدة في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا من حيث الاستخدام (Shalalfeh et al., 2021).

والخيارات الأخرى التي ينبغي دراستها هي تدابير إدارة الأحمال، أي إدارة جانب الطلب، وكذلك استخدام أوجه التآزر من خلال الرقمنة، والتخزين، والتنقل.

جوانب العلاقة

تعمل ألمانيا بشكل وثيق مع الأردن في قضايا الطاقة، وأسست شراكة الطاقة الألمانية الأردنية في عام 2020، والتي توفر منصة لتبادل مكثف حول الموضوعات المتعلقة بالطاقة. ويشكل الوضع السياسي المستقر، والإمكانيات الممتازة للطاقات المتجددة نقطة انطلاق جيدة لإنتاج الهيدروجين في الأردن. وفي هذا السياق، يجب النظر في الدور الذي يجب أن يلعبه الهيدروجين لنظام الطاقة الأردني؛ لأنه يعتمد أيضًا على ما إذا كانت المحولات الكهربائية متصلة بالشبكة أو حلول قائمة بذاتها.

ورقة الحقائق 9:
موارد المياه في الأردن

الوضع الحالي

يعتبر الأردن من أكثر البلدان جفافًا في العالم، وتعتبر إمدادات المياه في البلاد معرضة للخطر بشكل كبير. وتُعد المياه الجوفية أهم مصدر لإمدادات المياه في الأردن. ويأتي ما يقرب من ثلثي المياه من طبقات المياه الجوفية التي يتم ضخها بعيدًا بمعدلات غير مستدامة (Whitman, 2019). وحوالي 51٪ من استخدامات المياه للزراعة، و 45٪ للمنازل، و 4٪ للصناعة. كما يبلغ استخدام الفرد السنوي للمياه 100 م^3 للفرد، مقارنة بالمتوسط العالمي البالغ 5700 م^3 (International Trade Administration, 2022; Ritchie & Roser, 2017). وينخفض نصيب الفرد من موارد المياه المتجددة المتاحة بشكل مطرد بسبب النمو السكاني وتدفق اللاجئين. وتؤدي السرقة والتسربات في شبكات المياه البلدية إلى تفاقم الوضع المائي (Whitman, 2019)، ويمثل ما يُسمى بالمياه غير المدرة للدخل 50٪ من إنتاج المياه. وتمثل تكاليف الكهرباء 57٪ من تكاليف تشغيل قطاع المياه. وبالإضافة إلى ذلك، من المرجح أن تؤدي تأثيرات تغير المناخ إلى زيادة مخاطر ندرة المياه؛ حيث تتغير أنماط هطول الأمطار، وارتفاع درجات الحرارة يؤدي إلى تسريع عملية التبخر. ونظرًا لأن الطلب على المياه يتجاوز بالفعل العرض من طبقات المياه الجوفية، والمياه السطحية، والبحيرات؛ فإن الأردن يبذل جهودًا لتنويع مصادر إمدادات المياه، على سبيل المثال عن طريق التحلية.

تدعم الحكومة الأردنية نهج التشغيل القائم على الأداء لمحطات معالجة مياه الصرف الصحي، والتي يتم تشغيلها بشكل أساسي من قبل القطاع الخاص بموجب عقد البناء-التشغيل-النقل (BOT). وقد ساهم التحديث الأخير لـ 33 محطة معالجة مياه الصرف الصحي القائمة في تشغيل وإدارة أكثر سلاسة، وتخفيف حالة المياه المتوترة. ونتيجة لذلك، زادت كمية المياه المعالجة المستخدمة في الزراعة والصناعة من 110 إلى أكثر من 144 مليون م^3 سنويًا (Wuppertal Institut et al., 2022). وأتاح هذا التحديث أيضًا زيادة كبيرة في كمية المياه التي يمكن استخدامها لاستخدام المياه البلدية (المرجع نفسه).

التوقعات

على خلفية الوضع المائي المتوتر بالفعل في الأردن، ستكون المياه واحدة من أكبر التحديات لإنشاء سلسلة قيمة الهيدروجين الأخضر في البلاد. ومع عدم توفر موارد المياه الجوفية أو السطحية، يجب أن يكون إنتاج الهيدروجين الأخضر مصحوبًا بالتنفيذ الواسع النطاق لمحطات تحلية مياه البحر. وعند تطوير محطات تحلية المياه لإنتاج الهيدروجين الأخضر، يجب مراعاة توافر الأراضي، واستخدام الأراضي على طول ساحل البحر الأحمر. ففي حين يمكن اعتبار الأردن حالة واعدة لإنتاج الهيدروجين الأخضر؛ حيث إن له تاريخًا طويلًا من الشراكات بين القطاعين العام والخاص (PPP)، فإن القبول المجتمعي لاستخدام المياه لإنتاج الهيدروجين قد يمثل تحديًا؛ نظرًا لندرة المياه في الأردن (Wuppertal Institut et al., 2022). وإذا قام مشغل محطة التحلية المخطط لها بتسويق 50 مليون م^3 تحت تصرفه المجاني سنويًا لمنتجي الهيدروجين، فمن الممكن إنتاج الهيدروجين على نطاق واسع من خلال التحليل الكهربائي.

جوانب العلاقة

على خلفية الوضع المائي المتوتر بالفعل في الأردن، ستكون المياه واحدة من أكبر التحديات لإنشاء سلسلة قيمة الهيدروجين الأخضر في البلاد. ومع عدم توفر موارد المياه الجوفية أو السطحية، يجب أن يكون إنتاج الهيدروجين الأخضر مصحوبًا بالتنفيذ الواسع النطاق لمحطات تحلية مياه البحر. وعند تطوير محطات تحلية المياه لإنتاج الهيدروجين الأخضر، يجب مراعاة توافر الأراضي، واستخدام الأراضي على طول ساحل البحر الأحمر. ففي حين يمكن اعتبار الأردن حالة واعدة لإنتاج الهيدروجين الأخضر؛ حيث إن له تاريخًا طويلًا من الشراكات بين القطاعين العام والخاص (PPP)، فإن القبول المجتمعي لاستخدام المياه لإنتاج الهيدروجين قد يمثل تحديًا؛ نظرًا لندرة المياه في الأردن (Wuppertal Institut et al., 2022). وإذا قام مشغل محطة التحلية المخطط لها بتسويق 50 مليون م^3 تحت تصرفه المجاني سنويًا لمنتجي الهيدروجين، فمن الممكن إنتاج الهيدروجين على نطاق واسع من خلال التحليل الكهربائي.

