اقتصاديات الهيدروجين الأخضر ودورها في تعزيز أمن الطاقة وتحقيق النقل المستدام

د / هدايا عبد الستار عبد المنعم عبد الجليل *

(*) د.هدايا عبد الستار عبد المنعم عبد الجليل : مدرس بكلية التجاره بنات جامعة الازهر

Email : roroyoyo2010@gmail.com

الملخص

لقد أدت الاضطرابات العالمية التي تشهدها أسواق الطاقة التقليدية على مستوى العالم، والجهود المبذولة للوصول بالإنبعاثات الكربونية إلى الصفر، زخما قويا لاستخدام تقنيات الطاقة المتجددة وتطبيقاتها المختلفة في معظم القطاعات الاقتصادية والخدمية. وذلك بصفتها طاقة مأمونة المصدر لايمكن احتكارها والسيطرة عليها كالوقود الأحفورى، بالإضافة إلى أنها طاقة نظيفة وصديقة للبيئة. يعتبرالهيدروجين الأخضر أحد أهم المنتجات التي تتم من خلال استخدام مصادر الطاقة المتجددة، والتي تلعب دورا محوريا في تعزيز أمن الطاقة من خلال توفير الامدادت الكافية منها وبأسعار مناسبة. فضلا عن دورها في تحقيق التحول العالمي نحو اقتصاد خالي من الكربون، ولا سيما في قطاع النقل الذي يعد ثاني أكبر منتج لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون عالميًا، بعد الكهرباء وتوليد الحرارة. وأكبر مستخدم نهائي للطاقة في البلدان المتقدمة النمو وأسرع القطاعات نمواً في معظم البلدان النامية.

من هذا المنطلق تمثل هدف البحث في دراسة امكانات اقتصاديات الهيدروجين الأخضر ودورها في تعزيز أمن الطاقة منخفضة الانبعاثات، خاصة في قطاع النقل باعتباره مخزنا طويل الأجل للطاقة، وناقلا أساسيا لها من خلال الأسلوب الوصفي التحليلي بالاعتماد على كل من المنهج الاستقرائي والاستنباطي، في عرض الإطار النظري المتعلق بموضوع الدراسة.

توصلت الدراسة إلى أن أمن الطاقة هو أحد المتطلبات الأساسية لتحقيق النمو الاقتصادي في القطاعات الاقتصادية المختلفة. وأن الهيدروجين الأخضر هو مصدر الطاقة الأنظف الذي يتمتع بالقدرة على تعزيزه، بمعدلات كافية من أجل تلبية الطلب المستقبلي عليها، وذلك من خلال زيادة إمدادات الطاقة المحلية، وامكانيات التخزين لفترة طويلة الأجل. هذا بالإضافة إلى قدرته على تحقيق النقل المستدام من خلال استخدام تقنية خلايا وقود الهيدروجين (HFC) التي تتمتع بإمكانيات هائلة لتحسين كفاءة الطاقة في قطاع النقل. لذا أوصت الدراسة بضرورة إنشاء وتطوير البنية التحتية التمكينية لانتشار التكنولوجيا المستخدمة في انتاج العناصرالأساسية للطاقة المتجددة، كتوربينات الرياح، والمركبات الكهربائية، والالواح الشمسية بغرض انتاج الهيدروجين الأخضرعلى نطاق واسع لضمان مستقبل مستدام وآمن للمناخ.

Abstract

The global turmoil in the traditional energy markets around the world, and the efforts exerted to reach zero carbon emissions, have given a strong impetus to the use of renewable energy technologies and their various applications in most economic and service sectors. This is because it is a safe source of energy that cannot be monopolized and controlled, like fossil fuels, in addition to being clean and environmentally friendly energy. Green hydrogen is one of the most important products that are made through the use of renewable energy sources, which play a pivotal role in enhancing energy security by providing sufficient supplies of it at reasonable prices. As well as its role in achieving the global transition towards a carbon-free economy, especially in the transportation sector, which is the second largest producer of carbon dioxide emissions globally, after electricity and heat generation. It is the largest end user of energy in developed countries and the fastest growing sector in most developing countries.

From this point of view, the objective of the research is to study the potential of green hydrogen economics and its role in enhancing the security of low-emission energy, especially in the transport sector as a long-term store of energy and a primary transporter for it through the descriptive and analytical method based on both the inductive and the deductive method, in presenting the theoretical framework. related to the subject of the study.

The study concluded that energy security is one of the basic requirements for achieving economic growth in the various economic sectors. And that green hydrogen is the cleanest energy source that has the ability to enhance it, at sufficient rates in order to meet future demand for it, by increasing local energy supplies and long-term storage capabilities. This is in addition to its ability to achieve sustainable transportation through the use of hydrogen fuel cell (HFC) technology, which has huge potential to improve energy efficiency in the transportation sector. Therefore, the study recommended the need to establish and develop the enabling infrastructure for the spread of technology used in the production of basic elements of renewable energy, such as wind turbines, electric vehicles, and solar panels for the purpose of producing green hydrogen on a large scale to ensure a sustainable and safe future for the climate.

