

# سبل اقتصاد الهيدروجين: كيف يمكن للصناعة التوسع في استخدام الهيدروجين

## عن كابسارك

مركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك) هو مركز عالمي غير ربحي يجري بحثاً مستقلة في اقتصاديات وسياسات وتقنيات الطاقة بشتى أنواعها بالإضافة إلى الدراسات البيئية المرتبطة بها. وتتمثل مهمة كابسارك في تعزيز فهم تحديات الطاقة والفرص التي تواجه العالم اليوم وفي المستقبل من خلال بحث غير منحازة ومستقلة وعالية الجودة لما فيه صالح المجتمع، ويقع كابسارك في الرياض بالمملكة العربية السعودية.

## إشعار قانوني

© حقوق النشر 2020 محفوظة لمركز الملك عبدالله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك). لا يجوز استخدام هذا المستند أو أي معلومات أو بيانات أو محتوى يتضمنه دون نسبه بشكل ملائم لكابسارك. كما لا يجوز إعادة إنتاج هذا المستند أو جزء منه دون إذن خطي من كابسارك. ولا ينشأ عن المعلومات الواردة في هذا المستند أي ضمان أو تعهد أو أي مسؤولية قانونية –سواء مباشرة أو غير مباشرة- تجاه دقتها أو اكتمالها أو فائدتها. كما لا يجوز أن يعتبر هذا المستند –أو أي جزء منه- أو أن يفسر كنصيحة أو دعوة لاتخاذ أي قرار. الآراء والأفكار الواردة هنا تخص الباحثين معدي الدراسة، ولا تعكس بالضرورة موقف المركز ووجهة نظره.

يعتبر الهيدروجين حلاً محتملاً لتحقيق أهداف المناخ وإزالة الكربون من القطاعات التي يصعب تخفيفها مثل قطاع الصناعة والبناء والنقل الثقيل. ويعد في الوقت الراهن ناقلاً للطاقة ويسهل تخزينها ويمكن استخدامه لإنتاج الوقود الاصطناعي، وهذا ما يجعله أحد المكونات الأساسية في الاقتصاد الدائري للكربون التي تسرع التحول إلى أنواع الوقود الأنظف والأكثر استدامة.

يعتبر دعم الهيدروجين بوصفه ناقلاً للطاقة على الصعيدين الإقليمي والوطني مشجعاً لاستثمار أسواق رأس المال. ومع ذلك، يحتاج مجتمع المستثمرين إلى النظر في المزيد من اتفاقيات عقود بيع وشراء الإنتاج المستقبلي على المدى الطويل بين الموردين والمستخدمين النهائيين للهيدروجين المحايد للكربون لضمان تمويل مشاريع الهيدروجين.

إن إنشاء أسواق جديدة للهيدروجين بعيداً عن القطاع الصناعي الحالي لا يقل أهمية عن إزالة الكربون من أسواق الهيدروجين الصناعية الحالية وذلك بهدف تكوين سلاسل قيمة للهيدروجين المحايد للكربون (أي الهيدروجين الأزرق والأخضر).

يتطلب الانتقال السلس إلى اقتصاد الهيدروجين إزالة الكربون من إنتاج الهيدروجين الحالي القائم على الوقود الأحفوري. كما يتطلب إعادة استخدام شبكات خطوط أنابيب الغاز الطبيعي الحالية، حيثما أمكن، لربط المنتجين والمستهلكين وتطوير منشآت التخزين.

يمكن أن يحقق الهيدروجين المحايد للكربون المستخدم في التنقل بالمركبات الثقيلة على الطرق والاستخدامات الصناعية انتشاراً أكبر وزيادة في المراحل الأولية لتطوير السوق. ويعتبر التسخين بدرجة حرارة منخفضة في بعض الدول خياراً تناقضياً لإزالة الكربون.

تعتبر تدابير السياسة الداعمة وبرامج دعم الإنتاج والاستهلاك الكبرى مطلوبة لتطوير اقتصاد الهيدروجين. ولا يمكن لمشاريع البنية التحتية الكبرى أن تجتاز مراحل الاستثمار الأولية إلا عند الالتزام بالإنتاج والاستهلاك الكافيين.

أعلنت المملكة العربية السعودية مؤخرًا عن إنشائها لأكبر مصنع للألمونيا الخضراء في العالم. ويعني هذا، إلى جانب الكمية الهائلة من الهيدروكربونات منخفضة التكلفة ومساحة المسام الجيولوجية، أن الدولة على استعداد لأن تصبح مركزاً رئيساً لتصدير الهيدروجين المحايد للكربون. والجدير بالذكر أن هناك فرصة كبيرة لتوليد طاقة الرياح البحرية في منطقة بحر الشمال مما يدل ، إلى جانب تجمعات الصناعات البتروكيماوية ومساحة المسام، على أنها مستعدة لأن تصبح مركزاً أوروبياً مهماً للكربون المحايد.

في أوروبا وآسيا لتحقيق أهدافها الوطنية المتعلقة بالانبعاثات، مما يتيح الفرصة لدول منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، لا سيما المملكة العربية السعودية، لأن تصبح جزءاً من الحل في تحول الطاقة. ومع وجود كميات هائلة من الهيدروكربونات منخفضة التكلفة ومساحات المسام الجيولوجية ووفرة مصادر الطاقة المتجددة، تستعد منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا للقيام بدور رائد في توريد الهيدروجين منخفض التكلفة.