ورقة الحقائق 10:
آفاق إنتاج الهيدروجين الأردني

الوضع الحالي

حتى الآن، لا يُعد الهيدروجين الأخضر جزءًا من إستراتيجية الطاقة الأردنية 2020-2030. ومع ذلك، وفقًا لوزارة الطاقة والموارد الطبيعية الأردنية، تعمل الدولة حاليًا على خارطة طريق وطنية للهيدروجين الأخضر ومشتقاته (The Jordan Times, 2021). وبالتعاون مع شراكة الطاقة الألمانية الأردنية والشركاء الهولنديين، يتم حاليًا إجراء العديد من الدراسات والمشاورات لدعم صياغة، ووضع خارطة طريق الهيدروجين الأخضر الوطني (Marar 2022). كما سيتم التصديق على مسودة خارطة الطريق، المقرر الانتهاء منها في عام 2022، من قبل الهيئات الحكومية والتشريعية والعامة في الأردن.

تم توقيع مذكرة التفاهم الأولى مع التركيز على الهيدروجين الأخضر من قبل الحكومة الأردنية، والشركة الأسترالية Fortescue خلال مؤتمر المناخ COP26 في غلاسكو (Atchison, 2021). وكجزء من مذكرة التفاهم هذه، وافق الشركاء على إجراء دراسات جدوى لمشروع محلل كهربائي 5 جيجاواط في جنوب البلاد، ليتم تشغيله بواسطة طاقة الرياح والطاقة الشمسية خارج الشبكة. واعتمادًا على نتائج الدراسات، يجب التفاوض على اتفاقية استثمار لإنتاج الهيدروجين الأخضر و/أو الأمونيا الخضراء في الأردن، وتصديرها إلى أستراليا. وستغطي الدراسات الأولية مساحة 450 كم² لإنتاج الطاقة الشمسية المحتملة، في حين سيتم حجز 1000 كم² لإنتاج طاقة الرياح المحتملة، وسيتم تخصيص 1.5 كم² داخل منطقة صناعية لمرافق الإنتاج النهائية المحتملة (Ivanova, 2021).

التوقعات

يمتلك الأردن القدرة على أن يصبح لاعبًا إقليميًا ودوليًا رئيسيًا في مجال الهيدروجين. حيث تمتلك البلاد موارد ضخمة من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، وتتقن البنية التحتية للغاز والأمونيا؛ مثل أنابيب الغاز، وتخزين الأمونيا، والبنى التحتية للطاقة في ميناء العقبة البحري. وهذه بمثابة نقطة انطلاق جيدة لبناء صناعة للهيدروجين الأخضر والوقود الاصطناعي (Wuppertal Institut et al., 2022). وفيما يتعلق بالتنمية الصناعية، تمتلك الأردن صناعة كيميائية قائمة على البوتاسيوم والفوسفات توفر موطئ قدم اقتصادي قوي للتصدير. ويمكن للأردن الاستفادة من هياكل الصناعة الكيميائية الحالية لبناء سلسلة قيمة شاملة للهيدروجين الأخضر. بالإضافة إلى ذلك، يتمتع الأردن بخبرة في تخزين الغاز الطبيعي في كهوف الملح بالقرب من عمان والعقبة، والتي يمكن استخدامها أيضًا لتخزين الهيدروجين الأخضر.

كما يدعم البنك الدولي حاليًا دراسة حول التنقل الإلكتروني في الأردن (Marar 2022). ويجب مناقشة إمكانيات استخدام الهيدروجين في حركة (البضائع الثقيلة) (في المستقبل).

جوانب العلاقة

سيكون التحدي الرئيسي أمام تطوير إنتاج الهيدروجين الأخضر في الأردن هو توفير الموارد المائية؛ حيث من المحتمل أن يؤدي ذلك إلى المنافسة مع قطاعات أخرى مثل الزراعة، أو الصناعة، أو الإسكان. وبالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تصبح المنافسة على استخدام الأراضي بين التوسع العمراني والسياحة والأنشطة الصناعية مشكلة، لا سيما على الشريط الساحلي الضيق حول العقبة. وبشكل عام، يتطلب الانتقال إلى اقتصاد الهيدروجين تعزيز وتوسيع البنية التحتية الوطنية وتطوير آليات وسياسات الدعم المختلفة. ولا يقل أهمية عن مشاركة القطاع الخاص القوية في الاستثمار الأجنبي والمحلي المباشر. لذلك، سيكون التعاون مع الشركاء الدوليين في مشاريع الهيدروجين الأخضر ضروريًا لتعزيز اقتصاد الهيدروجين في الأردن (Wuppertal Institut et al., 2022).

بالإضافة إلى التصدير المحتمل للهيدروجين الأخضر أو مشتقاته، يحتاج الأردن أيضًا إلى تقييم المكان الذي قد يتطور فيه الطلب المحلي في المستقبل. ولهذا الغرض، يجب دراسة التطبيقات المحتملة للهيدروجين الأخضر ومشتقاته، خاصة في القطاعات التي لا يمكن أو يمكن فقط بصعوبة تحويلها إلى النمط الكهربائي، على سبيل المثال بعض التطبيقات الصناعية أو النقل الجوي والبحري.

ومن أجل بناء صناعة هيدروجين خضراء في الأردن، يجب إنشاء منصات الابتكار والبحث والتطوير (F&E)، والتي تجمع بين الجهات الفاعلة في القطاع الخاص، ومراكز البحث والتطوير القائمة، والجامعات، والهيئات العامة والمؤسسات الوطنية والدولية. وتوفر الديناميكيات الإقليمية فيما يتعلق بالهيدروجين الأخضر في الشرق الأوسط أيضًا إمكانات كبيرة يمكن للأردن استغلالها (Wuppertal Institut et al., 2022)

تمثل مجموعة العمل علاقة - المياه - الطاقة نقطة انطلاق مهمة لمزيد من المناقشة حول قضايا الطاقة المتعلقة بالمياه في الأردن . وتمثل مجموعة العمل هذه نوعًا من آلية التنسيق لتحديد الموضوعات والمشاريع المهمة لكلا القطاعين. ويمكن معالجة الهيدروجين هنا.