١: المقدمة

يشكل أمن الطاقة والانتاج المسؤول لمصادرها المستدامة أمرا ضروريا تفرضة الظروف الاقتصادية العالمية المعاصرة، خاصة في ظل ما يمر به العالم من أزمات متكررة كجائحة كورونا، والحرب الأوكرانية الروسية واللتا نتجا عنهما الارتفاع الحاد لأسعار الطاقة، وفاقم في الوقت ذاته النقص في إمداداتها والقلق بشأن أمنها، هذا بالاضافة الى هيمنة الطاقة الاحفورية التقليدية، وما تسببه من تأثيرات سلبية ضخمة على البيئة والمناخ، ولا سيما في الدول النامية التي تعتبر أكثر الدول عرضه لإنعدام الأمن في قطاع الطاقة، وأكثر تأثرا بتغير المناخ.

بناء عليه، حظيت مصادر الطاقة الخالية من الكربون (الطاقة المتجددة) بإهتمام متزايد خلال السنوات الماضية، وذلك باعتبارها بمثابة الحل الأمثل لمعظم التحديات الرئيسية التي تواجه العالم، ولا سيما العالم النامي، 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 عالميًا، بعد الكهرباء وتوليد الحرارة. وأكبر مستخدم نهائي للطاقة في البلدان المتقدمة النمو وأسرع القطاعات نمواً 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 الأخضرمخزنا طويل الأجل للطاقة وناقلا أساسيا لها من اجل 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 خيارًا قابلًا للتطوير لإزالة الكربون عن الشحن، و قطاعات الطيران.

١ – ١: مشكلة البحث:

تتمثل مشكلة الدراسة في أنه على الرغم من توافق الأراء العالمية حول ضرورة تأمين مسار التحول إلى الطاقة الخضراء، خاصة بعد حدوث كل من أزمتي المناخ والطاقة التي اشتدت حدتهما بالتعافي الاقتصادي الذي ظهر جراء إنهاء الإغلاق العام العالمي الذي فرضته أزمة كوفيد–١٩، والذي أدى

إلى زيادة الاستهلاك العالمي للطاقة وكذا الغزو الأوكراني في فبراير ٢٠٢٢، مما نتج عنه ارتفاع الأسعار في جميع أسواق النفط والفحم والغاز الطبيعي، بسبب النقص في سلاسل الامداد. إلا أنه لا يزال هناك عوائق تحول دون تحقيق ذلك الانتقال، حيث الافتقار إلى البنية التحتية التمكينية اللازمة لإنتشار هذه التقنية بالإضافة إلى ارتفاع تكاليفها، ولا سيما في قطاع النقل، كذلك حالة عدم اليقين التي تحيط بكيفية تعامل دول العالم مع فجوة متطلباتها من الطاقة على المدى القريب، وأهدافها المناخية على المدى البعيد. و التوقيت اللازم لحدوث هذا التحول. الأمر الذي يفرض التساؤل التالي:

ما مدى إمكانية مساهمة اقتصاديات الهيدروجين الأخضر في تعزيز أمن الطاقة، وتحقيق النقل المستدام ؟

١- ٣ : أهمية البحث وهدفه

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 مجددا في دائرة انعدام أمن الطاقة، الذي تسببت به الصراعات الجغرافية – السياسية، والتكاليف المتصاعدة والمستمرة في أسعارالطاقة. 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 ٣٥% بحلول عام ٢٠٥٠ في السيناريو المرجعي، بينما يتطلب سيناريو الدرجتين خفض الانبعاثات بنسبة ٤٠% حتى نفس العام. الأمر الذي يستلزم ضرورة انخفاض متوسط الانبعاثات لكل كيلومتر بأكثر من ٧٠% ، على الرغم من الزيادة في عمليات شحن ونقل الضائع، والحركة الجوية الأكثر كثافة بالكربون.

وفي هذا السياق، وعلى الرغم من أن الهيدروجين هو أصغر جزيء في الكون إلا أنه يتمتع بامكانيات هائلة تمكنه من احداث تغيرات ملحوظة في تحولات الطاقة العالمية، إذ أنه ناقل للطاقة خال من الكربون بصفته وقودا نظيفا يحل محل الوقود الأحفوري في جميع الاستخدامات. فضلا عن ما تشيره توقعات سيناريوهات إزالة الكربون التي تتنبأ بأن يكون للهيدروجين دور مهم في تحقيق الإنبعاثات الصفرية الصافية بحلول منتصف القرن الحالي . فعلى سبيل المثال: تتوقع الوكالة الدولية للطاقة المتجددة أن يلبي الهيدروجين الأخضر من ١٢ إلى ١٣% من الطلب النهائي على

الطاقة بحلول عام ٢٠٥٠ صعودا من صفر حاليا. لذا يستهدف البحث تسليط الضوء على اقتصاديات الهيدروجين وأنواعه، ولا سيما الهيدروجين الأخضر، من حيث إبراز 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 ٧% أو ما قدر بنحو ٦.٨ تريليون دولار، ووظف نحو ١٩٣ مليون شخص أوما نسبته ٥.٦% من القوة العاملة خلال عام ٢٠٢١[1].