تعتبر الاستثمارات الكبيرة ضرورية لزيادة إنتاج الهيدروجين بهدف خفض تكلفته. وهي مطلوبة على طول سلسلة القيمة بأكملها، بما في ذلك الإنتاج والتعديل وتحويل البنية التحتية الحالية للهيدروجين. وفي الوقت الذي تتزايد فيه الرغبة في تمويل مشاريع الهيدروجين الكبيرة، يحتاج المجتمع الاستثماري إلى النظر في المزيد من اتفاقيات البيع والشراء طويلة المدى للإنتاج المستقبلي لضمان الحصول على عائدات على الاستثمارات وخفض تكاليف التمويل.

اتضحت في العامين الماضيين الحاجة إلى أن يكون للهيدروجين دور محوري في نظام الطاقة الخالي من الكربون وأن يساعد في إزالة الكربون من القطاعات التي يصعب تخفيفها وأن يعمل كناقل للطاقة لإدارة التقلب الكبير في إنتاج الطاقة المتجددة وأن يعزز أمن الطاقة. وفي معظم الحالات، يكون نقله لمسافة معينة أو تخزينه لفترة زمنية معينة أرخص من الكهرباء. ويحتاج الهيدروجين إلى زيادة في استخداماته بعيداً عن الاستخدامات الحالية حتى يكون مؤثراً. وغالباً ما يستخدم في الوقت الحالي باعتباره مادة أساسية تدخل في إنتاج الميثانول والأمونيا وعمليات التكرير. ومع ذلك، يحتاج إلى توسعة نطاقه ليصل إلى قطاعات أخرى مثل صناعة الصلب والتدفئة بدرجة حرارة منخفضة في المباني حيث تكون الخيارات الأخرى منخفضة الكربون أعلى سعراً وأكثر تكلفة وقطاعي الطاقة والنقل الثقيل. ويعتبر الدعم ضرورياً لمساعدة الهيدروجين على التطور لأداء هذه الأدوار. وحالياً يركز الجزء الأكبر من تمويل البحوث وتطوير تقنيات الطاقة منخفضة الكربون على توليد الطاقة منخفضة الكربون والكهربة أو التكهرب وكفاءة الطاقة. وفي حين يعتبر تطوير هذه التقنيات مهماً، فإنه يجب أن يوجه المزيد من الاهتمام نحو القطاعات التي يصعب كهربتها. وتعتبر هذه القطاعات من المساهمين الرئيسيين في انبعاثات الكربون ويمكن أن يكون للهيدروجين دور في تقليل انبعاثاتها الحالية.

قامت العديد من الدول، معظمها في أوروبا ودول المحيط الهادئ، بصياغة سياسات وخرائط طرق لتعزيز اقتصاديات الهيدروجين وهي تستخدم الهيدروجين المحايد للكربون باعتباره مرحلة من مراحل الوصول إلى الانبعاثات الصفرية. ولقد أتاحت جائحة كوفيد-19 الفرصة لتسريع هذه المبادرات، مع مبالغ كبيرة من حزم التحفيز الاقتصادي الوطنية والإقليمية المخصصة لتطوير الهيدروجين. ولقد كان هناك تعاون في منطقة بحر الشمال لتعزيز الاستراتيجيات الوطنية التي تهدف إلى تطوير سلاسل قيمة الهيدروجين المحايد للكربون وإنشاء سوق إقليمية فعالة للهيدروجين. وسوف تكون واردات الهيدروجين مهمة أيضاً للدول

# خلفية عن ورشة العمل

محايد للكربون في مصنع الأمونيا الخضراء الذي يعد الأكبر في العالم ويقع في نيوم. جمعت ورشة العمل خبراء في مجال إدارة الهيدروجين والكربون من قطاع الصناعة والأوساط الأكاديمية والمجتمع الاستثماري لمناقشة النقاط التالية والبحث فيها:

■ دور الهيدروجين في الاقتصاد الدائري للكربون

■ تحديات سلسلة التوريد وأمن الإمدادات

■ نماذج الأعمال والاستثمار المستقبلية للهيدروجين

استضاف مركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك) بالشراكة مع برنامج كلينغدايل الدولي للطاقة ورشة عمل افتراضية خلال اليومين 8 و 9 يوليو. بحثًا فيها سبل الوصول إلى اقتصاد الهيدروجين، بما في ذلك الاستخدامات الصناعية للهيدروجين وسلسلة التوريد الخاصة به وإنشاء سوق جديدة له. ودارت المناقشات أيضًا حول أدوات السياسة الرئيسة المطلوبة لتحفيز التطور السريع لإنتاج الهيدروجين المحايد للكربون. كان توقيت هذه الورشة حاسمًا نظرًا لإطلاق استراتيجية الاتحاد الأوروبي للهيدروجين في الثامن من يوليو والخطوة الطموحة التي أعلنت عنها المملكة العربية السعودية مؤخرًا لتطوير هيدروجين

نشير في هذا التقرير إلى المصطلحات التالية لشرح عملية إنتاج الهيدروجين:

الهيدروجين الرمادي: إنتاج الهيدروجين من الوقود الأحفوري دون احتجاز الكربون واستخدامه وتخزينه.

الهيدروجين الأزرق: إنتاج الهيدروجين من الوقود الأحفوري مع إدارة الكربون باستخدام تقنية احتجاز الكربون واستخدامه وتخزينه.