المربع النصي 1

آلية تنسيق علاقة - المياه - الطاقة في الأردن

بدعم من الوكالة الألمانية للتعاون الدولي (GIZ)، بدأ حوار علاقة - المياه - الطاقة في عام 2019. وقد تم تشكيل مجموعة توجيهية من هذا. ومن بين أمور أخرى، يتم تمثيل ما يلي:

- **وزارة الطاقة والموارد الطبيعية.**
- **وزارة المياه والري.**
- **وزارة التخطيط والتعاون الدولي، وكذلك**
- **وزارة المالية.**

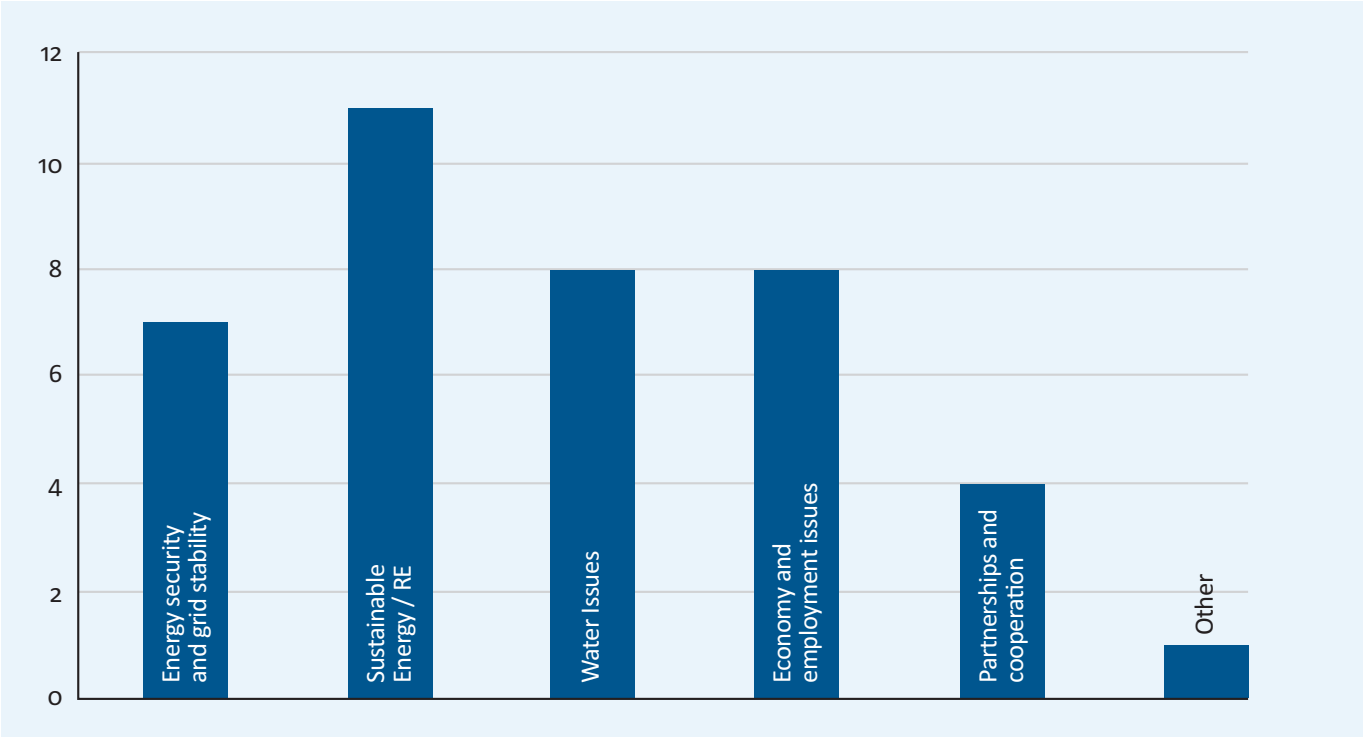
وبالإضافة إلى الوزارات، فإن المؤسسات الأخرى مثل شركة الكهرباء الوطنية (NEPCO) تُعد جزءًا من المجموعة التوجيهية، والتي تتيح تنسيقًا أفضل للمشاريع ذات الصلة بقطاع المياه والطاقة. ويتم اختيار المشاريع المناسبة كجزء من التحليلات التفصيلية من قبل مجموعات العمل الفرعية، ومشاركة أطراف ثالثة. إن تطوير مرفق تخزين بالضخ هو جزء من محفظة مشروع آلية التنسيق. وفي هذا السياق، يمكن أيضًا مناقشة الهيدروجين على المدى المتوسط (Qaider & Sadeh, 2022).

4.2 مساهمات في اقتصاد الهيدروجين للأردن

في إطار ورشة العمل في عمان، تم طرح الأسئلة التالية على المشاركين في جلسات تفاعلية:

1) ما هي الآثار الإيجابية والتأثيرات السلبية التي يجب مراعاتها في اقتصاد الهيدروجين؟

يمكن تنظيم تقييم الملاحظات المسجلة في خمس أو ست فئات. ويمكن الاطلاع على نظرة عامة على الفئات مع عدد الإشارات في الشكل التالي.



صورة 5
تقييم جلسة الورشة التفاعلية الأولى

إن مواضيع "أمن الطاقة واستقرار الشبكة"، وكذلك "الطاقة المستدامة/الطاقات المتجددة" لها تداخل كبير، ويمكن تلخيصها أيضًا في فئة شاملة وهي "الطاقة".

ففي فئة "أمن الطاقة واستقرار الشبكة"، تمت الإشارة إلى الدور الإيجابي للمحللات الكهربائية في استقرار الشبكات الكهربائية في الأردن، وفي نفس الوقت يمكن تخزين الكهرباء (الزائدة) في شكل غازي. وبالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يعمل الهيدروجين كمحرك لتوسيع الطاقات المتجددة، والتي يمكن أن تساهم في نهاية المطاف في أمن الطاقة (بمعنى الاستقلال عن واردات الطاقة). ومن غير الواضح كيف يمكن أن يبدو الاستخدام المحلي للهيدروجين في الأردن.

وتشمل فئة "الطاقة المستدامة/الطاقات المتجددة" معظم الأفكار. وقد تم إيلاء اهتمام خاص لتوسيع الطاقات المتجددة، والتي يمكن أن يكون الهيدروجين محركًا لها. ويجب أن يساهم الهيدروجين المنتج في نهاية المطاف في تقليل ثاني أكسيد الكربون CO_2، على الرغم من أن السؤال هو ما إذا كان ينبغي تقديم هذه المساهمة في الأردن أو في الخارج. فمن الناحية النظرية، يمكن أن ينفتح مجال للتوترات؛ حيث يوجد في الأردن بعض فروع الصناعة التي تتطلب، على سبيل المثال، استيراد الأمونيا. فلماذا يتم نقل الأمونيا الخضراء (باهظة الثمن) إلى أوروبا بينما يمكن (على الأقل جزئيًا) استخدامها في الأردن، ويمكن أن تساهم في إزالة الكربون في صناعة الأسمدة في الموقع؟ ونظرًا للبدائل التقليدية (القائمة على الغاز الطبيعي) وتكاليفها، أثيرت مسألة الاستعداد لدفع ثمن المنتجات الخضراء

في مكان آخر، وهو موضوع يجب النظر إليه بشكل مختلف فيما يتعلق بمختلف مستخدمي الأمونيا في مناطق مختلفة من العالم ومشتريها.

