

جامعة ميدأوشن

كلية الإدارة

قسم / تخصص ماجستير الإدارة الصحية



الهيدروجين الأخضر: مصدر للطاقة في المستقبل

إعداد الطالب/ عبدالرحمن رياض كوشك

إشراف/

العام الدراسي:

2025

مقدمة:

إذا كانت تسعينات القرن الماضي هي عقد الرياح، والعقد الأول من القرن الحادي والعشرين هو عقد الطاقة الشمسية، والعقد الثاني من القرن الحادي والعشرين هو عقد البطاريات، فإن العقد الحالي يمكن أن يدفعنا إلى مرحلة أخرى في تحول الطاقة، هي مرحلة الهيدروجين.

فقلما يمر أسبوع دون ظهور مشروع جديد ضخّم أو طفرة في مجال الهيدروجين. ففي السنوات الخمس الماضية وحدها، وضع أكثر من 30 بلدا استراتيجيات وطنية للهيدروجين، أو بدأ في إعدادها وكانت أهداف اتفاق باريس المتعلقة بالمناخ محركا رئيسيا في هذا الصدد، غير أن الارتفاع الحاد في أسعار الغاز قاد بدوره تحولا إلى أنواع الوقود الأكثر خضرة. وتشكل كذلك التنمية الاقتصادية والسياسات الصناعية عاملا مهما أيضا.

ومن شأن الهيدروجين التنظيف إحداث تحول بالغ في البيئة الجغرافية للطاقة كما نعرفها اليوم. فقد تنشأ جغرافيات جديدة للتجارة تتمحور حول الهيدروجين التنظيف ومشتقاته، مثل الأمونيا. وقد تصبح البلدان التي تنعم بوفرة الشمس والرياح من كبار مصدري الوقود الأخضر أو من مواقع التصنيع الأخضر. ويمكن أن تزايد المنافسة الصناعية في ظل طموح البلدان لقيادة التكنولوجيا في قطاعات مهمة من سلسلة القيمة للهيدروجين.

وبوجه عام، يمكن لتوسيع نطاق الهيدروجين التنظيف أن يعزز المنافسة الجغرافية الاقتصادية القوية، وأن يشجع وجود تحالفات وأوجه تعاون جديدة، ويشكل نقاط قوة جديدة في مراكز إنتاج واستخدام الهيدروجين المستقبلية.

فبالرغم من أن الهيدروجين هو أصغر جزيء في الكون، إلا أنه يتمتع بإمكانات هائلة بوصفه وقودا نظيفًا يمكن استخدامه في إحداث تحول الطاقة العالمي، فهو غاز قابل للحرق داخل المحركات، كما يمكن استخدامه في خلية وقود لتشغيل المركبات، أو إنتاج الكهرباء، أو توليد الحرارة. ويمكن أن يكون مادة خام أولية ووحدة أساسية في المنتجات الكيميائية الأخرى، مثل الأمونيا (وهي مدخل رئيسي في الأسمدة) والميثانول (الذي يستخدم في إنتاج البلاستيك). كذلك فإن الهيدروجين ومشتقاته يمكن تخزينهما إلى ما لا نهاية في صهاريج وقباب ملحية، وهو ما يعني أنهما ربما يكونان من الحلول المهمة لتخزين الطاقة على المدى الطويل.

ومن الأمور المهمة أن الهيدروجين يمكن أن يحل محل الوقود الأحفوري في جميع هذه الأغراض دون أن يتسبب في انبعاث ثاني أكسيد الكربون؛ فهو ناقل للطاقة خال من الكربون، مثل الكهرباء، لكنه يتفوق عليها فيما يتعلق بإزالة الكربون عن القطاعات التي يصعب إمدادها بالكهرباء، كالصناعات الثقيلة، أو النقل لمسافات طويلة، أو التخزين الموسمي.

وتتوقع معظم سيناريوهات إزالة الكربون أن يكون للهيدروجين دور مهم في تحقيق الانبعاثات الصفرية الصافية بحلول منتصف القرن، فالوكالة الدولية للطاقة والوكالة الدولية للطاقة المتجددة، على سبيل المثال، تتوقعان أن

يلي الهيدروجين من 12% إلى 13% من الطلب النهائي على الطاقة بحلول 2050، صعودا من صفر تقريبا في الوقت الحالي .

والهيدروجين صناعة كبرى بالفعل، إلا أن سوق الهيدروجين تتسم في الوقت الراهن بثلاث خصائص توشك أن تشهد تحولا جذريا: أن الهيدروجين لا يزال يُصنع في معظمه من الوقود الأحفوري غير المعالج لخفض الانبعاثات، وأن استخدامه يكاد يكون محصورا في كونه مادة خاما في العديد من الصناعات، وأنه غالبا ما يُنتج ويُستخدم في الموقع نفسه.

ويجب إجراء تجديد شامل لكل من هذه الخطوات في سلسلة القيمة لكي يحقق الهيدروجين إمكاناته الكاملة باعتباره القطعة المفقودة في لغز الطاقة النظيفة، ويجب أن يتحول إنتاجه إلى استخدام مصادر أنظف وأن يتوسع استهلاكه إلى قطاعات جديدة، إذ من الممكن أن يصبح الهيدروجين ومشتقاته سلع طاقة متداولة على المستوى الدولي .

مشكلة الدراسة:

تتمثل مشكلة الدراسة في أنه على الرغم من توافق الآراء العالمية حول ضرورة تأمين مسار التحول إلى الطاقة الخضراء، خاصة بعد حدوث كل من أزميتي المناخ والطاقة مما نتج عنه ارتفاع الأسعار في جميع أسواق النفط والفحم والغاز الطبيعي بسبب النقص في سلاسل الإمداد.

إلا أنه لا يزال هناك عوائق تحول دون تحقيق ذلك الإنتقال، حيث الافتقار إلى البنية التحتية التمكينية اللازمة لانتشار هذه التقنية بالإضافة إلى ارتفاع تكاليفها لا سيما في قطاع النقل، كذلك حالة عدم اليقين التي تحيط بكيفية تعامل الدول مع فجوة متطلباتها من الطاقة على المدى القريب، وأهدافها المناخية على المدى البعيد والتوقيت اللازم لحدوث هذا التحول.

أهمية الدراسة:

يشكل أمن الطاقة والإنتاج المسؤول لمصادرهما المستدامة أمرا ضروريا تفرضه الظروف الاقتصادية العالمية المعاصرة، خاصة في ظل ما يمر به العالم من أزمات متكررة التي نتج عنها الارتفاع الحاد لأسعار الطاقة، وفاقم في الوقت ذاته النقص في إمداداتها والقلق بشأن أمنها، هذا بالإضافة إلى هيمنة الطاقة الأحفورية التقليدية، وما تسببه من تأثيرات سلبية ضخمة على البيئة والمناخ.

بناء عليه، حظيت مصادر الطاقة الخالية من الكربون (الطاقة المتجددة) باهتمام متزايد خلال السنوات الماضية، وذلك باعتبارها الحل الأمثل لمعظم التحديات الرئيسية التي تواجه العالم، خاصة في كيفية تلبية احتياجاته المتزايدة من الطاقة والحفاظ على النمو الاقتصادي دون المساهمة في تغير المناخ.

هذا وتعتبر طاقة الهيدروجين الأخضر واحدة من أهم المنتجات التي تتم من خلال استخدام هذه المصادر والتي تلعب دورا محوريا في التحول العالمي نحو اقتصاد خالي من الكربون، ولا سيما في قطاع النقل الذي يعد ثاني أكبر منتج لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون عالميا بعد الكهرباء وتوليد الحرارة. وأكبر مستخدم نهائي للطاقة في البلدان المتقدمة النمو وأسرع القطاعات نموا في معظم البلدان النامية.