الهيدروجين الأخضر: إنتاج الهيدروجين عبر التحليل الكهربائي باستخدام الطاقة المتجددة

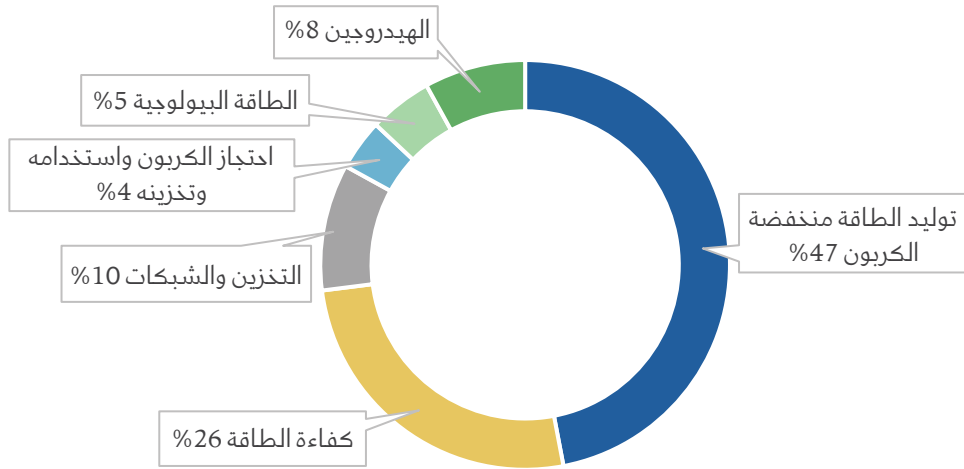
الهيدروجين المحايد للكربون: هو الهيدروجين الأزرق والأخضر

# مبادرات الهيدروجين تحشد الزخم: تقودها أوروبا وتوفر فرصًا للمملكة العربية السعودية

مقارنة بالإنتاج القائم على الوقود الأحفوري. وتعتبر الحوافز المالية مطلوبة، باعتبارها دفعة أولية، لتوسعة نطاق تقنيات توليد الهيدروجين المحايد للكربون وخفض تكاليفها. ويتشابه ذلك مع حل صناعة الطاقة المتجددة لتحدٍ مماثل، حيث أدى التوسع في استخدام تقنية الرياح وتقنية الطاقة الشمسية الكهروضوئية، من خلال دعم السياسة، إلى حدوث انخفاض كبير في التكاليف. وأصدرت وكالة الطاقة الدولية تقريرًا في الوقت المناسب يناقش التمويل ووضع ابتكار الطاقة النظيفة: تم استخدام حوالي 17 مليار دولار أمريكي من التمويل العام في إجراء البحوث وتطوير تقنيات الطاقة منخفضة الكربون في جميع أنحاء العالم (IEA 2020). وكما يوضح الرسم البياني 1، تم استخدام حوالي ثلاثة أرباع هذا التمويل في توليد الطاقة منخفضة الكربون وتقنيات كفاءة الطاقة. ومع ذلك، هناك حاجة إلى وجود تركيز أكبر على التكهرب أو الكهربية واحتجاز الكربون واستخدامه وتخزينه والطاقة البيولوجية والهيدروجين المحايد للكربون لتقليل الانبعاثات في القطاعات التي يصعب تخفيفها.

كان لاستخدام الهيدروجين باعتباره ناقلًا للطاقة عدة بدايات خاطئة لأسباب تجارية وتكنولوجية. ومع ذلك، توجد حاليًا مجموعة من العوامل التي تجعل الزخم الحالي وراء استخدام الهيدروجين مختلفًا عن المحاولات السابقة لجعل الهيدروجين أحد الحلول لتحقيق الأهداف المتعلقة بالمناخ. وتساعد المبادرات والسياسات القوية وخرائط الطرق المفصلة في دفع الهيدروجين. ولقد ساهم توفر الطاقة المتجددة منخفضة التكلفة والحاجة إلى إدارة تكاليف الانقطاع والتكامل في قطاع الطاقة والحاجة إلى نقل وتخزين كميات كبيرة من الطاقة في تحسين الوضع التجاري لتقنيات الهيدروجين. علاوة على ذلك، فإنه من الممكن أن يصبح الهيدروجين سلعة عالمية قابلة للتداول. وتجدر الإشارة إلى أن مشكلات تغير المناخ وتلوث الهواء في المناطق الحضرية والمدن عززت الدعم المجتمعي للهيدروجين باعتباره أحد الحلول لخفض الانبعاثات في الصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة. وعلى الرغم من انخفاض تكلفة إنتاج الطاقة المتجددة، لا تزال تكلفة إنتاج الهيدروجين المحايد للكربون مرتفعة

الرسم البياني 1. مخصصات التمويل العام العالمي للأبحاث وتطوير الطاقة منخفضة الكربون لمجالات تقنية محددة، 2019.



المصدر: IEA 2020.

## مبادرات الهيدروجين تحشد الزخم: تقودها أوروبا وتوفر فرصًا للمملكة العربية السعودية

أوروبا على تحقيق أهدافها للهيدروجين بالاعتماد فقط على الهيدروجين المنتج محليًا. وبالتالي، سيكون لواردات الهيدروجين من خارج القارة دور بالغ الأهمية. تتمتع منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا بموقع مثالي لتطوير الهيدروجين حيث تحتوي على كميات هائلة من الهيدروكربونات منخفضة التكلفة. فضلًا عن ذلك، فهي تمتلك قدرًا كبيرًا من مساحات المسام وخزانات المياه الجوفية المالحة لتخزين الكربون، مما يجعلها في موقع مثالي لتوفير الهيدروجين الأزرق. وتعتبر منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا غنية بموارد الطاقة المتجددة وهي موطن لمشاريع ذات تكاليف قياسية منخفضة للطاقة المتجددة. ولقد أعلنت المملكة العربية السعودية في 7 يوليو 2020 عن أكبر مشروع للأمونيا الخضراء في العالم في مشروعها الضخم نيوم، لتثبت كونها طرفًا مهمًا للهيدروجين. وبالشراكة مع شركتي إير برودكتس وأكوا باور، ستكون للمشروع قدرة على إنتاج 650 طن يوميًا من الهيدروجين الأخضر، باستخدام 4 جيجاواط من الطاقة المتجددة للمحلل الكهربائي للمياه. وسيسمح هذا للمصنع، الذي يتميز بموقعه الاستراتيجي على البحر الأحمر والممتد على طول طرق الشحن الشهيرة والواقع بالقرب من قناة السويس، بإنتاج 1.2 مليون طن من الأمونيا سنويًا.