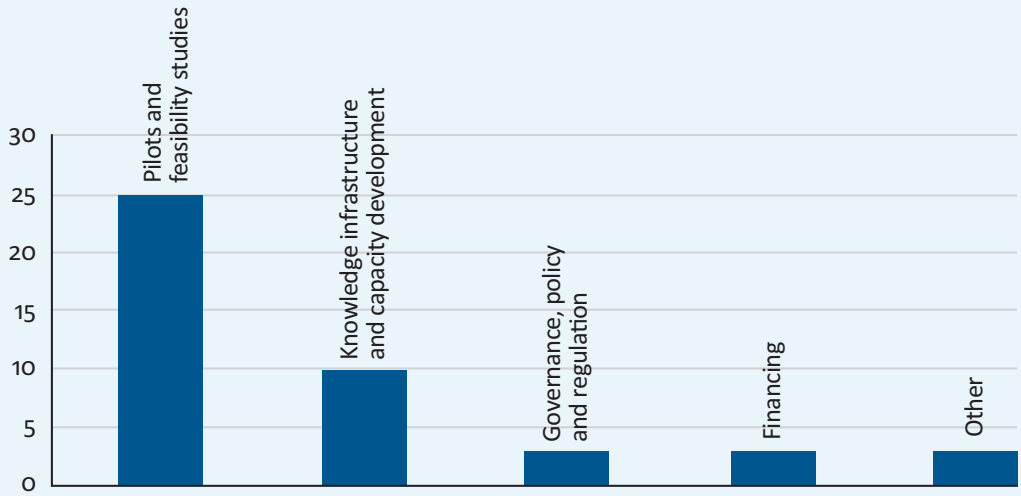
وهناك فئة أخرى مهمة تتمثل في موضوع "الماء". وقد كان من المهم بشكل خاص للمشاركين ألا يؤدي اقتصاد الهيدروجين إلى زيادة النزاعات حول توزيع المياه كمورد. وتوجد نقاط أخرى هي تجنب الآثار البيئية السلبية فيما يتعلق بالنظام البيئي البحري من خلال محطات تحلية مياه البحر، والتي لا يجوز استخدامها حصريًا لإنتاج الهيدروجين، إدارة المياه في دورة (والتي يمكن لخلايا الوقود (FC) أن تجعلها ممكنة) وفرصة زيادة الوعي العام بالمياه كمورد من خلال اقتصاد الهيدروجين. ويجب أن يكون رفع الوعي جزءًا من إستراتيجية المياه. وقد تم التعليق حاليًا على استخدام مياه الصرف الصحي الناشئة غير المعالجة للتحليل الكهربائي على أنه "القليل من البحث"، بينما يتم استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة في الأردن على نطاق واسع في الزراعة. في هذا الصدد، سيكون إنتاج الهيدروجين من مياه الصرف المعالجة متضاربًا أيضًا - إذا ظل حجم مياه الصرف الصحي المعالجة ثابتًا.

يشكل موضوع "الاقتصاد والعمالة" فئة مهمة أخرى. فلا ينبغي لاقتصاد الهيدروجين في الأردن أن يؤدي إلى تفاقم الفقر في البلاد، ولكن - على العكس من ذلك - يؤدي إلى النمو الاقتصادي، وإدخال صناعات جديدة، وخلق فرص عمل طويلة الأجل حتى في المناطق الواقعة على أطراف البلاد. ويثير هذا السؤال حول كيفية مقارنة اقتصاد الهيدروجين الموجه للتصدير ببديل يستخدم الهيدروجين محليًا أيضًا. وقد تم ذكر نقل التكنولوجيا كشرط مهم لدوافع السياسة الاقتصادية المذكورة.

يمكن أيضًا تصنيف هذا النوع من التعاون في الفئة التالية "الشراكات والتعاون". وقد تم استخدام الكلمة الرئيسية "الوضع المربح للجانبين" بشكل متكرر في ورشة العمل نفسها. ولهذه الغاية، يجب تعزيز التبادل بين البلدان الشريكة، وتطوير المهارات المحلية.

2) اذكر ثلاث خطوات ملموسة أو أفكار مشاريع مهمة لتحقيق اقتصاد الهيدروجين في الأردن.

يمكن تقسيم الإجابات إلى أربع أو خمس فئات. ويمكن الاطلاع على نظرة عامة على الفئات مع عدد الإشارات في الشكل التالي.



صورة 6
تقييم جلسة الورشة التفاعلية الثانية

ربما أيضًا بسبب الخبرة الفنية بين المشاركين، تم اعتبار "المشاريع التجريبية ودراسات الجدوى (الفنية)" على وجه الخصوص بمثابة خطوة بالغة الأهمية لاقتصاد الهيدروجين في الأردن. وفي بعض الحالات، تم ذكر أفكار محددة للغاية، والتي اختلفت أيضًا بشكل كبير في مستوى طموحها. الأفكار الصغيرة هي:

- بناء نظام طاقة كهروضوئية عائمة بالاشتراك مع محلل كهربائي، ربما يستمر مع عمليات تخليق الأمونيا، أو الميثانول، أو FT (انظر المربع النصي 2)،
- استخدام جميع منتجات التحليل الكهربائي؛ مثل الهيدروجين، والأكسجين، والحرارة المهدرة،
- تجريب عمليات أخرى مثل BEST (BioEnergy STorage) التي طورتها جامعة HTW Saar (انظر المربع النصي 3)،
- التركيز على التطبيقات الصناعية في الأردن،
- تنفيذ مشروع إدارة مياه مرتبط بجوانب اقتصاد الهيدروجين

المربع النصي 2

نظام طاقة كهروضوئية عائمة بالاشتراك مع محلل كهربائي كمشروع تجريبي

يُعتبر الأردن من أكثر دول العالم جفافًا من حيث موارد المياه وهطول الأمطار. ففي المتوسط، يسقط حوالي 1000 لتر من الأمطار سنويًا. وفي ألمانيا يبلغ المتوسط حوالي 11 ضعفًا[1]. ونظرًا لتكرار الأيام المشمسة (حوالي 310 سنويًا)، فإن معدل التبخر في الأردن مرتفع جدًا. وتوجد بالفعل مقاربات مختلفة لتحسين التوازن المائي في الأردن. وتشمل هذه إعادة هيكلة وإصلاح شبكات المياه القديمة، وحملات التوعية والتثقيف للسكان، وزيادة إعادة استخدام المياه.