لذا يركز البحث على دراسة امكانات اقتصاديات الهيدروجين الأخضر ودورها في تعزيز أمن الطاقة منخفضة الانبعاثات، خاصة في قطاع النقل تزامنا مع ما تشير إليه معظم الدراسات التي تؤكد على إمكانية أن يكون الهيدروجين الأخضر مخزنا طويل الأجل وناقلا أساسيا لها من أجل تعزيز أمن الطاقة وتحقيق النقل المستدام، سواء من خلال تشغيل المركبات الكهربائية التي تعمل بخلايا الوقود مثل سيارات الهيدروجين والشاحنات والقطارات أو كمواد أولية للوقود الصناعي للسفن والطائرات، إذ يمكن للهيدروجين أن يكمل الجهود الحالية لكهربة النقل البري والسكك الحديدية، ويوفر خيارا قابلا للتطوير لإزالة الكربون عم الشحن وقطاعات الطيران.

أهداف الدراسة:

تنبثق أهمية الدراسة من أهمية البحث عن بدائل فورية وآمنة للوقود الأحفوري التقليدي، ليس فقط من أجل معالجة أزمة المناخ العالمية والمساهمة في معالجة التدهور البيئي، بل لعدم الوقوع مجدداً في دائرة انعدام أمن الطاقة، الذي تسببت به الصراعات الجغرافية والسياسية بالإضافة إلى التكاليف المتصاعدة والمستمرة في أسعار الطاقة.

وذلك لوجود ارتباط وثيق الصلة بين كل من مواجهة أزمة الطاقة ومعالجة أزمة المناخ، فالاستثمار الكثيف في الطاقة النظيفة ومنتجاتها هو أفضل ضمان لأمنها في المستقبل، وأبرز الحلول للحد من انبعاثاتها الضارة، خاصة مع ما تتوقعه وكالة الطاقة الدولية من أن انبعاثات ثاني أكسيد الكربون ستزداد بحوالي 35% بحلول عام 2050 في السيناريو المرجعي، بينما يتطلب سيناريو الدرجتين خفض الانبعاثات بنسبة 40% حتى نفس العام، الأمر الذي يستلزم ضرورة انخفاض متوسط الانبعاثات لكل كيلومتر بأكثر من 70% على الرغم من الزيادة في عمليات شحن ونقل البضائع، والحركة الجوية الأكثر كثافة بالكربون.

وفي هذا السياق، وعلى الرغم من أن الهيدروجين هو أضغر جزيء في الكون إلا أنه يتمتع بإمكانيات هائلة تمكنه من إحداث تغيرات ملحوظة في تحولات الطاقة العالمية، إذ أنه ناقل للطاقة خال من الكربون بصفته وقوداً نظيفاً يحل محل الوقود الأحفوري في جميع الاستخدامات، فضلاً عن ما تشير توقعات سيناريوهات إزالة الكربون التي تنبأ بأن يكون للهيدروجين دور مهم في تحقيق الانبعاثات الصفرية الصافية بحلول منتصف القرن الحالي.

فعلى سبيل المثال تتوقع الوكالة الدولية للطاقة المتجددة أن يلي الهيدروجين الأخضر من 12% إلى 13% من الطلب النهائي على الطاقة بحلول عام 2050 صعوداً من صفر حالياً، لذا يستهدف البحث تسليط الضوء على اقتصاديات الهيدروجين وأنواعه، ولا سيما الهيدروجين الأخضر من حيث أبرز الدور الذي يمكن أن يلعبه في تعزيز أمن الطاقة والتحول إلى اقتصاد خال البصمة الكربونية. ولا سيما في قطاع النقل الذي ساهم في الناتج المحلي الإجمالي العالمي بنحو 7% أو ما تقدر بنحو 6.8 تريليون دولار، ووظف نحو 193 مليون شخص أو ما نسبته 5.6% من القوة العاملة خلال عام 2021.

تساؤلات الدراسة:

- ما مدى إمكانية مساهمة اقتصاديات الهيدروجين الأخضر في تعزيز أمن الطاقة وتحقيق النقل المستدام؟
- هل بالإمكان خفض تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر بحيث يمكن الدول من اعتماده كمصدر بديل للطاقة؟
- هل بالإمكان استخدام شبكات الغاز الطبيعي الأحفوري بنفس الطريقة مع الهيدروجين الأخضر؟

فروض الدراسة:

- يساهم الهيدروجين الأخضر في خفض الانبعاثات الكربونية الضارة في كافة القطاعات الاقتصادية، ولا سيما في القطاعات التي يصعب تخفيف انبعاثاتها (كالصناعة والنقل).
- يتوقع أن يكون لاقتصاد الهيدروجين الأخضر دور متعاظم في تعزيز أمن الطاقة وتحقيق النقل المستدام خلال الأعوام القليلة القادمة.
- تسارع الدول الخطى في تبني الخطط والمقترحات التي من شأنها جذب المزيد من الاستثمارات الأجنبية في مجال الهيدروجين الأخضر.

الدراسات السابقة:

اهتمت العديد من الدراسات الاقتصادية بدراسة اقتصاديات الهيدروجين الأخضر، كناقيل مستدام للطاقة ودوره في التحول العالمي إلى اقتصاد منعدم البصمة الكربونية.

حيث أشارت الدراسة (صندوق النقد الدولي، ديسمبر 2022) إلى ضرورة التحول في نظام الطاقة الحالي، على أن لا تقتصر عملية التحول إلى إدخال مصادر جديدة للطاقة فحسب، بل لابد من أن يحدث إجراء تغيير شامل لأسس الطاقة في الاقتصاد العالمي الذي يبلغ حجمه نحو 100 تريليون دولار.

أكدت الدراسة أن هذا التحول لابد وأن يكون مدفوعاً بالمناخ، من ثم الاعتماد على تقنيات جديدة تنخفض بوجودها الانبعاثات والتي من بينها الهيدروجين الأخضر الذي يتوقع أن يسيطر على الأسواق العالمية خلال السنوات القليلة القادمة كسوق الاتحاد الأوروبي الذي يتنبأ أن يوفر الهيدروجين ما يتراوح بين 20% و 25% من طاقته بحلول عام 2050.

كذلك قامت دراسة (Mazloomi K., & Gomes Ch. 2012) بتسليط الضوء على جدوى تطوير صناعة الهيدروجين كناقيل رئيسي للطاقة ومصدر للوقود المستدام في المستقبل القريب، حيث أشارت الدراسة إلى مجموعة المخاطر المرتبطة بمراحل الإنتاج والتخزين والتوزيع، مقترحة مجموعة من التقنيات الحديثة والممكنة لمعالجة إجراءات السلامة والأمان.

وقد توصلت الدراسة إلى أن الهيدروجين سيكون لاعباً أساسياً في عملية تخزين الطاقة المهدرة في مرحلة توليد الطاقة، ولا سيما في شبكات الطاقة الكبرى، خاصة خلال ساعات الذروة التي تحدث في أوقاتها تحويل الطاقة إلى الأحمال الوهمية.

كما أن التخزين بحاويات صغيرة إلى متوسطة أكثر جدوى من الجهة الاقتصادية، مقارنة بالقيام بنفس العملية بحاويات كبيرة الحجم. مع العلم أنه قد تم التأكيد على تطوير إرشادات السلامة المطلوبة على مستوى العالم، للتعامل مع كافة أنواع الهيدروجين ليصبح وقوداً يومياً.

ذلك على الرغم من أن مخاطر التعامل معه قد تكون مساوية أو أقل من مخاطر أنواع الوقود الأخرى، أوصت الدراسة بضرورة تطوير البنية التحتية لتتناسب مع الحالة الفيزيائية والكيميائية لغاز الهيدروجين، وذلك في حالة إذا رغبت الدولة في استخدام الهيدروجين كبديل للوقود الأحفوري.