بالنظر إلى أساس الهيدروكربون منخفض التكلفة، تحظى المملكة العربية السعودية بفرصة توفير الهيدروجين الأزرق الذي يعتبر إنتاجه في الوقت الحالي أرخص من الهيدروجين الأخضر. ومع توسع المملكة في إنتاج الغاز الطبيعي، نجد أن توليد الهيدروجين من خلال إصلاح الميثان واحتجاز الكربون واستخدامه وتخزينه يقدم خيارًا آخر لاستثمار احتياطيات الغاز فيها. وتمثل الهيدروكربونات الخفيفة مثل غاز البترول المسال والنفثا حالة اقتصادية لتوليد الهيدروجين. ومن المنظور اللوجستي، يمكن أن يمثل نقل غاز البترول المسال وثنائي أكسيد الكربون أوجه تظافر وتآزر جيدة للغاية. على سبيل المثال، فإن شحن غاز البترول المسال من المملكة العربية السعودية إلى اليابان وإنتاج الهيدروجين بالقرب من سوق المستهلك النهائي، في الوقت الذي يتم فيه إرجاع غاز ثاني أكسيد

أعلنت العديد من الدول من عام 2019، بما في ذلك الاتحاد الأوروبي وكندا وهولندا وأستراليا، عن سياسات داعمة للهيدروجين. وهددت أزمة كوفيد-19 بعرقلة الجهود المبذولة لتطوير صناعة الهيدروجين العالمية، حيث أدت حالة الطوارئ الصحية والحاجة إلى التخفيف من تفشي المرض إلى الضغط على الميزانيات الحكومية. ومع ذلك، يبدو أن الجائحة ساهمت في تعزيز مبادرات الهيدروجين في جميع أنحاء العالم. ولقد تم دمج العديد من خطط التعافي الاقتصادي المطروحة للتعامل مع الجائحة في حزم التحفيز الخضراء الأكثر طموحًا التي وضعتها المفوضية الأوروبية وعززها المستوى الوطني لبعض الدول الأوروبية. وتجدر الإشارة إلى أن أوروبا تمتلك حاليًا حوالي 1 جيجاواط من سعة المحلل الكهربائي. وأصدرت المفوضية الأوروبية استراتيجيتها الخاصة بالهيدروجين في 8 يوليو 2020 التي فصلت فيها خططها لتركيبة 6 جيجاواط من المحلل الكهربائي وإنتاج ما يصل إلى مليون طن من الهيدروجين المتجدد (الهيدروجين الأخضر) بحلول عام 2024. وبحلول عام 2030، ستصل سعة المحلل الكهربائي إلى 40 جيجاواط بهدف إنتاج 10 ملايين طن من الهيدروجين الأخضر. وخلال هذه المراحل، ستعمل على إزالة الكربون من إنتاج الهيدروجين القائم على الوقود الأحفوري باستخدام تقنية احتجاز الكربون واستخدامه وتخزينه (الهيدروجين الأزرق) لتسريع زيادة إنتاج الهيدروجين المحايد للكربون. وأطلقت كل من هولندا وألمانيا استراتيجيات هيدروجين طموحة ذات أهداف مشابهة تنطوي على تعاون ثنائي قوي. على سبيل المثال، سيتم استخدام طاقة الرياح البحرية من ألمانيا لإنتاج الهيدروجين الأخضر في هولندا، وستقوم خطوط أنابيب الغاز الطبيعي المعاد استخدامها بإيصال الهيدروجين إلى المستخدمين الصناعيين في ألمانيا وهولندا. ويهدف هذا التعاون إلى توسيع نطاقه ليشمل جميع الدول حول بحر الشمال، وتطوير سلسلة القيم المتكاملة للهيدروجين وإنشاء سوق إقليمية له. وتجدر الإشارة إلى أن هناك كهوف كبيرة للملح تحت الأرض يمكن استخدامها لتخزين الهيدروجين في ألمانيا وهولندا.

تدرك استراتيجية الهيدروجين الأوروبية أيضًا عدم قدرة

## مبادرات الهيدروجين تحشد الزخم: تقودها أوروبا وتوفر فرصا للمملكة العربية السعودية

مثل غاز البترول المسال. وسيكون هناك انخفاض في التكلفة بنسبة 30% عند نقل غاز البترول المسال إلى اليابان لإصلاحه ومن ثم إعادة غاز ثاني أكسيد الكربون، بدلاً من إصلاحه في المملكة العربية السعودية ونقل الهيدروجين السائل. وسيسمح استخدام ناقلات غاز البترول المسال بدلاً من ناقلات الهيدروجين المسال بحدوث ذلك الآن لأن ناقلات الهيدروجين المسال لم تصل بعد إلى مرحلة الاستخدام. والجدير بالذكر أن استخدام نموذج الأعمال يسمح بإنتاج الهيدروجين الأزرق بصورة تنافسية ويمكن أن يكون نقطة بداية وانطلاق لاقتصاد الهيدروجين.