إن أحد الأساليب التي تدرسها جامعة العلوم والتكنولوجيا الأردنية (Jordanian University of Science and Technology, JUST) هو التخفيف من معدلات التبخر باستخدام أنظمة الطاقة الكهروضوئية العائمة (Floating Photovoltaic, FPV). وتُعد FPV بمثابة تقنية راسخة. وقد تم بالفعل تنفيذ مشروعات بقدرة مركبة في نطاق من رقمين ميجاواط في آسيا. وفي ألمانيا، تجري دراسة تركيب تقنية FPV على بحيرات تعدين الليجنيت. وتُقدر الإمكانات المجدية اقتصاديًا في ألمانيا حاليًا بما لا يقل عن 2.74 جيجاواط. وفي مشروع نفذته جامعة العلوم والتكنولوجيا الأردنية JUST، تم فحص استخدام تقنية FPV فيما يتعلق بكفاءة الأنظمة الكهروضوئية، وجودة المياه، ومعدل التبخر. وقد أظهر ذلك زيادة كفاءة الأنظمة الكهروضوئية، وتحسين جودة المياه، وتقليل معدل التبخر. كما زادت كفاءة الأنظمة الكهروضوئية بحوالي 8٪ مقارنة بالأنظمة القائمة بذاتها؛ بسبب التبريد بواسطة المياه. وفيما يتعلق بنوعية المياه، يمكن تحديد انخفاض إنتاج الطحالب، والذي تم اشتقاقه، من بين أمور أخرى، من انخفاض قيمة الرقم الهيدروجيني، وزيادة محتوى الكربون. وبالنسبة للتبخر، يمكن قياس انخفاض يصل إلى 54٪ مقارنة بسطح المياه غير المظلل، اعتمادًا على درجة تظليل سطح المياه. ويمكن استخدام المياه التي يتم توفيرها عن طريق تقليل التبخر في إنتاج الهيدروجين، على سبيل المثال.

ونظرًا لأنه يمكن تثبيت تقنيات FPV على أي مسطح مائي، فإنها تمثل خيارًا فعالًا لإنتاج الطاقة المستدامة في نفس الوقت، وتحسين جودة المياه، والحفاظ عليها.

3 https://www.laenderdaten.info

المربع النصي 3

الغاز الطبيعي الاصطناعي باستخدام عملية تخزين الطاقة الحيوية BEST في جامعة HTW Saar

خلال عملية تخزين الطاقة الحيوية "Bio-Energy Storage" الخاصة بالتكنولوجيا الحيوية، تستخدم الكائنات الحية الدقيقة الهيدروجين والطاقة الكهربائية لتحويل ثاني أكسيد الكربون CO_2 الضار للمناخ إلى غاز ميثان اصطناعي من نوعية الغاز الطبيعي، والذي يحل محل الغاز الطبيعي الأحفوري بنسبة 1 :1. كما تتواجد البكتيريا في محلول مائي داخل مفاعل حيوي بسيط. وتكون درجة الحرارة (30-40 درجة مئوية) والضغط منخفضين؛ لذلك تعتبر تكلفة تخزين الطاقة الحيوية BEST منخفضة مقارنة بعمليات التخليق البديلة ذات الموثوقية التشغيلية العالية. ونظرًا لعدم وجود أجزاء متحركة في المفاعلات، فإن تشغيل وصيانة المصنع لا يمثل مشكلة كبيرة.

وقد تم بالفعل تنفيذ أنظمة تجريبية في محطة معالجة مياه الصرف الصحي الصناعية، وفي مرافق بلدية ترير. وعلى الرغم من التقلبات القوية في الحمل على الأنظمة، يمكن تحويل الغاز الحيوي المحتوي على ثاني أكسيد الكربون CO_2 المنتج هناك إلى غاز الميثان بجودة الغاز الطبيعي دون المعالجة المسبقة أو اللاحقة. وفي المنظور القريب، يمكن توليد الهيدروجين المطلوب من التحليل الكهربائي. وفيما يتعلق بعلاقة - المياه - الهيدروجين، فإن الميزة الخاصة لعملية تخزين الطاقة الحيوية BEST هي أن المياه تتشكل كمنتج ثانوي.

عملية تخزين الطاقة الحيوية BEST: $4\ H_2 + CO_2 <=> CH_4 + 2\ H_2O$

يمكن توريد هذه المياه بدورها إلى التحليل الكهربائي بعد المعالجة.

التحليل الكهربائي للمياه: $2\ H_2O \rightarrow 2\ H_2 + O_2$

تتيح عملية تخزين الطاقة الحيوية BEST بالاشتراك مع التحليل الكهربي للمياه تقليل كمية المياه المطلوبة لإنتاج الهيدروجين.

يمكن حقن الميثان الاصطناعي مباشرة في خطوط أنابيب الغاز الطبيعي دون قيود. وعن طريق استبدال الغاز الطبيعي الأحفوري، لا يصل ثاني أكسيد الكربون CO_2 الإضافي إلى الغلاف الجوي. وبالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يساهم الميثان (الاصطناعي) المنتج محليًا في أمن الطاقة. ويتم تسييله لتشكيل الغاز الطبيعي المسال، ويمكن أيضًا نقله إلى أوروبا (أسهل من الهيدروجين).

تم تطوير هذه العملية من قبل جامعة سارلاند للعلوم التطبيقية (HTW). وقد قدم أ.د. ماتياس برونر من جامعة HTW Saar عملية تخزين الطاقة الحيوية BEST في الأردن في إطار المشروع.

إن هناك اتفاقًا على أن هذه المشاريع التجريبية يجب أن تدرب رأس المال البشري فيما يتعلق باقتصاد الهيدروجين المحتمل في الأردن. وعلى الرغم من الإشارة إلى اليوم السابق على المساهمة في استقرار شبكة الطاقة، يبدو من المعقول أن يقوم المشاركون في البداية بتطوير مشاريع توضيحية كحلول منفصلة. وتم بالفعل نشر أول دراسة عن الهيدروجين الأخضر في الأردن من قبل RSS نيابة عن مؤسسة فريدريش إيبرت، ويتم إعداد دراسة أخرى نيابة عن الوكالة الألمانية للتعاون الدولي (GIZ). الأفكار الأخرى لدراسات الجدوى من المشاركين هي:

- إنتاج الهيدروجين في محطة معالجة مياه الصرف الصحي،
- تأثيرات محطة تحلية مياه البحر لإنتاج الهيدروجين فقط.

إن بناء "البنى التحتية المعرفية والقدرات" له بعض التداخلات مع الفئة السابقة. وتعتبر المنصات، والمؤسسات، وورش العمل، والدورات التدريبية مهمة في هذا الصدد. وقد تمت مناقشة التبادل بين ألمانيا والأردن بشكل متكرر خلال ورشة العمل، على الرغم من أن التعاون مع دول الشرق

الأوسط الأخرى يمكن أن يكون مفيدًا أيضًا؛ لأسباب ليس أقلها أن هذه المجموعة من البلدان تواجه تحديات مماثلة. وتم ذكر كل من الجامعات والشبكة المكونة من المشروع الحالي كأصحاب مصلحة مهمين.