١- ٤: فروض البحث:

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

١-٥ : منهج البحث

يعتمد البحث على الأسلوب الوصفي التحليلي بالاعتماد على كل من المنهج الاستقرائي والاستنباطي، في عرض الإطار النظري الخاص بالهيدروجين الأخضر، ودوره في تعزيز أمن الطاقة وتحقيق النقل المستدام. بناء على الدراسات المتخصصة، والبيانات الثانوية المنشورة التي تصدرها المواقع الرسمية، والمنظمات الدولية والإقليمية ذات الصلة بموضوع الدراسة، للخروج بمعلومات واستنتاجات مفيدة تساهم في معرفة المردود الاقتصادي والاجتماعي والبيئي لاستخدام الهيدروجين الأخضر في تفادي وقوع اضطرابات اقتصادية قد تسفر عن عواقب سياسية خطيرة تنتج من شح الإمدادات ونقص المعروض من جهة، وعدم تحقيق الاستدامة بانبعاثات كربونية ضارة من جهة أخرى.

وقد اعتمدت الدراسة على هذا الأسلوب، نظرا لعدم توافر بيانات منتظمة تتيح للباحث تقييم الوضع الحالي لهذه الصناعة على معدلات النمو الاقتصادي في مصر، وهو ما تم إيضاحه في القسم الرابع من هذه الدراسة (مصر والهيدروجين الأخضر) بشيء من الإيجاز.

[1])REN21 (2023),. Renewables 2023 Global Status Report collection, Renewables in Energy Demand, P.39.

٦: الدراسات السابقة

اهتمت العديد من الدراسات الاقتصادية بدراسة اقتصاديات الهيدروجين الأخضر، كناقل مستدام للطاقة ودوره في التحول العالمي إلى اقتصاد منعدم البصمة الكربونية. حيث أشارت دراسة (صندوق النقد الدولي، ديسمبر ٢٠٢٢)[٢] إلى ضرورة التحول في نظام الطاقة الحالي، على أن لا تقتصر عملية التحول إلى إدخال مصادر جديدة للطاقة فحسب، بل لا بد أن يحدث إجراء تغيير شامل لأسس الطاقة في الاقتصاد العالمي الذي يبلغ حجمه حاليا نحو ١٠٠ تريليون دولار. أكدت الدراسة أن هذا التحول لا بد وأن يكون مدفوعا بالمناخ، ومن ثم، الاعتماد على تقنيات جديدة تنخفض بوجودها الإنبعاثات والتي من بينها الهيدروجين الأخضر الذي يتوقع أن يسيطر على الأسواق العالمية خلال السنوات القليلة القادمة كسوق الإتحاد الأوروبي الذي يتنبأ أن يوفر الهيدروجين ما يتراوح بين ٢٠% و٢٥% من إجمالي طاقته بحلول عام ٢٠٥٠.

كذلك قامت دراسة (Mazloomi K., & Gomes Ch. 2012)[٣] بتسليط الضوء على جدوى تطوير صناعة الهيدروجين كناقل 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 لاعبا أساسيا 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 عملية 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 وقودا يوميا. 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 والكيمائية لغاز الهيدروجين، وذلك في حالة إذا رغبت الدولة في استخدام الهيدروجين كبديل للوقود الأحفوري.

كما حللت دراسة (Noussan M et al, 2021)[٤] 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

---

[2]) International Monetary Fund (December 2022), "The Scramble for Energy: Bumps in the transition energy", ***Finance & Development***, pp. 9-13.

[3])Mazloomi K., & Gomes Ch .(2012), "Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges", ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***,Vol. 16, pp. 3024–3033.

[4]) 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.

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 تعاونا دوليا قويا يعتمد على معايير وأهداف شفافة.

كذلك ناقشت دراسة (Blasio N. , 2021)[٥] دور تطبيقات تقنيات الهيدروجين الأخضر في خفض الإنبعاثات 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 الإنبعاثات الكربونية إلى الصفر في قطاع النقل.

هذا وقد قامت دراسة (وكالة الطاقة الدولية، ٢٠١٩)[٦] بتحليل الوضع الحالي للهيدروجين النظيف من أجل تحديد الفرص الفورية لتوفير نقطة انطلاق 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 مبسوق، نظرا لمساهمته في مواجهة تحديات الطاقة الحرجة المختلفة، وبصفته موفرا طرقا عدة لإزالة الكربون في مجموعة من القطاعات كالنقل والحديد والصلب وغيرها. وأوصت بضرورة زيادة نطاق تقنياته مع العمل على خفض تكاليفه للسماح باستخدامه على نطاق واسع.