الكربون إلى المملكة العربية السعودية لأغراض الاستخدام أو العزل يجعل الهيدروجين الأزرق مقترحاً جيد القيمة. ويمكن أن تسهم الاستفادة من البنية التحتية الواسعة لغاز البترول المسال الموجودة حالياً وطرق نقله في توفير مصدر منخفض التكلفة للهيدروجين الأزرق من المملكة العربية السعودية. تتراوح درجات الحرارة للناقلات شبه المبردة المستخدمة لنقل غاز البترول المسال ما بين -40 و -50 درجة مئوية ويتراوح الضغط ما بين 4-8 بار، الأمر الذي يشبه درجات الحرارة والضغط لثاني أكسيد الكربون السائل. وكما هو الحال، يمكن إعادة ثاني أكسيد الكربون إلى المملكة العربية السعودية في نفس الناقلات تماماً



# نماذج الأعمال والرغبة في الاستثمار

في القطاع الصناعي ستساعد في زيادة إنتاج الهيدروجين المحايد للكربون. فحوالي 96% من إنتاج الهيدروجين اليوم عبارة عن هيدروجين رمادي يستخدم معظمه في القطاع الصناعي وأحياناً على نطاق واسع. وهذا يجعل القطاع الصناعي مكاناً جيداً للبدء في استخدام إنتاج الهيدروجين المحايد للكربون من خلال تعديل الأسطول الحالي باستخدام تقنية احتجاز الكربون واستخدامه وتخزينه وبناء مصانع جديدة ببصمات كربونية منخفضة وتطوير المحللات الكهربائية باستخدام الكهرباء المتجددة. تتضمن استراتيجية الهيدروجين الهولندية إزالة الكربون من أسطول إنتاج الهيدروجين. وقد اقترحت خطة دعم للتوسع في إنتاج الهيدروجين، بدءاً من تحويل إنتاج الهيدروجين الحالي إلى الهيدروجين الأزرق والأخضر في التجمعات الصناعية في موانئ روتردام وأمستردام. وتتمثل الخطة في ربط تلك التجمعات الصناعية كافة بخطوط أنابيب الغاز المعاد توجيهها إلى ما يسمونه "العمود الفقري للهيدروجين" الذي من المتوقع أن يكون جاهزاً بحلول عام 2027.

إن التحدي الرئيس لدعم مثل هذه المشاريع الكبيرة والواسعة النطاق يكمن في الحاجة إلى عقود بيع وشراء طويلة المدى للإنتاج المستقبلي. وتختلف أطر السياسة وخطط الدعم المختلفة لإنتاج الهيدروجين المحايد للكربون حسب الدولة. ومع ذلك، لا تزال هناك حاجة لرؤية طويلة المدى لتعزيز استخدامات طاقة الهيدروجين. ومن منظور المستثمر، هناك حاجة إلى عقود البيع والشراء طويلة المدى للإنتاج المستقبلي لتمويل مشاريع البنية التحتية العميقة وتشجيع الاستثمار في مشاريع الهيدروجين التي تحتاج إلى الكثير من رأس المال.

وتعتبر عقود البيع والشراء طويلة المدى للإنتاج المستقبلي مهمة لزيادة المشاريع وخفض التكاليف. ويبحث المستثمرون عن عائدات مضمونة من استثماراتهم لأن إنشاء مشاريع توريد وبيع الهيدروجين في السوق الفورية محفوف بالمخاطر. وتعتبر تطبيقات التنقل، على سبيل المثال، سوقاً مربحة للهيدروجين، وليس من المعتاد الحصول على عقود بيع وشراء طويلة

سوف تكون نماذج أعمال الهيدروجين مدفوعة بتكامل الهيدروجين مع توليد الكهرباء. وستهيمن الكهرباء تدريجياً على مشهد الطاقة، حيث يكون للهيدروجين منخفض التكلفة دور في إزالة الكربون من القطاعات التي يصعب تخفيفها. كما أنها ستكمل قطاع الكهرباء من خلال توفير خدمات المرونة مثل توليد الطاقة القابلة للتوزيع وتخزين الطاقة المتجددة وتخفيف قيود الشبكة. وسوف يكون لنماذج أعمال الهيدروجين التي نشأت عن نماذج توليد الكهرباء أو أصبحت مدمجة فيها فرصاً أكبر للنجاح المبكر.

وعلى المدى القريب، هناك سوقان رئيسان محتملان للهيدروجين وهما النقل الثقيل على الطرقات والصناعة. وقد تكون هناك حالة عمل جيدة لاستخدام الهيدروجين في قطاع النقل الثقيل، حيث قد تواجه المركبات الكهربائية قيوداً. فكلما زاد وزن المركبة وزادت ساعات عملها يومياً، زادت احتمالية أن تكون المركبات القائمة على الهيدروجين حلاً قابلاً للتطبيق. وتعتبر مركبات خلايا وقود الهيدروجين مثبتة وجاهزة للاستخدام من الناحية التكنولوجية. ومع ذلك، يكمن التحدي، كما هو الحال مع أي تقنية جديدة، في قبولها وتوفير البنية التحتية الداعمة. ولقد كان العالم بطيئاً في اعتماد تكنولوجيا الهيدروجين لاستخدامها في النقل الثقيل بسبب نقص الابتكار التجاري. وإن من أهم العوائق التي تحول دون اعتماد مركبات خلايا الوقود هو تكلفة رأس المال. ويجب أن تستهدف شركات خلايا وقود الهيدروجين الاستخدامات التي يمكنها أن تعوض الاستثمارات من خلال الاستخدام العالي ومركبات "العودة إلى القاعدة" حتى يتم بناء البنية التحتية للهيدروجين. ونظراً لأن تكلفة تشغيل وصيانة هذه المركبات منخفضة، يمكن أن تصل التكلفة الإجمالية لامتلاكها من تكلفة مركبات الديزل التقليدية، بشرط مشاركة شريك توريد الهيدروجين الأخضر. إن تقديم عقود إيجار للمركبات، حيث لا يقلق مشغل الأسطول إلا من التكاليف التشغيلية لها ويتعامل مزودو المعدات مع الصيانة، هو بمثابة نموذج أعمال شائع ويعمل على إزالة عائق كبير آخر في عملية التبني.