بالنسبة لبعض المشاركين، كان موضوع "الحوكمة، والأدوات السياسية، والتنظيم" في المقدمة أيضًا. وقد تمت الإشارة إلى أهمية جدول الأعمال السياسي والإستراتيجية، والتي يمكن أن يكون لها تأثير بارز على هيئات التمويل. وفي هذا السياق، تمت الإشارة أيضًا إلى أهمية إجراء دراسة (غير فنية) حول الإطار السياسي في الأردن.

وفي فئة "التمويل"، تمت الإشارة إلى أهمية التمويل.

4.3 توقعات بشأن معايير استيراد الهيدروجين

نظرًا لأنه تم تناول موضوع "الوضع المربح للجانبين" في نقاط مختلفة في ورش العمل، فيجب متابعة ذلك. وبالنسبة للأردن، يبدو اقتصاد الهيدروجين مفيدًا إذا كان الهيدروجين:

- يساهم في أمن الطاقة الذي يتميز
  - باستقرار شبكة الطاقة، أو
  - تكامل التوسع المتزايد والمتسارع في الطاقات المتجددة،
- يساهم في إزالة الكربون،
- لا يؤدي إلى تفاقم النزاعات القائمة أو الجديدة على المياه، ولكنه يقلل بشكل مثالي منها،
- لا تمثل المتطلبات التقنية الأخرى (الكهروضوئية، محطات التحلية) أي آثار بيئية سلبية،
- يرافقه حملة لرفع مستوى الوعي بين السكان حول موارد المياه،
- يمثل تأثيرًا اجتماعيًا واقتصاديًا ايجابيًا (النمو الاقتصادي، التوظيف، الابتكار)، من الناحية المثالية أيضًا في المناطق اللامركزية من البلاد، وكذلك
- يخلق القدرات في الموقع،
- يتم دعمه في الأردن بموارد من الشركاء.

5 | ملخص وتوقعات

على وجه الخصوص، تُظهر وجه النظر المتعلقة بالوضع في ألمانيا أن العلاقات بين قطاع المياه، والصرف الصحي، وإنتاج الهيدروجين، واستخدامه متنوعة. وإلى جانب قطاع الطاقة، سيشكل قطاع المياه الدعامة الأساسية الأخرى لمنتجي الهيدروجين. ولكن يمكن أن تكون المياه العادمة أيضًا موردًا، خاصةً إذا كان سيتم استخدام نهج لامركزي لإنتاج الهيدروجين.

ويمكن حاليًا تطبيق نماذج الأعمال المحتملة في مجال الهيدروجين إلى حد معين، ويعتمد هذا على عوامل مختلفة. وبالإضافة إلى تكاليف التشغيل (خاصة بالنسبة لمدخلات الموارد مثل الكهرباء)، فإن هذا يشمل أيضًا التمويل وفرص استخدام الهيدروجين بشكل معقول. علاوة على ذلك، يجب العثور على أفكار لرفع قيمة تلك المنتجات الثانوية التي تنشأ من العمليات المختلفة.

يمكن استخدام الهيدروجين في قطاعات مختلفة، على الرغم من ضرورة إجراء بعض المواءمات أولًا. ويوفر قطاع المياه والصرف الصحي نفسه مجالًا للتطبيق، على سبيل المثال نزع النتروجين من مياه الشرب. ويمكن أيضًا استخدام مشتق الميثانول لنزع النتروجين من مياه الصرف، أو

تجديد الكربون المنشط. ومن حيث المبدأ، يمكن أيضًا دمج المنتجات الثانوية مثل الحرارة (الحرارة المهدرة)، أو الأكسجين النقي للتنظيف البيولوجي، أو الأوزنة في محطات معالجة مياه الصرف الصحي.

إن التحليل الكهربائي له أهمية خاصة في المناقشة حول الهيدروجين الأخضر. ففي حين أن الكهرباء المتجددة هي المورد المقيد لذلك في ألمانيا، فإن ندرة المياه تمثل تحديًا آخر في بلدان مثل الأردن.

ولا يمكن استخدام المياه العذبة في الأردن لإنتاج الهيدروجين الأخضر، والذي وفقًا للتعريف الحالي لا يمكن إنتاجه إلا عن طريق التحليل الكهربائي؛ لأن هذا سيزيد من التوترات (الاجتماعية) الحالية. ويتم تعليق آمال كبيرة على محطة تحلية البحر الأحمر لاستخدام جزء من المياه المحلاة للتحليل الكهربائي. وتُستخدم مياه الصرف الصحي المعالجة للأغراض الزراعية في الأردن. وقد تمثل حمأة مياه الصرف الصحي، أو غاز الصرف الصحي خيارات لإنتاج الهيدروجين.

ونظرًا لأنه لا يمكن تشغيل تحلية مياه البحر قبل عام 2028، فإن السؤال الذي يطرح نفسه هو كيف يمكن للأردن أن يمهد الطريق لاقتصاد هيدروجين وطني؛ من خلال تطوير الاشتراطات الإطارية المناسبة، وبناء القدرات والهياكل.

وبما أن المشاركين الأردنيين والألمان قد اعتبروا أن الحوار مثمر، فيجب تكثيفه واستمراره؛ حيث يجب الاستمرار في أخذ التحديات المحددة بعين الاعتبار. كما سيكون الحوار بين مجموعة أصحاب المصلحة - كما كان مقصودًا من قبل المشروع - ذا أهمية خاصة في المستقبل من أجل التمكن من الحصول على نظرة عامة على الوضع المعقد في الموضوعات المعقدة تقنيًا مثل الهيدروجين. ومن الإشارات المهمة من السياسيين المحليين تضمين إنتاج الهيدروجين في الإستراتيجيات السياسية التي يتم تطويرها عبر القطاعات. ويمكن للدراسات الأولية حول التدابير التجريبية الواعدة التي تتصدى للتحديات المحددة لاقتصاد الهيدروجين في الدولة أن ترسل بدورها دوافع مهمة إلى السياسة.

بالإضافة إلى مناقشة متعمقة لاستخدام الهيدروجين، يجب أن تتضمن هذه الدراسات الأولية أيضًا مناقشة حول المياه كمورد. فالأسئلة المهمة هي: ما مدى ارتفاع الطلب على المياه؟ من أين تأتي المياه؟ هل توجد خيارات (فنية) لتدوير المياه؟ هل يمكن اتخاذ تدابير (فنية، أو إدارية) للاستفادة من المياه "الإضافية" (*غير المدرة للدخل*)، أو لاستخدام بدائل للمياه العذبة؟

إن حقيقة أن المبادرات التعليمية؛ مثل التعاون بين الجامعة الألمانية الأردنية وجامعة فورتسبورج-شفاينفورت للعلوم التطبيقية قد تم إطلاقها بالفعل من أجل تدريب المعرفة ذات الصلة في الدولة يمكن اعتبارها خطوة مهمة نحو ضمان تشغيل المصنع في المستقبل، والإمكانات الاجتماعية والاقتصادية للارتقاء في البلاد. ومع ذلك، يجب الانتباه إلى النظام البيئي بأكمله؛ بما في ذلك ضغط الهيدروجين، وتخزينه، ونقله، واستخدامه.