كما خللت دراسة (Noussan M et al, 2021) مجموعة التحديات والفرص التي يمكن أن يمنحها كل من الهيدروجين الأخضر والأزرق لمجتمع الهيدروجين المحتمل، حيث خلصت الدراسة إلى أنه على الرغم من مواجهة الهيدروجين الأخضر مجموعة من التحديات لعل أهمها مجموعة التحديات التقنية والبنية التحتية الخاصة بنقله وتخزينه، إلا أنه يعمل على توفير فرص مثلى ليس بشأن تغير المناخ فقط بل لتعزيز أمن الطاقة وتطوير الصناعات المحلية في العديد من الدول، لذلك أوصت الدراسة بضرورة السماح لجميع التقنيات المتاحة بالمساهمة بناء على

مؤشرات تكون قابلة للقياس، من أجل التحول لنظام طاقة خال من الكربون والذي لن يتحقق إلا من خلال تعاوننا دوليا قويا يعتمد على معايير وأهداف شفافة.

كذلك ناقشت دراسة (Blasio N. , 2021) دور تطبيقات تقنيات الهيدروجين الأخضر في خفض الانبعاثات في قطاع النقل، مقارنة بين أنواع المركبات الكهربائية التي تعمل بالبطاريات والمركبات الكهربائية التي تعمل بخلايا الوقود الهيدروجينية، والأخرى التي تعمل بالوقود الحيوي.

مؤكدة في نهاية الدراسة على تفوق خلايا الوقود الهيدروجينية في خفض الانبعاثات الكربونية إلى الصفر في قطاع النقل.

هذا وقد قامت دراسة (وكالة الطاقة الدولية، 2019) بتحليل الوضع الحالي للهيدروجين النظيف من أجل تحديد الفرص الفورية لتوفير نقطة انصلاق للمستقبل، حيث قامت الدراسة بتقييم شامل ومستقل للهيدروجين مع تحديد الطرق التي يمكن أن يساعد بها في تحقيق مستقبل طاقة نظيف وآمن وبأسعار معقولة.

وقد انتهت الدراسة إلى أن الهيدروجين النظيف يتمتع حاليا باهتمام سياسي وتجاري غير مسبوق، نظرا لمساهمته في مواجهة تحديات الطاقة الحرجة المختلفة، وبصفته موفرا طرقا عدة لإزالة الكربون في مجموعة القطاعات كالنقل والحديد والصلب وغيرها.

وأوصت بضرورة زيادة نطاق تقياته مع العمل على خفض تكاليفه للسماح باستخدامه على نطاق واسع.

كما تناولت دراسة (Carlson E. & Lukaszwska H., 2022) مجموعة المخاطر والتحديات المرتبطة بالانتشار الواسع للهيدروجين الأخضر ومناقشة الدور الذي يمكن أن يلعبه في تحقيق أمن الطاقة.

ركزت الدراسة على كل من المخاطر الجيوسياسية والتجارية والسوقية، حيث أظهرت الدراسة أن المخاطر الجيوسياسية تمثلت في تحول السلطة، وإنشاء مراكز تكنولوجية جديدة، مع ظهور أشكال جديدة من المنافسة في أسواق الطاقة.

أما عن المخاطر التجارية والسوقية فقد تمثلت في الارتفاع النسبي لحجم التكاليف المرتبطة بتقنيات الهيدروجين الأخضر، والحاجة إلى إنشاء جغرافيا تجارية جديدة في استيراد تصدير الهيدروجين الأخضر، فضلا عن وضع إطار مؤسسي وتنظيمي مناسب لتجارة الهيدروجين.

وقد توصلت الدراسة إلى أنه على الرغم من أهمية الدور الذي يمكن أن يلعبه الهيدروجين الأخضر في توفير وقود نظيف مستدام بيئيا يعمل على تعزيز أمن الطاقة، إلا أن سوق الهيدروجين ومشتقاته بصفة عامة لا يزال في طور التكوين، وسيتوقف تطوره المستقبلي على مجموعة من التدابير التي تتخذها البلدان والمناطق.

أخيرا قامت دراسة (Osman M. et al 2022) بتقييم الجدوى الاقتصادية لإنتاج الهيدروجين الأخضر من خلال التحليل الكهربائي للماء باستخدام كل من طاقة الرياح والطاقة الحرارية الأرضية، توصلت الدراسة إلى أن تكلفة

انتاج وحدة واحدة من الكهرباء المولدة باستخدام توربينات الرياح تساوي نحو (0.042) دولار/ كيلووات في الساعة. بينما تمثل نحو (0.086) دولار/ كيلووات في الساعة إذا تم الإنتاج باستخدام الطاقة الحرارية الأرضية الجوفية.

كما أظهرت الدراسة أن تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر من خلال استخدام المحلل الكهربائي بطاقة الرياح تتراوح ما بين (0.672) إلى (1.063) دولار/ كجم من الهيدروجين. بينما تتراوح تكلفة إنتاج الهيدروجين باستخدام المحلل الكهربائي ذي درجات الحرارة المرتفعة والذي يعمل بالطاقة الحرارية الأرضية الجوفية ما بين (3.31) إلى (4.78) دولار/ كجم من الهيدروجين، مما يؤكد انخفاض تكلفة إنتاج الكهرباء والهيدروجين الأخضر باستخدام طاقة الرياح مقارنة بإنتاجه من خلال الطاقة الحرارية الأرضية.

بالإضافة إلى أنها أدت إلى انخفاض كمية الانبعاثات الكربونية من نحو (2184.8) طن / عام، باستخدام الطاقة الحرارية الأرضية الجوفية إلى نحو (2061.6) طن / عام.

لذا أوصت الدراسة بضرورة استخدام طاقة الرياح المتجددة في عملية الإنتاج، خاصة وأنها قد أثبتت جدواها الاقتصادية من حيث كمية الانبعاثات الكربونية وحجم التكاليف التي يمكن أن تتحملها المنطقة في إنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام المحلل الكهربائي، حيث أنها أدت إلى انخفاض كمية الانبعاثات الكربونية من نحو (2184.8) طن / عام، باستخدام الطاقة الحرارية الأرضية الجوفية إلى نحو (2061.6) طن / عام باستخدام المحلل الكهربائي.

المنطلقات النظرية للدراسة:

ينقسم البحث إلى أربعة أقسام تتناول على الترتيب: الهيدروجين (مفهومه – أنواعه – أهم استخداماته)، اقتصاديات الهيدروجين وأمن الطاقة، اقتصاديات الهيدروجين الأخضر والنقل المستدام، النتائج والتوصيات.

● الهيدروجين (مفهومه – أنواعه – أهم استخداماته):

يعرف الهيدروجين بصفة عامة بأنه أبسط وأخف عنصر كيميائي موجود في الكون، يوجد بشكل طبيعي على شكل ذرتين من الهيدروجين (H_2) ومن أهم خصائصه أنه غير سام، عديم اللون والطعم والرائحة، وعلى الرغم من كونه غاز عديم اللون إلا أنه قد تم تخصيص رموز لونية للهيدروجين تختلف كل منها عن الأخرى باختلاف مصادر الطاقة وعمليات الإنتاج والمواد الأولية المستخدمة لإنتاجه، وكذلك الأثر البيئي الذي ينتج عنه والمسؤول في الوقت ذاته عن اللون الذي يتمتع به كما هو موضح أدناه حيث أن الأرقام تمثل ما يلي:

1- طريقة الإنتاج 2- مصدر الطاقة 3- الأثر السليبي:-

■ البني:-

1. يستخرج عبر تحويل الفحم إلى غاز
2. الطاقة الحرارية
3. الأكثر تلوثاً (25 كجم من ثاني أكسيد الكربون)

■ الرمادي:-

1. يستخرج من الغاز الطبيعي عبر فصل الهيدروجين عن الكربون
2. الطاقة الحرارية
3. 11 كجم من ثاني أكسيد الكربون

■ الأخضر:-

1. ينتج بالتحليل الكهربائي للماء إلى هيدروجين وأكسجين
2. الطاقة المتجددة
3. صديق للبيئة (صفر كربون)

■ الوردي:-

1. النفايات النووية المنتجة بالتحليل الكهربائي للماء
2. الطاقة النووية
3. النفايات النووية (تأثير قوي على البيئة)

■ التركوازي أو الفيروزي

1. يستخرج عبر تفكيك الغاز الطبيعي إلى هيدروجين وكربون وصلب
2. الطاقة الحرارية

3. طريقة منخفضة الانبعاثات حيث يطلق الكربون الصلب كمادة ثانوية

■ الأزرق:-

1. يعتمد على الوقود الأحفوري (الفحم أو الغاز الطبيعي)

2. الطاقة الحرارية

3. قليل الانبعاثات (3 إلى 6 كجم من ثاني أكسيد الكربون)

فمنها على سبيل المثال: الهيدروجين الرمادي، والهيدروجين الأزرق واللذان ينتجان من مصادر الطاقة الأولية (فحم وغاز طبيعي)، حيث تتمثل الطرق الرئيسية لإنتاج الأول في إعادة تشكيل غاز الميثان بالبخار، وتغويز الفحم (تحويل الكربون المتواجد في الفحم إلى مركبات غازية قابلة للاشتعال)، أما الثاني فيضاف إلى العملية السابقة انبعاثات الكربون التي يتم عزلها وتخزينها، لذا يتمثل الأثر البيئي لإنتاج ما يعادل 11 كجم من ثاني أكسيد الكربون، أما الثاني فينتج من 3 إلى 6 كجم من ثاني أكسيد الكربون، ولكنه يقلل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنسبة تصل إلى 90%.