إن إزالة الكربون من سلسلة القيمة الحالية للهيدروجين

والموردين والاستثمارات. تراعي سياسات ومبادرات الكربون الحالية، مثل نظام تجارة الانبعاثات التابع للأمم المتحدة، تكلفة إنتاج الكهرباء الخضراء لا الهيدروجين الأخضر، فالأخير يعتبر أكثر تكلفة ويحتاج إلى خطوة تحويل إضافية. تزيد تكاليف النقل والتخزين من تكاليف الهيدروجين الأخضر فوق السعر الحالي لثاني أكسيد الكربون الذي حدده نظام تجارة الانبعاثات والذي يعتبر في الوقت الحالي منخفض جدا لتحفيز وتشجيع مشاريع الهيدروجين.

المدى للإنتاج المستقبلي مع محطات التزود بالوقود بأسعار ثابتة. ومع ذلك، فإن العقود طويلة المدى ستجعل مثل هذه الاستثمارات جذابة وستسهل طرح مركبات خلايا وقود الهيدروجين ، لا سيما مركبات " العودة إلى القاعدة". وتعتبر العقود طويلة المدى ضرورية للاستخدامات الصناعية مثل إنتاج الأسمدة النظيفة أو المصافي . وقد يكون الحصول على عقود بيع وشراء طويلة المدى للإنتاج المستقبلي صعبا مع غياب سعر الكربون أو ضرائب تعديل الحدود . وهناك الكثير من الجدل حول كيفية إنشاء أسواق للهيدروجين المحايد للكربون من أجل تسهيل المراكز

# البنية التحتية وتحديات سلسلة الإمداد/ التوريد

خطوط أنابيب الغاز في شبكة الغاز الأوروبية إلى أكثر من 200,000 كيلو متر. وتمتلك حوالي 40% من المنازل الأوروبية وصلات غاز ، وتقترب النسبة في بعض الدول مثل هولندا من 100% . ومن المهم ملاحظة أن نقل الهيدروجين لمسافة معينة يعتبر أكثر فعالية من حيث التكلفة مقارنة بالكهرباء . فنقل الهيدروجين لمسافة 2,500 كيلو متر يكلف 0,005 يورو للكيلوواط في الساعة (أو 0,2 يورو للكيلوغرام)، بينما يكلف نقل الكهرباء للمسافة نفسها ما بين 0.04 و 0.05 يورو للكيلوواط في الساعة. وتقدم خطوط الأنابيب الخيار الأرخص للنقل ولكن لها قيوداً عند نقل الهيدروجين لمسافات أبعد. على سبيل المثال، قد يحتاج نقل الهيدروجين من الشرق الأوسط إلى أوروبا إلى طرق بديلة مثل الهيدروجين المسال أو حتى استخدام ناقلات للهيدروجين مثل الميثانول أو الأمونيا. ومع ذلك، فإن استخدام مثل ناقلات الهيدروجين يحتاج إلى إعادة تكوين الهيدروجين ليصبح بصورته النقية، مما يعني الحاجة إلى مرحلة تحويل إضافية وبالتالي تكبد المزيد من التكاليف الإضافية.

وللسماح بانتقال سلس إلى اقتصاد الهيدروجين، من المهم أن يعمل منتجو ومستهلكو الهيدروجين جنباً إلى جنب مع شركاء سلسلة التوريد. على سبيل المثال، لا جدوى من صناعة مركبات الهيدروجين إن لم يكن هناك إنتاج للهيدروجين ولم تتوفر البنية التحتية أو أنظمة التوزيع له. ويتعين على الشركات الخاصة العمل مع حلول شاملة لتسهيل تغلغل الهيدروجين. فضلاً عن ذلك، تحتاج الحكومات إلى توفير الأطر التنظيمية والخطط اللازمة لتحقيق المساواة في فرص المنافسة بين منتجي الهيدروجين وسلاسل توريد الهيدروجين القائم على الوقود الأحفوري.

توجد هناك بعض الخفايا عن سلامة طاقة الهيدروجين وقبول البنية التحتية والعامه لها. تتمتع صناعة الطاقة بخبرة كبيرة في التعامل مع الهيدروجين الذي له سجل