كما تناولت دراسة (Carlson E. & Lukaszewska H., 2022) [٧] مجموعة المخاطر والتحديات المرتبطة بالإنتشار 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 وتصدير الهيدروجين الأخضر. فضلا عن وضع إطار

---

[5]) Blasio N. (2021), "The Role of Clean Hydrogen for a Sustainable Mobility" Harvard University, Harvard Kennedy School, ***Environment and Natural Resources Program,*** the Belfer Center for Science and International Affairs, pp. 1- 26

[6])IEA (2019), "The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities", ***Report for the G20***, Japan . https://www.iea.org/topics/hydrogen/

[7])Carlson E., & Lukaszewska H. (2022), "Green hydrogen and an evolving concept of energy security: challenges and comparisons", : https://www.researchgate.net/publication

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 امن الطاقة، إلا أن سوق الهيدروجين ومشتقاته بصفة عامة، لا يزال في طور التكوين، وسيتوقف تطوره المستقبلي على مجموعة التدابير التي تتخذها البلدان والمناطق.

أخيرا قامت دراسة (Osman M.; et al 2022) [٨] بتقييم الجدوى الاقتصادية لإنتاج الهيدروجين الأخضر من خلال التحليل الكهربائي للماء باستخدام كل من طاقة الرياح، والطاقة الحرارية الأرضية في منطقة صدع عسل – غويت بجمهورية جيبوتي بجنوب إفريقيا Asa l– Ghoubbet Rift (AG Rift). توصلت الدراسة إلى أن تكلفة انتاج وحدة واحدة من الكهرباء المولدة بإستخدام توربينات الرياح تساوى نحو (٠.٠٤٢) دولار / كيلو وات في الساعة. بينما تمثل نحو (٠.٠٨٦) دولار / كيلو وات 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 (٠.٦٧٢) إلى (١.٠٦٣) دولار / كجم من الهيدروجين. بينما تتراوح تكلفة إنتاج الهيدروجين باستخدام المحلل الكهربائي ذي درجات الحرارة المرتفعة والذي يعمل بالطاقة الحرارية الأرضية الجوفية ما بين (٣.٣١) إلى (٤.٧٨) دولار / كجم من الهيدروجين. مما يؤكد انخفاض تكلفة إنتاج الكهرباء والهيدروجين الأخضر باستخدام طاقة الرياح مقارنة بإنتاجهما من خلال الطاقة الحرارية الأرضية. بالإضافة إلى أنها أدت إلى انخفاض كمية الإنبعاثات الكربونية من نحو(٢١٨٤.٨) طن /عام، باستخدام الطاقة الحرارية الأرضية الجوفية إلى نحو (٢٠٦١.٦) طن / عام. لذا أوصت الدراسة بضرورة استخدام طاقة الرياح المتجددة في عملية الإنتاج، خاصة وأنها قد أثبتت جدواها الاقتصادية من حيث كمية الإنبعاثات الكربونية وحجم التكاليف التي يمكن أن تتحملها المنطقة في انتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام المحلل الكهربائي. حيث أنها أدت إلى انخفاض كمية الإنبعاثات الكربونية من نحو(٢١٨٤.٨) طن /عام، باستخدام الطاقة الحرارية الأرضية الجوفية إلى نحو (٢٠٦١.٦) طن / عام بإستخدام المحلل الكهربائي.

[88])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/

٧ : خطة البحث

ينقسم البحث إلى خمسة أقسام – فضلا عن المقدمة– تتناول على الترتيب: الهيدروجين(مفهومه – أنواعه –أهم استخداماته، اقتصاديات الهيدروجين الأخضر وأمن الطاقة، اقتصاديات الهيدروجين الأخضر والنقل المستدام، مصر والهيدروجين الأخضر، و النتائج والتوصيات.

٢: الهيدروجين (مفهومه – أنواعه – أهم استخداماته)

يعرف الهيدروجين بصفة عامة بأنه أبسط وأخف عنصر كيميائي موجود في الكون[٩]، يوجد بشكل طبيعي على شكل ذرتين من الهيدروجين(H_2) ومن أهم خصائصه أنه غير سام، عديم اللون، والطعم، والرائحة، وعلى الرغم من كونه غازعديم اللون إلا أنه قد تم تخصيص رموز لونية للهيدروجين تختلف كل منها عن الأخرى باختلاف مصادر الطاقة وعمليات الإنتاج والمواد الأولية المستخدمة لإنتاجه. وكذا الأثر البيئي التي ينتج عنه والمسؤولة في الوقت ذاته عن اللون الذي يتمتع به،كما يتضح من **الشكل رقم (١)**