أما الهيدروجين الأخضر فيتم استخدام الكهرباء المولدة من مصادر الطاقة المتجددة لإنتاجه (الطاقة المائية وطاقة الرياح). وعليه فلا ينتج عنه أي انبعاثات كربونية ضارة (صفر كربون) حيث تنتج توربينات طاقة الرياح البحرية كهرباء خضراء، يتم استخدامها في عملية تسمى التحليل الكهربائي الذي يفصل الهيدروجين عن الأكسجين ليتم تخزينه في خزانات آمنة قبل نقلها للقطاعات الاقتصادية المختلفة.

بناء عليه، يعرف الهيدروجين الأخضر بأنه "الهيدروجين المنتج من مصادر الطاقة المتجددة والتحليل الكهربائي للماء". والذي يطلق عليه غالبا "الهيدروجين النظيف" أو "الهيدروجين المتجدد".

● الوضع الحالي والتوقعات المستقبلية لإنتاج الهيدروجين الأخضر:

بلغ إجمالي الإنتاج العالمي من الهيدروجين المشتق من استخدام الوقود الأحفوري نحو 94 مليون طن خلال عام 2021، مصاحبا لانبعاثات كربونية تزيد عن 900 مليون طن خلال نفس العام، في حين بلغ إنتاج الهيدروجين منخفض الانبعاثات (الهيدروجين الأزرق) أقل من 1 مليون طن (0.7%) خلال نفس العام، بالإضافة إلى نحو 35 كيلو طن فقط من الهيدروجين الأخضر، إلا أنه ونظرا لارتفاع عدد المشروعات المعلنة التي تستهدف إنتاج كل من الهيدروجين الأزرق والأخضر خلال الأعوام القليلة القادمة، يتوقع أن يصل الإنتاج السنوي أكثر من 24 مليون طن بحلول عام 2030، حيث أن ارتفاع السعة المركبة للمحطات الكهربائية المستخدمة في إنتاج الهيدروجين الأخضر والتي وصلت إلى 510 ميجاوات بنهاية عام 2021 وبزيادة قدرت نحو 210 ميجاوات خلال عام 2020 ستزيد من إنتاج الهيدروجين الأخضر خلال الأعوام القليلة القادمة، مع العلم أن شركة (Green Hydrogen International) تعتبر من أوائل الشركات الرائدة في إنتاجه بنحو 5000 كيلو طن. تليها شركة (Fortescue Future Industries) بكمية إنتاج قدرت بنحو 2971 كيلو طن خلال نفس الفترة.

مع العلم أن أقل نسبة إنتاج كانت من نصيب (InterContinental Energy) بإجمالي إنتاج قدر بنحو 2189 كيلو طن خلال نفس الفترة .

هذا وتعتبر كل من أوروبا وأستراليا من أوائل الدول المرشحين في تنفيذ مشاريع إنتاج الهيدروجين الأخضر مستغلان مواردهما المتجددة في تحقيق ذلك، حيث أنه من المتوقع أن يصل إنتاجه في أستراليا وحدها نحو 3 مليون طن بحلول عام 2030، حيث تعتبر أنها الدولة الأكبر على مستوى العالم من حيث عدد المنشآت التي تقوم بإنتاج الهيدروجين الأخضر وذلك اعتباراً من عام 2022 حيث بلغت عدد منشآتها نحو 96، حيث يتم توليد 15.7 تيراوات / ساعة من الهيدروجين الأخضر بواسطة محطات الطاقة الشمسية الكهروضوئية صغيرة الحجم، ونحو 8.1 تيراوات / ساعة من الهيدروجين الأخضر بواسطة محطات الطاقة الشمسية الكهروضوئية كبيرة الحجم. هذا ومن المتوقع أن تشهد أستراليا انخفاض في حجم التكاليف الثابتة بحلول عام 2050 بسبب وفرة مواردها من الطاقة المتجددة (الطاقة الشمسية – طاقة الرياح).

كما أنه من المتوقع إنتاج كميات كبيرة من الهيدروجين الأخضر في كل من أمريكا اللاتينية، وكل من إفريقيا والشرق الأوسط، حيث يتوقع أن يصل الإنتاج لأكثر من 4 مليون طن بحلول عام 2030 والتي ستكون غالباً لتصدير الهيدروجين أو الأمونيا إلى أوروبا وآسيا.

● أبرز استخداماته الحالية وأهم تطبيقاته المستقبلية:

إذا كان المستهدف هو إزالة الكربون تماماً من الاقتصاد، فإن جزيء الهيدروجين سيلعب دوراً مهماً في تحقيق ذلك، ولا سيما في القطاعات التي يصعب تخفيف انبعاثاتها الكربونية كالقطاعات كثيفة الاستخدام للطاقة (الصناعة والنقل)، حيث أنه جزيء متعدد الاستخدامات، متفاعل، قابل للتخزين، قابل للنقل، نظيف الحرق، يمكن إنتاجه بانبعاثات منخفضة (الهيدروجين الأزرق) أو معدومة (الهيدروجين الأخضر).

كما يؤدي انتشار تقنيات الهيدروجين الأخضر في القطاعات الاقتصادية المختلفة إنشاء العديد من الوظائف الخضراء، وتقليل كثافة الكربون بها، فعلى سبيل المثال تشير بعض الدراسات أن هذه التقنيات ستقلل ما يصل إلى نحو ربع انبعاثات غازات الاحتباس الحراري العالمية التي تنتجها الصناعات التي تعتمد على الوقود الأحفوري التقليدي وذلك بحلول عام 2030.

هذا وتعد تقنية خلايا الوقود (Fuel Cells) من أبرز التطبيقات الحالية للهيدروجين، تم اختراعها بإنجلترا في منتصف القرن التاسع عشر الميلادي على يد السير ويليام روبرت جروف (William Robert Grove) عام 1839، وهي عبارة عن أداة تعمل على تحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية باستخدام كلا من الهيدروجين والأكسجين دون أن ينتج عنها أي عملية احتراق.

مع العلم أن هذا الاختراع ظل حبيس الأدراج مدة زمنية ليست بالقصيرة (130 عاماً) نظراً لعدم جدوى استخدامه خلال تلك الفترة، إلا أنه وخلال منتصف القرن العشرين تم استخدامها في التطبيقات الفضائية كوقود لمحركاتها،

وتأمين الطاقة الرئيسية للأبنية والمصانع (الطاقة الكهربائية)، وتغذية الهواتف النقالة، والحواسيب المحمولة وصناعة السيارات وغيرها.

كذلك يستخدم كمادة خام في بعض الصناعات، حيث ينتج ويستهلك أكثر من 55 مليون طن من الهيدروجين سنوياً في مجموعة واسعة من العمليات الصناعية، مثل صناعة السماد والمواد الكيميائية والتكرير، أو لتوفير الحرارة في الصناعات كثيفة استهلاك الطاقة، مثل صناعة الصلب، الألمونيا.