وأخيرًا، يجب دائمًا مناقشة الموضوع من وجهة نظر القبول الاجتماعي. ومن الناحية المثالية، فإن إنشاء اقتصاد الهيدروجين هو إجماع اجتماعي. ومع ذلك، نظرًا لأن المياه مورد ضروري للبقاء، ويمكن لاقتصاد الهيدروجين أن يتنافس مع متطلبات المياه الحالية، يجب استخدام الدراسات الأولية والمشاريع التجريبية لفحص الاحتمالات المتاحة لزيادة القبول بين السكان عن كثب.

6 | الفهارس والمراجع

6.1 المراجع

Abu-Rumman, G., Khdair, A. I., & Khdair, S. I. (2020). Current status and future investment potential in renewable energy in Jordan: An overview. Heliyon, 6(2). **https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03346**

Agora Energiewende, & Wuppertal Institut. (2019). Klimaneutrale Industrie—Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement (S. 236).

AHK. (2020). Jordanien. **https://www.german-energy-solutions.de/GES/Redaktion/DE/Publikationen/Marktanalysen/2020/zma-jordanien-2020-industrieeffizienz.pdf?__blob=publicationFile&v=2**

Aldohni, A. N. (2022). Electricity Sector in Jordan.

Al-Halhouli, A. (2022). Green Hydrogen in MENA Region and Jordan context.

Al-Salaymeh, A. (2022). The role of education in a future hydrogen economy in Jordan.

Atchison, J. (2021). Fortescue Future Industries powers ahead on green ammonia – Ammonia Energy Association. **https://www.ammoniaenergy.org/articles/fortescue-future-industries-powers-ahead-on-green-ammonia/**

Ausfelder, F., & Dura, H. (2019). OPTIONEN FÜR EIN NACHHALTIGES ENERGIESYSTEM MIT POWER-TO-XTECHNOLOGIEN. **https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/2019_DEC_P2X_Kopernikus_RZ_Webversion02-p-20005425.pdf**

Beswick, R. R., Oliveira, A. M., & Yan, Y. (2021). Does the Green Hydrogen Economy Have a Water Problem? ACS Energy Letters, 6(9), 3167–3169. **https://doi.org/10.1021/acsenergylett.1c01375**

Bundesregierung. (2020). Nationale Wasserstoffstrategie.

DIHK. (2020). Wasserstoff—DIHK Faktenpapier. **https://www.dihk.de/resource/blob/24872/fd2c89df9484cf912199041a9587a3d6/dihk-faktenpapier-wasserstoff-data.pdf**

Energy Sector Management Assistance Program. (2020). Green Hydrogen in Developing Countries. World Bank, Washington, DC. **https://doi.org/10.1596/34398**

Europäisches Patentamt. (2006). Methanol_denitrifikation.pdf.

Franceschini, B. (2019). Scaling-Up-Renewable-Energy-Development-in-Jordan.pdf. **https://www.res4med.org/wp-content/uploads/2019/03/Scaling-Up-Renewable-Energy-Development-in-Jordan.pdf**

FVEE. (2021). Biomasse und Bioenergie als Teil der Wasserstoffwirtschaft. **https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/media/6_Publikationen/Stellungnahmen/Stellungnahme_FNBioE_H2-BM_final.pdf**

Gerlach, D. (2022). Hydrogen in the region.

Hydrogen Council. (2021). Hydrogen decarbonization pathways—A life-cycle assessment. **https://lbst.de/wp-content/uploads/2021/04/Hydrogen-Council-Report_Decarbonization-Pathways_Part-1-Lifecycle-Assessment.pdf**

IEA. (2022a). Data and statistics. IEA. **https://www.iea.org/data-and-statistics**

IEA. (2022b). Electrolysers – Analysis. IEA. **https://www.iea.org/reports/electrolysers**

International Trade Administration. (2022). Jordan—Environment and Water Sector. **https://www.trade.gov/country-commercial-guides/jordan-environment-and-water-sector**

IRENA. (2018). Evaluating renewable energy manufacturing potential in the Arab region: Jordan, Lebanon, United Arab Emirates. **https://www.irena.org/publications/2018/Oct/Evaluating-renewable-energy-manufacturing-potential-in-the-Arab-region**

IRENA. (2021). Renewables Readiness Assessment: The Hashemite Kingdom of Jordan. **https://www.irena.org/publications/2021/Feb/Renewables-Readiness-Assessment-The-Hashemite-Kingdom-of-Jordan**

IRENA. (o. J.). Renewable Energy Finance Flows. **https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Finance-and-Investment/Renewable-Energy-Finance-Flows**

Ivanova, A. (2021). Fortescue to explore green hydrogen production in Jordan. Renewablesnow.Com. **https://renewablesnow.com/news/fortescue-to-explore-green-hydrogen-production-in-jordan-760299/**

Jentsch, M. F., & Büttner, S. (2019). Dezentrale Umsetzung der Energie- und Verkehrswende mit Wasserstoffsystemen auf Kläranlagen. 12.

Kantz, C. (2022). Power-to-X-technologies and framework conditions.

Klein, D. (2022). Wasserstoffgewinnung auf Kläranlagen.

Marar, Y. (2022). Energy sector in Jordan- Jor-Ger H2 Dialogue- Yacoub Marar- Oct2022.pdf.

Nationaler Wasserstoffrat. (2021). Wasserstoff Aktionsplan Deutschland 2021–2025 (S. 56). **https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/NWR_Aktionsplan_Wasserstoff_2021-2025_WEB-Bf.pdf**

Niederste-Hollenberg, J., Winkler, J., Fritz, M., Zheng, L., Hillenbrand, T., Kolisch, G., Schirmer, G., Borger, J., Doderer, H., & Dörrfuß, I. (o. J.). Klimaschutz- und Energieeffizienzpotenziale in der Abwasserwirtschaft – aktueller Stand und Perspektiven. 195.

Oeko-Institut. (2019). Die Bedeutung strombasierter Stoffe für den Klimaschutz in Deutschland. **https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/PtX-Hintergrundpapier.pdf**

Opitz, K. (2022). Plasmalysis.