شكل رقم (١) انواع الهيدروجين

Source: IEA and BNEF, Green Hydrogen: Fact book, 2023, p. 5

فمنها على سبيل المثال[١٠]: الهيدروجين الرمادي، والهيدروجين الأزرق، واللذان ينتجان من مصادر الطاقة الأولية (فحم، وغاز طبيعي)، حيث تتمثل الطرق الرئيسية لإنتاج الأول في إعادة تشكيل غاز

[٩] من أهم الخصائص الفيزيائية لجزيء الهيدروجين أنه أخف بحوالي ١٤ مرة من الهواء عند ٢.٠١٦ جم / مول وله معدل انتشار مرتفع (٠.٦١ سم ٢ / ثانية)، مما يجعله أكثر أمانا في حالة اشتعاله، حيث يتشتت بسرعة في حالة حدوث تسرب، فتتولد ألسنة اللهب حرارة منخفضة الإشعاع بسبب عدم وجود الكربون مقارنة بإشتعال الوقود الهيدروكربوني التقليدي (مثل البنزين). يمكن الرجوع في ذلك إلى:
Ballard Power Systems: Hydrogen Facts (2022) ،P.4. https://www.ballard.com/

[10])IEA and BNEF, Op. cit, 2023, p. 5

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 الأول في انتاج ما يعادل ١١ كجم من ثاني اكسيد الكربون، أما الثاني فينتج من ٣ – ٦ كجم من ثاني أكسيد الكربون، ولكنه يقلل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنسبة تصل إلى ٩٠%. 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 يُطلق عليه غالبًا "الهيدروجين النظيف"، أو "الهيدروجين المتجدد".

تم اقتراح مصطلح اقتصاد الهيدروجين لأول مرة في عام ١٩٧٠ من قبل جون بوكريس (John Bockris) خلال محاضرة كان قد ألقاها في المركز الفني لجنرال موتورز، لكنه لم يبدأ في اكتساب الزخم حتى أوائل عام ٢٠١٠، مما تسبب في تشكيل مجلس الهيدروجين عام ٢٠١٧)[١١]، حيث التزمت شركات السيارات والطاقة اليابانية والصينية بتصميم وبناء مركبات الهيدروجين ومحطات الهيدروجين[١٢].بناء عليه، يمكن تعريف اقتصاد الهيدروجين بأنه "ذلك الاقتصاد الذي يكون فيه الهيدروجين هو الناقل الأساسي للطاقة جنبًا إلى جنب مع الكهرباء".

٢– ١: الوضع الحالي والتوقعات المستقبلية لإنتاج الهيدروجين الأخضر

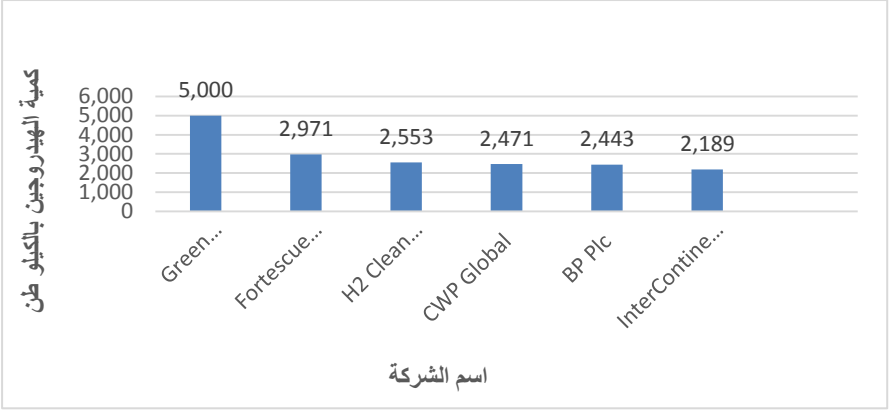
بلغ إجمالي الإنتاج العالمي من الهيدروجين المشتق من استخدام الوقود الأحفوري نحو ٩٤ مليون طن خلال عام ٢٠٢١، مصاحبا لإنبعاثات كربونية تزيد عن ٩٠٠ مليون طن خلال نفس العالم، في حين بلغ انتاج الهيدروجين منخفض الإنبعاثات (الهيدروجين الأزرق) أقل من ١ مليون طن (0.7 %) خلال نفس العام، بالإضافة إلى نحو ٣٥ كيلو طن فقط من الهيدروجين الأخضر. إلا

[١١]) تم الإعلان عن مجلس الهيدروجين في أوائل ٢٠١٧ في المنتدى الاقتصادي العالمي في دافوس، وهو عبارة عن هيئة استشارية عالمية يقودها مديرون تنفيذيون، بلغ عددهم منذ منتصف عام ٢٠١٩ على ما يزيد عن ٦٠ مديرا تنفيذيا من كبرى الشركات العالمية مثل Airbus، Toyota، يقوم هؤلاء المديرون بتقديم رؤية بعيدة المدى عن دور تقنيات الهيدروجين في التحول العالمي في مجال الطاقة، والنقل، والكهرباء، وكذلك الاستخدامات الصناعية والسكنية. تتمثل المخرجات الرئيسية للمجلس حتى الآن في تنسيق وتمويل الدراسات لدعم مسيرة تطوير صناعة الهيدروجين. يمكن الرجوع في ذلك إلى:

-Hydrogen council (2017), Hydrogen Scaling Up: A Sustainable Pathway for the global Energy Transition.