أما عن التطبيقات المستقبلية، فتشير إلى أن مساهمة الهيدروجين في إنتاج صناعة الحديد والصلب ستمثل نحو 40% من إجمالي الطلب على الهيدروجين الصناعي بحلول عام 2050، حيث يعمل كبديل للفحم والغاز الطبيعي كعامل اختزال ومصدر للطاقة.

هذا بالإضافة إلى أنه سيساهم في إنتاج الصناعات الثقيلة كالمواد الكيميائية وإنتاج الأسمدة من 5% إلى 10% من إجمالي الطلب على الطاقة النهائية المستخدمة في تلك الصناعة بحلول نفس العام.

أما عن استخدامه في قطاع النقل فسيتركز بشكل كبير في إنتاج الوقود المشتق من الهيدروجين المستخدم لإزالة الكربون في عمليات النقل البحري لمسافات ليست بالقصيرة، وذلك في صورة أمونيا، وميثانول، وديزل صناعي من 30% إلى 55% من إجمالي الطلب النهائي للطاقة في القطاع البحري بحلول عام 2050.

أما في مجال النقل الجوي فسيمثل الوقود المشتق من الهيدروجين في صورة وقود نفاث صناعي ما بين 10% إلى 30% من إجمالي الطلب النهائي للطاقة في النقل الجوي، أما النقل البري لمسافات طويلة فسيمثل الهيدروجين منخفض الكربون والوقود المشتق منه ما بين 10% إلى 20% من إجمالي الطلب النهائي للطاقة في النقل البري بحلول نفس العام.

الجدير بالذكر، أنه على الرغم من أن حجم التكاليف اللازمة لإنتاج الهيدروجين الأزرق تتمتع بالانخفاض عن تلك اللازمة لإنتاج الهيدروجين الأخضر في الوقت الحالي، إذ أن التحليل الكهربائي للماء يمثل حالياً أقل من 0.1% من إنتاج الهيدروجين العالمي، إلا أنه ونظراً لعدة عوامل من بينها ارتفاع أسعار الغاز الطبيعي في كل من أوروبا وآسيا ومجموعة القوانين والمبادرات السياسية التي اتخذتها بعض الدول الكبرى، كقانون خفض التضخم في الولايات المتحدة الأمريكية وما يتضمنه من حوافز وإعانات جيدة تعمل على تشجيع الاستثمار في مصادر الطاقة المتجددة، كذلك المبادرات الأوروبية المماثلة الأخرى، والتي تستهدف زيادة الطلب على المعادن الضرورية المعروفة بأنها تشكل العناصر الأساسية للطاقة المتجددة، كتوربينات الرياح، والمركبات الكهربائية، والالواح الشمسية، وذلك في ظل توقعات الوكالة الدولية للطاقة من أن الاقتصاد العالمي سينتقل من نظام كثيف الاستهلاك للوقود إلى نظام كثيف الاستهلاك للمعادن، ستؤدي جميعها إلى انخفاض هذه التكلفة في المستقبل القريب لبعض المناطق والبلدان، بشرط تطور حجم الكفاءة التكنولوجية التي تعمل على انخفاض تكلفة الطاقة المتجددة، ولا سيما تكنولوجيا المحلل الكهربائي اللازمة لإنتاج الهيدروجين الأخضر.

بناءً عليه، ووفقاً لما سبق، سيصبح الهيدروجين الأخضر أحد أكثر الخيارات الأقل تكلفة آنذاك، فسيمثل نحو 60% من الهيدروجين منخفض الكربون بحلول عام 2030، مع العلم أنه ستزداد هذه النسبة إلى نحو 65% بحلول عام 2050، وساكون النسبة المتبقية 35% من نصيب الهيدروجين الأزرق الذي يعمل كمكمل مهم للهيدروجين الأخضر والتي سيتم توفيره من خلال مصادر انتاجه.

وفي هذا السياق، يمكن القول أن الهيدروجين الأخضر هو الهيدروجين المستدام الوحيد الذي يتوقع أن يكون قادراً على المنافسة خلال الأعوام القليلة القادمة.

فوفقاً لبيانات وكالة الطاقة الدولية لعام 2022 أنه بحلول عام 2030 ستصل سعة الهيدروجين منخفضة الكربون في القطاعات الاقتصادية المختلفة ما بين 16 إلى 24 مليون طن سنوياً، مقسمة ما بين هيدروجين أخضر بما يمثل ما بين 9 إلى 14 مليون طن، وهيدروجين أزرق ما بين 7 إلى 10 مليون طن بشرط أن يتم تنفيذ كافة مشاريعه المتفق عليها حالياً.

تأسيساً على ما سبق، سيحدد كل من القدرة التنافسية لتكاليف الإنتاج وتطور البنية التحتية التمكينية لانتشار تكنولوجيا انتاج مصادر الهيدروجين الأخضر على نطاق واسع في المستقبل القريب، معدل النمو العالمي للهيدروجين الأخضر، فوفقاً لدراسة مجلس الهيدروجين لعام 2017، إذا كانت تكاليف الهيدروجين الأخضر أكثر ارتفاعاً من مرة إلى ثلاث مرات من الهيدروجين المنتج من الوقود الأحفوري في وقتنا الحالي، فبفضل الابتكار التكنولوجي، واقتصاديات الحجم، وسياسات تسعير الكربون، من المتوقع أن تنخفض هذه التكاليف و سيزداد الطلب على الهيدروجين الأخضر بنحو 14% من إجمالي الطلب العالمي المتوقع على الطاقة بحلول عام 2050، فضلاً عن خلق سعة تقاسم 2.5 تريليون دولار لمعدان الهيدروجين، وخلايا الوقود، وتوفير فرص عمل مستدامة لأكثر من 30 مليون شخص بحدود نفس العام.

● الهيدروجين الأخضر وأمن الطاقة:

يعد أمن الطاقة والقدرة على تحمل تكاليفها أحد أهم الأبعاد الأمنية التي تقع ضمن أهداف السياسة الخارجية لأي دولة.

حيث تتمثل الأهداق الرئيسية للعديد من سياسات الطاقة القومية في دولة ما، في ضمان حصول اقتصاد هذه الدولة على إمدادات طاقة كافية، موثوقة، وميسورة التكلفة، وذلك وفقاً لمجموعة الشروط والأحكام التي تدعم النمو الاقتصادي والازدهار لتلك الدولة.

وعلى الرغم من ذلك، ونظراً لطبيعة اسواق الطاقة العالمية، فإن الأحداث التي تؤثر على أمن الطاقة في دولة ما غالباً ما تؤثر على أمنها في دولة أخرى، لذا يعد الاهتمام بتحقيق أمن الطاقة من خلال الانتقال إلى نظام طاقة مرن، ومستقر أمراً ضرورياً لتحقيق النمو الاقتصادي المستدام.

خاصة مع تزايد حالات التنافس على مصادر الطاقة من جانب، وسياسات الدول المنتجة للطاقة من جانب آخر.

بناء عليه، يعد المفهوم الذي طرحه (ونستون تشرشل) رئيس وزراء بريطانيا، لأمن الطاقة، أحد أهم المفاهيم التي توضح أن أزمات الطاقة المتكررة ترتبط ارتباطا وثيقا بنقص الإمدادات.

الأمر الذي يؤكد على أن تحقيق أمن العرض من شأنه تحقيق أمن الطاقة، الذي يركز على تجنب الأزمات، حيث أشار إلى أنه "يمكن بالتنوع والتنوع فقط"، مركزا بذلك على جانب تنوع مصادر الطاقة من أجل تنوع أمن العرض الذي يتحقق من خلال توفير موارد للطاقة بصورة كافية وأمنة وبأسعار في متناول الجميع.

ولعل ما دعم هذا المفهوم (أمن العرض أساس لأمن الطاقة) تلك الأزمات التي شهدتها العالم خلال القرن الماضي كأزمات النفط في السبعينيات وأواخر الثمانينيات والتسعينيات.