بحسب ما أسلفنا، ستكون واردات الهيدروجين- سواء إلى أوروبا أو آسيا- جزءاً مهماً لتلبية الطلب المستقبلي على الهيدروجين في هذه المناطق. ولا تمتلك أوروبا المساحة التي تحتاجها لإنتاج الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح اللازمة لإنتاج الهيدروجين الأخضر. وستستخدم أوروبا الهيدروجين النقي (بدلاً من المخلوط مع الغاز الطبيعي) في صناعة الصلب أو إنتاج المواد الكيماوية/ الإنتاج الكيميائي أو التكرير أو الطلب الجديد على النقل أو التدفئة. وسوف تكون هناك حالة لمزج الهيدروجين مع الغاز الطبيعي لإنشاء طلب فوري في البداية، قبل زيادة إنتاج الهيدروجين واستخدامه. ولقد أظهرت البحوث في فرنسا وألمانيا وهولندا أن مزج الهيدروجين في خطوط أنابيب الغاز الطبيعي يمكن أن يتم إلى حد ما قبل أن يبدأ تقصف الأنابيب وملاءمة جهاز الضغط/ الضاغط وعدادات التدفق في الضغط على النظام. ومع ذلك، هناك مجموعة متزايدة من الأدلة لوجود قيود على استخدامات المستخدم النهائي. ولقد أظهرت بعض الدراسات أنه يمكن مزج 6% من الهيدروجين في البنية التحتية للغاز الطبيعي في فرنسا بتكلفة منخفضة واستثمارات بسيطة. ومع ذلك، قد يواجه المستخدمون النهائيون تحديات مثل، مركبات الغاز الطبيعي المضغوط غير المرخصة لمزج أكثر من 2% من الهيدروجين في مزيج الغاز الطبيعي. ويشكل قرب كهوف الملح، حيث يمكن تخزين الهيدروجين، من المستخدمين النهائيين مصدر قلق آخر، فهي قد تكون متوفرة في بعض دول أوروبا، مثل هولندا وألمانيا دون دول أخرى مثل فرنسا. لذلك، يجب أن يراعى استخدام الهيدروجين في منطقة ما سلسلة القيمة بأكملها.

تتمتع استراتيجية الاتحاد الأوروبي المتعلقة بالهيدروجين برؤية بعيدة المدى لإعادة استخدام بعض خطوط أنابيب الغاز وكهوف الملح للهيدروجين التي يمكن تحقيقها في السنوات العشر إلى الخمس عشرة القادمة. ويمكن للاتحاد الأوروبي أن ينقل الهيدروجين من خلال خطوط الأنابيب عبر أوروبا وحتى إلى شمال أفريقيا. يصل طول

سلامة مثبت ومؤكد. ومع ذلك، فإن الأمر متروك لصناعة الطاقة لتظهر أنه يمكن استخدام الهيدروجين بأمان بعيداً عن الاستخدامات الصناعية وتطمئن عامة الناس بأنه آمن. وتجدر الإشارة إلى أن الخطط التجريبية للهيدروجين الرامية إلى تحقيق هذه الأهداف تعتبر قيد التنفيذ.

International Energy Agency (IEA). 2020. "Clean Energy Innovation." July 2. Accessed July 30, 2020. <https://www.iea.org/reports/clean-energy-innovation>.

# نبذة عن ورشة العمل

**ألينا فارجير-** مدير شركة سوين كابيتال بارتنرز  
**عقيل جمال-** كبير الإداريين التقنيين، أرامكو السعودية  
**كوبي فان دير ليندي** – مدير، برنامج كلينغندايل الدولي للطاقة

**جتندرا روي تشاودري-** زميل باحث، كابسارك  
**وائل المزيدي-** الشريك المؤسس لأفانس لابس  
**ماجد السويلم-** باحث مشارك أول، كابسارك  
**رالف دي هان-** مدير تطوير الأعمال، نيوم  
**كارولين ستايباكر-** مدير مساعد، شركة غايد هاوس  
**آد فان ويك** - أستاذ، جامعة دلفت للتكنولوجيا

**جاب فان لوين-** باحث، برنامج كلينغندايل الدولي للطاقة  
**فلور فان دام-** باحث (مؤقت)، برنامج كلينغندايل الدولي للطاقة  
**جاكوب روكماكر-** مستشار أول للشؤون العامة، شركة آر دبليو إي  
**كريغ نايت-** الرئيس التنفيذي، شركة هورايزون لتقنيات خلايا الوقود

**يوشياكي شيباتا-** خبير اقتصادي أول، معهد اقتصاديات الطاقة الياباني  
**بارت كولجمان-** مدير الشراكات والمشاركات، شركة إنجي  
**ماساكازو تويودا-** الرئيس التنفيذي ورئيس مجلس إدارة معهد اقتصاديات الطاقة الياباني

عقد مركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك) ورشة عمل افتراضية بالشراكة مع برنامج كلينغندايل الدولي للطاقة للبحث في سبل اقتصاد الهيدروجين. واستقطبت ورشة العمل أكثر من 35 خبيراً في مختلف المجالات بما في ذلك السياسة والبحوث والاستثمارات.

## قائمة المتحدثين

**جان فريديريك براون-** زميل باحث، كابسارك  
**جيسون ماكديول-** مدير أول للتكنولوجيا والاستراتيجيات والسياسات، جنرال إلكتريك  
**ماريا فان دير هوفن-** زميل أول، برنامج كلينغندايل الدولي للطاقة  
**سسوميترا ساكسينا-** عالم أبحاث، جامعة الملك عبدالله للعلوم والتقنية  
**رامي شبانة-** باحث مشارك أول، كابسارك  
**كولن وارد-** باحث زائر، كابسارك  
**تيم كارلسون-** المدير التنفيذي للشراكة الدولية للهيدروجين وخلايا الوقود في الاقتصاد  
**جورج غيغلر-** المدير العام لتي كي آي نيو غاز  
**نوي فان هلسنت-** مبعوث الهيدروجين، وزارة الشؤون الاقتصادية والسياسة المناخية في هولندا  
**فرانك ووترز-** مدير أول ومشرف على الهيدروجين منخفض الكربون، وورلي  
**فهد التركي-** نائب الرئيس للأبحاث، كابسارك  
**لورا كوبن-** مدير تطوير الأعمال، شركة فوباك