[12]) Sjoerd B, et al (2020), "Economic feasibility of green hydrogen in transportation sector", University of Groningen, p. 2.

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 ٢٤ مليون طن بحلول عام ٢٠٣٠، حيث أن ارتفاع السعة المركبة للمحللات الكهربائية المستخدمة في انتاج الهيدروجين الأخضر، والتي وصلت إلى ٥١٠ ميجاوات بنهاية عام ٢٠٢١ وبزيادة قدرت نحو ٢١٠ ميجاوات خلال عام ٢٠٢٠ ستزيد من انتاج الهيدروجين الأخضر خلال الأعوام القليلة القادمة . مع العلم أن شركة (Green Hydrogen International) تعتبر من أوائل الشركات الرائدة في انتاج الهيدروجين الأخضر خلال الربع الأول من عام ٢٠٢٣، حيث استحوزت على أعلى كمية انتاج بنحو ٥.٠٠٠ كيلو طن. تليها شركة (Fortescue Future Industries) بكمية إنتاج قدرت بنحو ٢.٩٧١ كيلوطن خلال نفس الفترة. مع العلم أن أقل نسبة إنتاج كانت من نصيب شركة (InterContinental Energy) بإجمالي إنتاج قدر بنحو ٢.١٨٩ كيلو طن خلال نفس الفترة كما يظهر من **الشكل رقم (٢)**



شكل رقم (٢): الكمية المنتجة من الهيدروجين الأخضر من قبل الشركات الرائدة في هذه الصناعةعلى مستوى العالم بالكيلو طن خلال الربع الأول من عام ٢٠٢٣.

Source: Global Data, Green Hydrogen Leaders – Q1 2023 https://www.globaldata.com/data-insights/

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 استراليا وحدها نحو ٣ مليون طن بحلول عام ٢٠٣٠. حيث أنها تعتبر الدولة الأكبر على مستوى العالم من حيث عدد المنشآت التي تقوم بإنتاج الهيدروجين الأخضر وذلك إعتبارا من عام ٢٠٢٢ حيث بلغت عدد منشآتها نحو ٩٦، حيث يتم توليد نحو ١٥.٧ تيراوات/ ساعة من الهيدروجين

الأخضر بواسطة محطات الطاقة الشمسية الكهروضوئية صغيرة الحجم، ونحو ٨.١ 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 ٢٠٥٠ بسبب وفرة مواردها من الطاقة المتجددة (الطاقة الشمسية – طاقة الرياح) كما يتبين من **الجدول رقم (١)**

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 ٤ مليون طن بحلول عام ٢٠٣٠، والتي ستكون غالبا لتصدير الهيدروجين أو الأمونيا إلى أوروبا وآسيا[١٣].

جدول رقم (١)

عدد منشآت إنتاج الهيدروجين الأخضر في جميع أنحاء العالم إعتبارا من عام ٢٠٢٢ حسب البلد

البلد	عدد المنشأت
أستراليا	٩٦
ألمانيا	٥٠
إسبانيا	٥٠
هولندا	٤٨
المملكة المتحدة	٤٦
الولايات المتحدة الأمريكية	٣٧
روسيا	٣٦
البرتغال	٢٨
الصين	٢٦
تشيلي	٢٢

Source :Global Data – Energy Monitor (2022) https://www.energymonitor.ai/tech/hydrogen/

٢ – ٢: أبرز استخداماته الحالية وأهم تطبيقاته المستقبلية

إذا كان المستهدف هو إزالة الكربون تماما من الاقتصاد، فإن جزيء الهيدروجين سيلعب دورا مهما 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 انتاجه 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

[13]) IEA: International Energy Agency (2022), Global Hydrogen Review 2022, pp. 69 – 70.

العالمية التي تنتجها الصناعات التي تعتمد على الوقود الأحفوري التقليدي وذلك بحلول عام ٢٠٣٠[١٤].