مع العلم أن الإهتمام الأكاديمي بأمن الطاقة كان قد انخفض بعد هذه الفترة، حيث استقرار أسعار النفط، وتراجع التهديد بالحظر السياسي ليعود ويظهر من جديد في العقد الأول من القرن الحالي، مدفوعا بعدة عوامل من بينها الضغط المتزايد لإزالة الكربون من أنظمة الطاقة العالمية.

ومما تجدر الإشارة إليه، أنه قد تطور مفهوم أمن الطاقة وأصبح يختلف من دولة إلى أخرى، ويتحدد حسب موقع الدولة منتجة كانت أم مستهلكة، فهناك مفاهيم تعتمد على نطاق مصالح الدولة، حيث يتم تفسير مفهوم أمن الطاقة في هذه الحالة من قبل مجموعات الدول المختلفة بناء على مصالحها.

فعلى سبيل المثال: تهتم الدول المنتجة (المصدرة) للطاقة بأمن الطلب على مصادر الطاقة لديها، مع دعم كفاءة قطاع النفط والغاز في قطاعاتها الاقتصادية المختلفة، بغرض استخدام عوائدها المادية المرتفعة لبناء اقتصاد حديث، بينما تهتم الدول المستهلكة (المستوردة) للطاقة بخطر تعرقل الإمدادات، وتنوع مصادر العرض، والوصول الأمن إلى مصادر الطاقة طويلة الأجل وبأسعار منخفضة.

كما أن هناك مفاهيم تعتمد على أهداف أمن الطاقة، وهي تلك المفاهيم التي تهتم بكل من الأهداف الاقتصادية والاجتماعية والبيئية، حيث التركيز على حماية الدولة والأفراد من حالات نقص الطاقة (العجز) وانقطاع التيار الكهربائي، وتوفير موارد طاقة عالية الجودة.

فضلا عن كونه يمثل قدرة نظام الطاقة لدولة ما على تحمل التهديدات الداخلية والخارجية (السياسية، الاقتصادية) والتي قد تكون بسبب عوامل بشرية أو طبيعية، من خلال العمل على نمو موارد الطاقة المتددة المحلية، وتحسين كفاءتها، مع تقليل الاعتماد على استيراد النفط الأجنبي.

الأمر الذي يؤكد على أن مفهوم أمن الطاقة قد تطور ليشتمل على الجوانب الجيوسياسية (البيئة الجغرافية – السياسية) والاقتصادية والتكنولوجية، والتي تفترض افتراضا ضمنيا، وهو أن الوصول إلى الطاقة المطلوبة يجب أن يكون منيعا للاضطرابات، وأن الإمدادات البديلة يجب أن تكون متاحة بسهولة وبأسعار معقولة، وكافية فيما يتعلق بكل من الحجم المتاح والوقت المطلوب للتوزيع.

بالإضافة إلى البنية التحتية المؤهلة، ومن ثم، فإنه يمكن القول أن أمن الطاقة يعد من بين أهم ابعاد أي دولة لتحقيق أمنها القومي المستدام.

وبالنظر إلى أهمية هذا البعد الأمني وتزايد الإهتمام به من قبل الدول سواء كانت منتجة أم مستهلكة فقد انعكس هذا الاهتمام على المنظمات الدولية وأهمها وكالة الطاقة الدولية الذي عرفته بأنه "التوافر المستمر لمصادر الطاقة بأسعار في متناول الجميع".

وكذلك البنك الدولي الذي وضع أن أمن الطاقة يعني "ضمان إنتاج الدول للطاقة واستخدامها في ضوء توافرها بتكلفة معقولة من أجل تحقيق هدفين أولهما: تسهيل النمو الاقتصادي الذي يقود إلى خفض مستويات الفقر، وثانيهما: هو التحقيق المباشر في مستويات معيشة المواطنين للوصول إلى خدمات الطاقة الحديثة".

إلى جانب ما تقدم، ترى العديد من الأدبيات الحديثة أن نظام الطاقة يجب أن ينظر إليه في سياق النظام الاقتصادي بأكمله، فلم توجد الطاقة من أجل دعم الاقتصاد في تصنيع المنتجات وتقديم الخدمات فحسب، بل وجدت من أجل أن تكون بمثابة محرك لعمليات اقتصادية أوسع، ولا سيما في ظل التحديات التي يواجهها العالم المعاصر، كتحديات إعادة التكيف الاقتصادي أو العزلة الجغرافية، حيث يعرف النمو الاقتصادي القائم على الطاقة بأنه "تلك العملية التي يقوم من خلالها صانعي السياسات ومنظمي الطاقة والسلطات العامة ذات الصلة بتنويع موارد الطاقة وزيادة كفاءتها بطريقة تعمل على تلبية احتياجات التنمية الاقتصادية والاجتماعية".

ولعل ما يعزز الاهتمام بتقنيات الطاقة المتجددة هو أن الآثار الاقتصادية الإيجابية لتطبيق هذه التقنيات تفوق الآثار السلبية لها كما هو موضح أدناه حيث يساهم النمو الاقتصادي القائم على تقنيات الطاقة المتجددة (الخضراء) في تحسين عمليات تجارية قائمة وإنشاء أخرى جديدة، من خلال التركيز على عمليات تحسين الابتكار التكنولوجي، التي تشجع على التطور التدريجي للتغيرات التقنية في هياكل السوق الجديدة، مما يؤدي إلى تعزيز فرص العمل الجديدة والمؤهلة لمواكبة هذا التطور، مدفوعا بزيادة كفاءة الطاقة وتنويع مواردها، وتحقيق الاكتفاء الذاتي منها، ومن ثم تحسين الصناعة وزيادة الإنتاجية والكفاءة الفنية والاقتصادية ومن ثم خفض التكاليف وتحقيق النمو الاقتصادي والتنمية.

● الآثار الاقتصادية الإيجابية والسلبية المرافقة لتقنيات الطاقة المتجددة:

■ الآثار الاقتصادية الإيجابية:-

- النمو الاقتصادي والتنمية.
- النمو الأخضر المستدام.
- تعزيز فرص العمل وفرص العمل الجديدة.
- تنشيط الاقتصادات المحلية.
- تحسين الابتكارات والتطوير التقني.

- تخفيض الواردات.
- تحسين الميزان التجاري.
- توسيع قدرة كهربية الريف.
- انتاج الطاقة.
- تطوير الصناعة التحويلية والصناعات الأخرى ذات الصلة.
- تحسين الانتاجية.
- الآثار الاقتصادية السلبية:-
- ضمان حوافز مالية ضخمة
- سعر مرتفع نسبيا لإنتاج الطاقة
- ارتفاع أسعار المواد الغذائية (بسبب الوقود الحيوي)
- موثوقية الإمدادات.

بناء على مجموعة الفوائد السابق ذكرها، ووفقا لتقرير وكالة الطاقة الدولية لعام 2023، من المتوقع أن يرتفع حجم الاستثمار السنوي في الطاقة النظيفة بنسبة 24% بين عامي 2021 و 2023، مدفوعا بمصادر الطاقة المتجددة والسيارات الكهربائية، مقارنة بزيادة قدرها 15% في حجم الاستثمار الموجه لإنتاج الوقود الأحفوري خلال نفس الفترة المذكورة.

مع العلم أن أكثر من 90% من هذه الزيادة تنشأ من الاقتصادات المتقدمة والصين، مما يمثل خطرا جديدا يتمثل في ظهور خطوط فاصلة جديدة في الطاقة العالمية، إذا لم تنتقل التحولات في مجال الطاقة النظيفة في أي مكان آخر على مستوى العالم، كما هو موضح بالجدول أدناه، حيث أن الجدول يوضح حجم الاستثمار في الطاقة النظيفة والوقود الأحفوري في الفترة من (2015 إلى 2023) على مستوى العالم:

السنوات	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
الاستثمار في الطاقة النظيفة	1074	1132	1129	1137	1225	1259	1408	1617	1740
الاستثمار في الوقود الأحفوري	1319	1105	1114	1109	1066	839	914	1002	1050

Source: IEA. International Energy Agency (2023), World Energy Investment 2023, p. 10.