## قائمة المشاركين

---

**لوسبي بوسيت**- مستشارة الأنظمة والسياسات  
الأوروبية، شركة إكوينور

**علاء داود**- مدير، جنرال إلكتريك لخدمات الطاقة

**ماتيس سيلي**- المدير التجاري للهيدروجين، شركة شل

**ماجد سماك**- مهندس طاقة، جنرال إلكتريك باور

**فولمر دي هان**- نائب مدير مجلس البيئة والبنية التحتية

**مورالي كريثنا كالاغا**- تقني أول، جنرال إلكتريك  
للطاقة والمياه







## نبذة تعريفية عن الفريق

### كاوشيك ديب



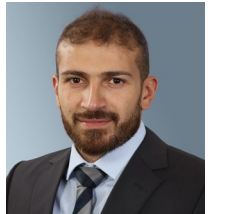
خبير في الاقتصاد التطبيقي وزميل باحث في مركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك)، وهو حاليا مسؤول عن تحديد وتفعيل جدول الأعمال البحثي لفريق التنمية الصناعية والأسواق التابع للمركز. عمل في السابق رئيسا لأسواق الغاز العالمية في الفريق الاقتصادي لشركة بريتش بتروليوم حيث أشرف على التحليل الذي شكل الأساس لاستثمار الغاز الطبيعي واستراتيجية التجارة الخاصة بهذه الشركة. وقد عمل كاوشيك قبل ذلك في بنك آي دي إف سي، حيث شملت مهامه إجراء أبحاث في السياسات واقتصاديات البنية التحتية والبيئية عالج فيها قضايا البنية التحتية منخفضة الكربون وخدمات الكهرباء اللامركزية في المناطق الريفية ونظم النقل العام المتوسطة للمدن الصغيرة. وهو حاصل على درجة الدكتوراه في العلوم من المعهد الفيدرالي للتكنولوجيا في زيورخ، كما أنه أجرى بحثا في الاقتصاد التطبيقي بجامعة تيري بالهند وأشرف عليها، حيث كان مديرا لبرنامج ماجستير إدارة الأعمال.

### كوبي فان دير ليندي



مديرة برنامج كلينغندايل الدولي للطاقة. تشمل مجالات خبرتها الأسواق العالمية للنفط والغاز الطبيعي وتحولات أنظمة الطاقة، بما في ذلك الهيدروجين وأمن الإمداد وقضايا سياسات الطاقة الأخرى. كانت لها خبرة طويلة في الأوساط الأكاديمية وألفت العديد من المنشورات عن الطاقة، ولديها خبرة كمديرة مستقلة (غير تنفيذية) في العديد من شركات الطاقة وقدمت المشورة للحكومة الهولندية في مختلف قضايا سياسات الطاقة. وهي حاصلة على درجة الماجستير في العلاقات الدولية والقانون العام ودرجة الدكتوراه في الاقتصاد من جامعة أمستردام.

### رامي ثببانه



باحث مشارك أول تتمحور اهتماماته حول أسواق الغاز والسوائل العالمية. تمتد خبرته لأكثر من 13 عاما في البحوث والصناعة حيث يحلل أسواق وسياسات الطاقة. عمل قبل التحاقه بكابسارك محللا لأساسيات السوق في شركة سنوفس للطاقة، حيث قدم الدعم التحليلي بشأن قضايا محددة تؤثر على أسواق الغاز والمكثفات وسوائل الغاز الطبيعي في أمريكا الشمالية. تضمن عمله إطلاع الشركة على استراتيجيات التحوط. وكان قبل ذلك عضوا أساسيا لمدة ثلاث سنوات في فريق أبحاث الوقود والطاقة في المعهد الكندي لأبحاث الطاقة. وهو حاصل على درجة الماجستير في تنمية الطاقة المستدامة من جامعة كالغاري.

## جابي فان ليوين



يعمل باحثاً في برنامج كلينغندايل الدولي للطاقة منذ عام 2018 وينصب تركيزه البحثي على مسارات الهيدروجين وإزالة الكربون للصناعة. تمت إعارته لوكالة الطاقة الدولية في عام 2019 للعمل على تقرير الهيدروجين لاجتماع مجموعة العشرين في اليابان. حصل على درجة البكالوريوس في الهندسة الميكانيكية من جامعة دلفت للتكنولوجيا وعلى درجة الماجستير في علوم الطاقة من جامعة أوتريخت.

## ماجد السويلم



باحث مشارك أول في مركز الملك عبدالله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك) يركز في أبحاثه على الطاقة المستدامة وأمن الطاقة والبنية التحتية للطاقة. يمتلك خبرة تزيد عن 15 عاماً في صناعة النفط والغاز في شركتي شيفرون وأرامكو السعودية. تضمنت خبرته المحاكاة والنمذجة وإدارة الأصول تحت السطحية وتقدير احتياطي الكربون والتخطيط للتقنيات الثورية والأعمال. حصل على درجة البكالوريوس في هندسة البترول من جامعة تولسا في الولايات المتحدة الأمريكية ودرجة الماجستير في نفس التخصص من جامعة تكساس أي أند إم بالإضافة إلى حصوله على درجة الماجستير في علوم الجيولوجيا والهندسة من المعهد الفرنسي للبترول.

## نبذة عن المشروع

يعتبر الهيدروجين ناقلاً مهماً للطاقة يمكنه تسريع الوصول إلى صافي انبعاثات صفرية. وبالنظر إلى استخداماته المتنوعة وقدرته على تخفيف الانبعاثات الكربونية، يعتبر مناسباً ليكون عاملاً تمكيناً للاقتصاد الدائري للكربون. يبحث هذا المشروع في السبل المختلفة للوصول إلى اقتصاد الهيدروجين ودور الدول الغنية بالموارد في تقديم حلول أقل تكلفة ونظيفة للهيدروجين.



[www.kapsarc.org](http://www.kapsarc.org)