هذا وتعد تقنية خلايا الوقود (Fuel Cells) من أبرز التطبيقات الحالية للهيدروجين. تم إختراعها بإنجلترا في منتصف القرن التاسع عشر الميلادي على يد السير وليام روبرت جروف (Grove William Robert) عام ١٨٣٩. وهي عبارة عن أداة تعمل على تحويل الطاقة الكيميائية الى طاقة كهربائية باستخدام كلا من الهيدروجين والأكسجين دون أن ينتج عنها أي عملية احتراق. مع العلم أن هذا الاختراع ظل حبيس الادراج مدة زمنية ليست بالقصيرة (١٣٠ عاما) نظرا 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 يُستَخدم كمادة خام في بعض الصناعات، حيث ينتج ويستهلك أكثر من ٥٥ مليون طن من الهيدروجين سنويًا في مجموعة واسعة من العمليات الصناعية[١٥] مثل صناعة السماد والمواد الكيميائية والتكرير، أو لتوفير الحرارة في الصناعات كثيفة استهلاك الطاقة، مثل صناعة الصلب، الأمونيا[١٦].

أما عن التطبيقات المستقبلية، فتشير التوقعات إلى أن مساهمة الهيدروجين في إنتاج صناعة الحديد والصلب ستمثل نحو ٤٠ % من إجمالي الطلب على الهيدروجين الصناعي بحلول عام ٢٠٥٠، حيث يعمل كبديل للفحم والغاز الطبيعي كعامل اختزال ومصدر للطاقة. هذا بالإضافة إلى أنه سيساهم في إنتاج الصناعات الثقيلة كالمواد الكيمائية وإنتاج الأسمنت من ٥ – ١٠ % من إجمالي الطلب على الطاقة النهائية المستخدمة في تلك الصناعة بحلول نفس العام. أما عن استخدامه في قطاع النقل فسيتركز بشكل كبير في انتاج الوقود المشتق من الهيدروجين المستخدم لازالة الكربون في عمليات النقل البحري لمسافات ليست بالقصيرة، وذلك في صورة أمونيا، وميثانول، وديزل صناعي من ٣٠ – ٥٥% من اجمالي الطلب النهائي للطاقة في القطاع البحري بحلول عام ٢٠٥٠. أما في مجال النقل الجوي فسيمثل الوقود المشتق من الهيدروجين وفي صورة وقود نفاث صناعي ما بين ١٠ – ٣٠ % من إجمالي الطلب النهائي للطاقة في النقل الجوي. أما النقل البري لمسافات طويلة فسيمثل الهيدروجين منخفض الكربون، والوقود المشتق منه ما بين ١٠ – ٢٠ % من إجمالي الطلب النهائي للطاقة في النقل البري بحلول نفس العام[١٧].

---

[14])JESSE S. (2023), "green hydrogen", University of Hull, P.11. https://www.researchgate.net/
[15])Hydrogen council (2017), Op.cit, p. 18.
[16])Altork L. N. & Busby J. R. (2010 Oct), "Hydrogen fuel cells: part of the solution", ***Technology & Engineering Teacher***, 70 (2), pp. 22-27.
[17])Bp Energy Outlook: 2023 edition, p. 71. https://www.bp.com/

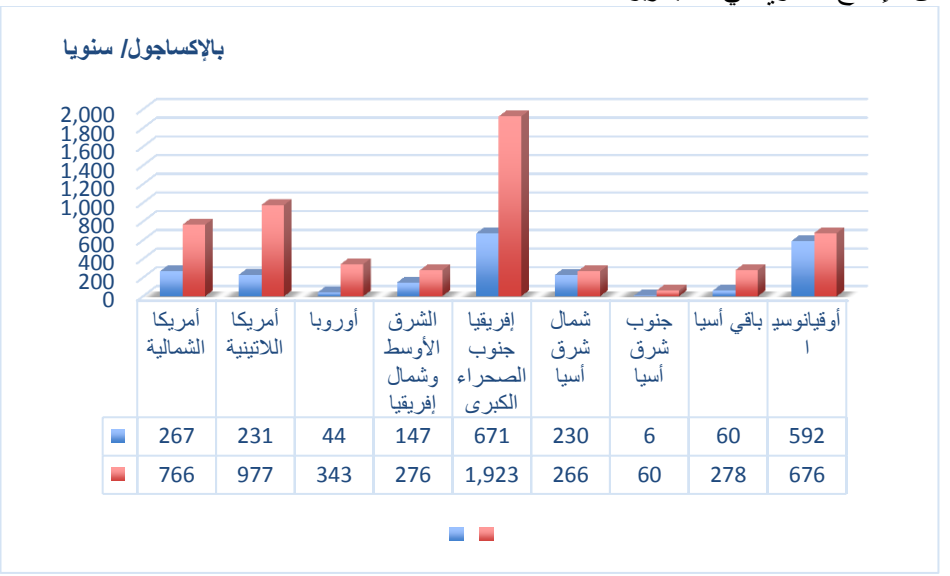
الجدير بالذكر، أنه على الرغم من أن حجم التكاليف اللازمة لإنتاج الهيدروجين الأزرق تتمتع بالانخفاض عن تلك اللازمة لإنتاج الهيدروجين الأخضر في الوقت الحالي، إذ أن التحليل الكهربائي للماء يمثل حاليًا أقل من ٠.١% من إنتاج الهيدروجين العالمي([١٨])، إلا انه ونظرا لعدة عوامل من بينها: ارتفاع اسعار الغاز الطبيعي في كل من أوروبا وآسيا نتيجة الحرب الروسية الأوكرانية، ومجموعة القوانين والمبادرات السياسية التي إتخذتها 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 العناصرالأساسية للطاقة المتجددة، كتوربينات الرياح، والمركبات الكهربائية، والالواح الشمسية، وذلك في ظل توقعات الوكالة الدولية للطاقة من أن الاقتصاد العالمي سينتقل من نظام طاقة كثيف الاستهلاك للوقود إلى نظام طاقة كثيف الاستهلاك للمعادن([١٩]). 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 لانتاج الهيدروجين الاخضر.