هذا وعلى الرغم من مجموعة الفوائد المتعددة لتطبيقات تقنيات الطاقة المتجددة السابق الإشارة إليها، إلا أنه يوجد العديد من القيود التي ينبغي تسليط الضوء عليها، كموثوقية الطاقة المتجددة، والتي تمثل أحد القيود الرئيسية للاستخدام اليومي لهذه التقنيات وذلك بسبب خصائصها الطبيعية المتغيرة، فمن المعروف أن مصادر الطاقة المتجددة تعتمد كلياً على الانتشار الجغرافي، والظروف الجوية، وعليه فإن التقلبات المناخية وعدم القدرة على التنبؤ بهذه المصادر يمثل قيداً كبيراً في إنتاج الطاقة منها.

هذا بالإضافة إلى ارتفاع تكاليف البحث والتطوير المتعلقة بتطبيقها، فضلاً عن إشكالية نقص الغذاء وارتفاع أسعاره والمرتبطة بزيادة الطلب على استخدام بعض المحاصيل الزراعية الأساسية في إنتاج الوقود الحيوي كمورد من موارد الطاقة المتجددة.

من خلال ما تقدم، وبناء على ما تم ذكره، فقد أكدت الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA) خلال عام 2019، أن الهيدروجين الأخضر يتمتع بالقدرة على تعزيز أمن الطاقة، ونأمين مصادرها بمعدلات كافية من أجل تلبية الطلب المستقبلي على الطاقة، وذلك من خلال زيادة إمدادات الطاقة المحلية، وإمكانيات التخزين لفترة طويلة الأجل، ولا سيما خلال الأوقات التي تتعرض لها الدول للأزمات المرتبطة بنقص الإمدادات، نظراً لتوافر موارد الطاقة المتجددة في جميع أنحاء العالم، وذلك على عكس احتياطات النفط التي تتركز في مجموعة دول بعينها، حيث يتركز أكثر من 60% من احتياطات النفط في خمس دول فقط.

فضلاً عن أن مصادر الطاقة المتجددة التي يتم استخدامها في إنتاج الهيدروجين الأخضر يمكن أن تدمج بسهولة في أنظمة الطاقة، الأمر الذي سيساهم في حل مشكلات انقطاع الكهرباء وتخزينها.

المنهجية وطرق البحث:

بالرغم من أن الهيدروجين هو أصغر جزيء في الكون، فإنه يتمتع بإمكانات هائلة بوصفه وقودا نظيفا يمكن استخدامه في إحداث تحول الطاقة العالمي. فهو غاز قابل للحرق داخل المحركات، كما يمكن استخدامه في خلية وقود لتشغيل المركبات، أو إنتاج الكهرباء، أو توليد الحرارة. ويمكن أن يكون مادة خام أولية ووحدة أساسية في المنتجات الكيميائية الأخرى، مثل الأمونيا (وهي مدخل رئيسي في الأسمدة) والميثانول (الذي يستخدم في إنتاج البلاستيك). كذلك فإن الهيدروجين ومشتقاته يمكن تخزينهما إلى ما لا نهاية في صهاريج وقباب ملحية، وهو ما يعني أنهما ربما يكونان من الحلول المهمة لتخزين الطاقة على المدى الطويل .

ومن الأمور المهمة أن الهيدروجين يمكن أن يحل محل الوقود الأحفوري في جميع هذه الأغراض دون أن يتسبب في انبعاث ثاني أكسيد الكربون؛ فهو ناقل للطاقة خال من الكربون، مثل الكهرباء، لكنه يتفوق عليها فيما يتعلق بإزالة الكربون عن القطاعات التي يصعب إمدادها بالكهرباء، كالصناعات الثقيلة، أو النقل لمسافات طويلة، أو التخزين الموسمي. وتتوقع معظم سيناريوهات إزالة الكربون أن يكون للهيدروجين دور مهم في تحقيق الانبعاثات الصفية الصافية بحلول منتصف القرن. فالوكالة الدولية للطاقة والوكالة الدولية للطاقة المتجددة، على سبيل المثال، تتوقعان أن يلبى الهيدروجين من 12% إلى 13% من الطلب النهائي على الطاقة بحلول 2050، صعودا من صفر تقريبا في الوقت الحالي .

والهيدروجين صناعة كبرى بالفعل، إلا أن سوق الهيدروجين تتسم في الوقت الراهن بثلاث خصائص توشك أن تشهد تحولا جذريا: أن الهيدروجين لا يزال يُصنع في معظمه من الوقود الأحفوري غير المعالج لخفض الانبعاثات، وأن استخدامه يكاد يكون محصورا في كونه مادة خاما في العديد من الصناعات، وأنه غالبا ما يُنتج ويُستخدم في الموقع نفسه. ويجب إجراء تجديد شامل لكل من هذه الخطوات في سلسلة القيمة لكي يحقق الهيدروجين إمكاناته الكاملة باعتباره القطعة المفقودة في لغز الطاقة النظيفة. ويجب أن يتحول إنتاجه إلى استخدام مصادر أنظف وأن يتوسع استهلاكه إلى قطاعات جديدة – إذ من الممكن أن يصبح الهيدروجين ومشتقاته سلع طاقة متداولة على المستوى الدولي .

أدوات الدراسة:

غير أن مسار نمو الهيدروجين النظيف يظل مثار جدل. فقد ظهر على السطح خلافان أساسيان: كيف يتم إنتاج الهيدروجين، وفي أي القطاعات يمكن استخدامه.

فيما يتعلق بالإنتاج، يتمثل المساران الرئيسيان نحو الهيدروجين النظيف في الهيدروجين "الأخضر" المنتج من الكهرباء المولدة من مصادر متجددة، والهيدروجين "الأزرق" المنتج من الغاز الطبيعي المجهز بتكنولوجيات احتجاز الكربون. وفي فترة ما، كان الهيدروجين الأخضر ضعفي أو ثلاثة أضعاف سعر الهيدروجين الأزرق، وكان ذلك قبل أزمة أسعار الغاز الحالية. علاوة على ذلك، يحقق الهيدروجين الأخضر خفض الأكبر في التكلفة. ويتنبأ عدد متزايد من التوقعات حاليا بأن يصبح الهيدروجين الأخضر أقل سعرا من كل من الهيدروجين الأزرق والرمادي (المنتج من الوقود الأحفوري غير المعالج لخفض الانبعاثات) قبل نهاية العقد.

ويثير كلا المسارين جدلا شديدا؛ فإنتاج الهيدروجين الأخضر من شأنه حرمان الاستخدامات النهائية الأخرى من الكهرباء المولدة من مصادر متجددة، وهو ما يثير الجدل بشأن ما إذا كان ينبغي تطبيق معيار "الإضافية" - أي عدم اعتبار أن الهيدروجين أخضر إلا إذا تم إنتاجه من الطاقة المتجددة التي لا يتم إنتاجها أو استخدامها لأغراض أخرى. ويمكن أن يؤدي إنتاج الهيدروجين الأخضر أيضا إلى تفاقم الضغوط المائية في بعض المناطق. وفي النهاية، عادة ما تكون الأماكن الأكثر تعرضا لأشعة الشمس هي أيضا الأكثر جفافا. والهيدروجين الأزرق، من جانبه، يثير المخاوف بشأن احتمالات تسرب الميثان، وعدم كفاية احتجاز ثاني أكسيد الكربون، وتقييد البنية التحتية للغاز الأحفوري. أما مسارات الإنتاج الأخرى، كالتي تعتمد على مصادر نووية أو على الكتلة الحيوية، فهي مثيرة للجدل بنفس القدر.