Qaider, L., & Sadeh, H. (2022). The Inter-sectoral Water-Energy Nexus working group—Jordan. Presentation at the German-Jordanian Water-Hydrogen-Dialogue in Amman, Jordan, Amman.

RCREEE. (2013). Summary: The National Energy Efficiency Action Plan of Jordan (NEEAP). **https://rcreee.org/publications/summary-national-energy-efficiency-action-plan-jordan-neeap/**

Ritchie, H., & Roser, M. (2017). Water Use and Stress. Our World in Data. https://ourworldindata.org/water-use-stress

Roscoe, A. (2022, April 1). Developers weigh up Jordan's Aqaba-Amman water project. Energy & Utilities. **https://energy-utilities.com/developers-weigh-up-jordan-s-aqabaamman-water-news116979.html**

Shalalfeh, L., AlShalalfeh, A., Alkaradsheh, K., Alhamarneh, M., & Bashaireh, A. (2021). Electric Vehicles in Jordan: Challenges and Limitations. Sustainability, 13(6), Art. 6. **https://doi.org/10.3390/su13063199**

Stock, R. (2022). LOCAL PUBLIC UTILITIES AND THE ROLE OF HYDROGEN.

Tetra Tech International Development. (2022). AAWDC Project: Summary of Brine Discharge Risk Assessment (S. 38 f).

The Jordan Times. (2021). Jordan's Energy Ministry launches strategy to produce green hydrogen. **https://www.zawya.com/en/projects/jordans-energy-ministry-launches-strategy-to-produce-green-hydrogen-hxowdats**

Tholen, L., Leipprand, A., Kiyar, D., Maier, S., Küper, M., Adisorn, T., & Fischer, A. (2021). The Green Hydrogen Puzzle: Towards a German Policy Framework for Industry. Sustainability, 13(22), 12626. **https://doi.org/10.3390/su132212626**

Weltbank. (2021). Ease of doing business rank (1=most business-friendly regulations) | Data. **https://data.worldbank.org/indicator/IC.BUS.EASE.XQ**

Whitman, E. (2019). Climate change, waves of refugees and poor planning are draining water supplies in Jordan. 4.

Wuppertal Institut, & Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung Econ. (2020). Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung. **https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/projects/LEE-H2-Studie.pdf**

Wuppertal Institut, DLR, & IZES. (2022). Synthesebericht Länderkurzstudien Jordanien, Marokko und Oman. Teilbericht 11 (D8.1) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (unveröffentlicht).

Zelt, O., Scholz, A., & Viebahn, P. (2021). Auswahl der zu bewertenden synthetischen Kraftstoffe und ihrer Bereitstellungstechnologien (S. 22). **https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/projects/MENA-Fuels_Teilbericht1_D1-1_Technologieauswahl.pdf**

6.2 فهرس الصور

صورة 1
نقاط البدء المختلفة في ألمانيا والأردن كخلفية للمشروع (عرض خاص)، صفحة 6

صورة 2
نهج تخطيطي للعمل في المشروع (عرض خاص)، صفحة 7

صورة 3
المؤسسات المشاركة في ورش عمل المشروع في فوبرتال (ألمانيا)، وعمان (الأردن) (عرض خاص)، صفحة 8

صورة 4
العلاقة بين المياه والهيدروجين كأساس مفاهيمي في المشروع (عرض خاص)، صفحة 18

صورة 5
تقييم جلسة الورشة التفاعلية الأولى، صفحة 26

صورة 6
تقييم جلسة الورشة التفاعلية الثانية، صفحة 27

6.3 فهرس الاختصارات، والوحدات، والرموز

الاختصارات	
AEL	التحليل الكهربائي القلوي
AFD	الوكالة الفرنسية للتنمية (Agence Française de Développement)
AHK	غرفة التجارة الخارجية
BHKW	محطة توليد الطاقة الحرارية
BMUV	الوزارة الاتحادية للبيئة، وحماية الطبيعة، والسلامة النووية، وحماية المستهلك
BOO	بناء-تملك-تشغيل
BOT	بناء-تشغيل-نقل
COP	مؤتمر الأطراف
dena	وكالة الطاقة الألمانية
EBRD	البنك الأوروبي لإعادة الإعمار والتنمية
EDCO	شركة توزيع الكهرباء
EMRC	لجنة تنظيم الطاقة والمعادن
EPC	الهندسة، والمشتريات، والإنشاء
F&E	البحث والتطوير
FPV	الطاقة الكهروضوئية العائمة
GEEREF	الصندوق الرئيسي العالمي لكفاءة الطاقة ومصادر الطاقة المتجددة
GIZ	جمعية التعاون الدولي
GJWHD	الحوار الألماني الأردني للمياه والهيدروجين
HTEL	التحليل الكهربائي لدرجات الحرارة العالية
IDECO	شركة كهرباء محافظة إربد
IEA	وكالة الطاقة الدولية
IPP	منتج طاقة مستقل
IRENA	المنظمة الدولية للطاقة المتجددة
JBIC	بنك اليابان للتعاون الدولي
JEPCO	شركة الكهرباء الأردنية
JUST	جامعة العلوم والتكنولوجيا الأردنية
KfW	بنك الائتمان لإعادة الإعمار
LNG	الغاز الطبيعي المسال
MEMR	وزارة الطاقة والموارد الطبيعية
MENA	الشرق الأوسط وشمال أفريقيا
MWIDE	وزارة الاقتصاد، والصناعة، وحماية المناخ، والطاقة في ولاية شمال الراين - وستفاليا
NEPCO	شركة الكهرباء الوطنية
OFID	صندوق الأوبك للتنمية الدولية
OPEC	منظمة الدول المصدرة للنفط
ÖPNV	النقل العام المحلي
PEMEL	التحليل الكهربائي لغشاء البوليمر المنحل بالكهرباء
PHES	تخزين الطاقة الكهرومائية التي يتم ضخها
PPA	اتفاقية شراء الطاقة
PPP	شراكة القطاعين العام والخاص
PtX	الكهرباء إلى X
PV	الخلايا الكهروضوئية
RSS	الجمعية العلمية الملكية
SUNREF	الاستخدام المستدام للموارد الطبيعية وتمويل الطاقة

الوحدات والرموز	
CO_2	ثاني أكسيد الكربون
EUR	يورو
GW	جيجاواط
GWp	ذروة الجيجاواط
H_2	الهيدروجين
H_2O	الماء
kg	كيلوجرام
km^2	كيلومتر مربع
ktoe	كيلو طن من المكافئ النفطي
m^3	متر مكعب
.m	مليون
MW	ميجاواط
MWh	ميجاواط ساعة
O_2	الأكسجين
TWh	تيراواط ساعة

Supported by:

Federal Ministry
for the Environment, Nature Conservation,
Nuclear Safety and Consumer Protection

based on a decision of
the German Bundestag