ومن حيث الاستهلاك، يحتدم جدل مماثل. فاستخدام فالهيدروجين في تحقيق تحول الطاقة يُشَبَّه أحيانا باستخدام المطواة متعددة الأغراض من نوع "swiss army knife" التي تستطيع استخدامها في كل شيء تقريبا، رغم أنها قد لا تكون دائما أفضل أداة لإنجاز المهمة المطلوبة. وغالبا ما يكون استخدام الهيدروجين مسارا أقل كفاءة في استهلاك الطاقة مقارنة بالتحول إلى استخدام الطاقة الكهربائية المباشرة. فعلى سبيل المثال، كي تقود نفس المسافة بسيارة تعمل بالهيدروجين، فإنك تحتاج إلى مزارع رياح بحجم يفوق من مرتين إلى ثلاث مرات ما تحتاجه لقيادة سيارة كهربائية (Transport & Environment 2020) غير أن هناك قطاعات معينة يصعب تخفيف انبعاثاتها، مثل الصلب والشحن والطيران، ستحتاج إلى الهيدروجين أو مشتقاته - وهو أمر ليس محل جدل؛ فهي قطاعات لا تملك خيارا آخر. غير أن الاستخدام العشوائي للهيدروجين يمكن أن يبطل من تحول الطاقة.

حدود الدراسة :

تم اقتراح مصطلح اقتصاد الهيدروجين لأول مرة في عام 1970 من قبل جون بوكريس خلال محاضرة قد ألقاها في المركز الفني لجنرال موتورز، لكنه لم يبدأ في اكتساب الزخم حتى أوائل عام 2010، مما تسبب في تشكيل مجلس الهيدروجين عام 2017، حيث التزمت شركات السيارات والطاقة اليابانية والصينية بتصميم وبناء مركبات الهيدروجين ومحطات الهيدروجين.

بناء عليه يمكن تعريف اقتصاد الهيدروجين بأنه "ذلك الاقتصاد الذي يكون فيه الهيدروجين هو الناقل الأساسي للطاقة جنباً إلى جنب مع الكهرباء".

- 1) Atilhan S. et al, (2021), "Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry", *Curr. Opin.Chem. Eng*, 31, 100668
- 2) Alstom (2020), "Alstom to supply Italy's first hydrogen trains" Press Release. <http://www.alstom.com/>
- 3) Air Transportation Action Group (2021), "Facts and Figures" <https://www.atag.org/>
- 4) Altork L. N. & Busby J. R. (2010 Oct), "Hydrogen fuel cells: part of the solution", *Technology & Engineering Teacher*, 70 (2), pp. 22-27.
- 5) Bp Energy Outlook: 2023 edition, p. 71.
- 6) Ballard Power Systems: Hydrogen Facts (2022), P.4. <https://www.ballard.com/>
- 7) Babita S., Quin P. (2016), Energy Security: Today and Tomorrow, *Humanities & Social Sciences Reviews*, Vol 4, No 3, p. 59-67.
- 8) Blasio N. (2021), "The Role of Clean Hydrogen for a Sustainable Mobility", Environment and Natural Resources Program, the Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard University, Harvard Kennedy School, pp. 1-26.
- 9) Carlson E., & Lukaszewska H. (2022), "Green hydrogen and an evolving concept of energy security: challenges and comparisons": <https://www.researchgate.net/publication>.
- 10) Department of Transportation (2007), "Livability in Transportation", Guidebook, U.S. Federal Highway Administration Office of Planning, *Environment and Federal Transit Administration*, USA, p.16
- 11) Flying Magazine article)2023("Universal Hydrogen Completes First Test Flight of Fuel Cell-Powered Airline".<https://newsroom.aviator>
- 12) Five percent zero emission fuels by 2030 needed for Paris-aligned shipping decarbonization. (2021, March). Getting to Zero Coalition. <https://www.globalmaritimeforum.org/>
- 13) Global Data - Energy Monitor (2022) <https://www.energymonitor.ai/tech/hydrogen/>
- 14) Global Data, Green Hydrogen Leaders – Q1 2023 <https://www.globaldata.com/data-insights/>
- 15) Hydrogen council (2017), "Hydrogen Scaling Up: A Sustainable Pathway for the global Energy Transition". <https://hydrogencouncil.com/>
- 16) Hydrogen Council (2020), "Hydrogen in the Maritime Sector", <https://wwwcdn.imo.org>
- 17) Harris S. (2010), "Global and regional orders and the changing geopolitics of energy". *Australian Journal of International Affairs*, 64(2), 166 - 185 .
- 18) International Maritime Organization (2018), "UN body adopts climate change strategy for shipping", <https://www.imo.org/>
- 19) Habib A., Ouki M. (November 2021), "Egypt's Low Carbon Hydrogen Development Prospects" Oxford Institute for Energy Studies, P. 7.

- 20) International Monetary Fund (December 2022), “The Scramble for Energy: Bumps in the transition energy”, *Finance & Development*, p. 13.
- 21) IRENA. (2019). Hydrogen: A renewable energy perspective. IRENA. <https://www.irena.org/>
- 22) IRENA (2015). Renewable energy options for the industry sector: Global and regional potential until 2030 – A background paper to “Renewable energy in manufacturing”. IRENA, Abu Dhabi. Retrieved from <http://www.irena.org/remap/>
- 23) REN21 (2023), "Renewables 2023 Global Status Report collection", *Renewables in Energy Demand*, P.39.
- 24) IRENA (2022), “Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal & Green Hydrogen Cost and Potential”, p. 32. <https://www.irena.org/>
- 25) IEA and BNEF, “Green Hydrogen: Fact book”, 2023, p. 5.
- 26) IEA (2018). What is energy security? <https://www.iea.org/topics/energysecurity/whatisenergysecurity>
- 27) IEA (2019), “The Future of Hydrogen: Seizing today’s opportunities”, *Report for the G20*, Japan.
- 28) IEA: International Energy Agency (2022), Global Hydrogen Review 2022, pp. 69 – 70.
- 29) IEA. International Energy Agency (2023), World Energy Investment 7172, p.10.
- 30) JESSE S. (2023), “green hydrogen”, University of Hull, P.11. <https://www.researchgate.net/>
- 31) Maradin D., & Cerović L., & Mjeda, T. (2017). Economic Effects of Renewable Energy Technologies. *Naše gospodarstvo /Our Economy*, 63(2), 49–59.
- 32) Mazloomi K., & Gomes Ch. (2012), “Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp. 3024–3033.
- 33) Noussan M.; Raimondi P.P.; Scita R.; Hafner M., (2021), "The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition: A Technological and Geopolitical Perspective", *Sustainability*, 13, 298.
- 34) Onorati A. et al (2022), "The Role of Hydrogen for Future Internal Combustion Engines"; *International J of Engine Research*, Vol. 23(4) 529–540, London, UK.
- 35) Osman M. et al (2022), Economic Feasibility of Green Hydrogen Production by Water Electrolysis Using Wind and Geothermal Energy Resources in Asal-Ghoubbet Rift (Republic of Djibouti): A Comparative Evaluation, *Energies*, 15, 138. : <https://www.researchgate.net/publication>.
- 36) Pflugmann F., De Blasio N. (2020), "Geopolitical and Market Implications of Renewable Hydrogen": New Dependencies in a Low-Carbon Energy World, *Environment and Natural Resources Program*, Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard Kennedy School.
- 37) Railway Industry Association (2019), “RIA Electrification Cost Challenge”, <http://www.riagb.org.uk/>
- 38) Staffell I. et al (2019), “The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system”, *Energy & Environmental Science*, 12 (2), 463-491.
- 39) Sjoerd B, et al (2020), “Economic feasibility of green hydrogen in transportation sector”, University of Groningen, p. 2.

- 40) The Centre for Sustainable Transportation (2005), "Defining Sustainable Transportation" <https://thepep.unece.org/>
- 41) Yip H. L. et al (2019), "A review of hydrogen direct injection for internal combustion engines: Towards carbon-free combustion", *Applied Sciences*. 9, 4842. [CrossRef].
- 42) Zhou P., Jin R. Y., & Fan L. W. (2016), Reliability and economic evaluation of power system with renewables: *A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 537-547. <https://doi.org/>
- 43) International Energy Agency (IEA). 2022. "Global Hydrogen Review 2022." IEA and Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris
- 44) transport & Environment. 2020. "Electro fuels? Yes, We Can ... If We're Efficient." Briefing, December. Brussels