بناء عليه، ووفقا لما سبق، سيصبح الهيدروجين الأخضر أحد أكثر الخيارات الأقل تكلفة آنذاك، فسيمثل نحو ٦٠% من الهيدروجين منخفض الكربون بحلول عام ٢٠٣٠، مع العلم أنه ستزداد هذه النسبة الى نحو٦٥ % بحلول عام ٢٠٥٠، وستكون النسبة المتبقية ٣٥ % من نصيب الهيدروجين الأزرق الذي يعمل كمكمل مهم للهيدروجين الأخضر والتي سيتم توفيره من خلال مصادر انتاجه. وفي هذا السياق، يمكن القول أن الهيدروجين الأخضرهو الهيدروجين المستدام الوحيد الذي يتوقع أن يكون قادرًا على المنافسة خلال الأعوام القليلة القادمة. فوفقا لبيانات وكالة الطاقة الدولية لعام ٢٠٢٢ أنه بحلول عام ٢٠٣٠ ستصل سعة الهيدروجين منخفضة الكربون في القطاعات الاقتصادية المختلفة ما بين ١٦ – ٢٤ مليون طن سنويا، مقسمة ما بين هيدروجين أخضر بما يمثل ما بين ٩ – ١٤ مليون طن، وهيدروجين أزرق ما بين ٧ –١٠ مليون طن بشرط أن يتم تنفيذ كافة مشاريعه المتفق عليها حاليا.

ولعل ما يؤكد ما تم ذكره ما يشير إليه **الشكل رقم (3)** والذي يبين أن حجم الإمكانات الاقتصادية الكبرى التي ستتمتع بها منطقة جنوب الصحراء الكبرى، وقدرتها من حيث كمية الإنتاج التي يتوقع أن تنتجها من الهيدروجين الأخضر، والتي قدرت ما بين (٦٧١) بناء على السيناريو المتشائم إلى (١٩٢٣) إكساجول بناء على السيناريو المتفائل، وبحجم تكاليف قدرت بأقل من ٢ دولار لواحد

[18]) Blasio N. (2021),), Op.cit, p. 3.
[19]) International Monetary Fund (December 2022), Op.cit, p. 13.

كيلوجرام من الهيدروجين المشتق من المحلل الكهربائي. وذلك اعتمادا على التوقعات بشأن اتباع المنطقة للإبتكار التكنولوجي الذي سيساعدها في تحقيق ذلك. وذلك مقارنة بأوروبا التي تمتلك عدد كبير من مصانع الهيدروجين الأخضر والتي من المتوقع أن تشهد ما يصل إلى (٣٤٣) إكساجول من الإنتاج السنوي في السيناريو المتفائل.



شكل رقم (3) الإمكانات الاقتصادية لإنتاج الهيدروجين الأخضر بأقل من ٢ دولار للكيلو جرام على مستوى العالم بحلول عام ٢٠٥٠ حسب المنطقة والسيناريو.

Source: IRENA (2022), "Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal & Green Hydrogen Cost and Potential", p. 32, https://www.irena.org/

تأسيسا على ما سبق، سيحدد كل من القدرة التنافسية لتكاليف الإنتاج، وتطور البنية التحتية التمكينية لانتشار تكنولوجيا انتاج مصادر انتاج الهيدروجين الأخضرعلى نطاق واسع في المستقبل القريب، معدل النمو العالمي للهيدروجين الأخضر، فوفقا لدراسة مجلس الهيدروجين لعام ٢٠١٧، إذا كانت تكاليف الهيدروجين الأخضر أكثر ارتفاعا 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 وسيزداد الطلب على الهيدروجين الأخضر بنحو ١٤ ٪ من إجمالي الطلب العالمي المتوقع على الطاقة بحلول عام ٢٠٥٠، فضلا عن خلق

سوقا بقيمة ٢.٥ تريليون دولار لمعدات الهيدروجين، وخلايا الوقود، وتوفير فرص عمل مستدامة لأكثر من ٣٠ مليون شخص بحلول نفس العام[٢٠].

٣ : 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 الأهداف الرئيسية للعديد من سياسات الطاقة القومية في دولة ما، في ضمان حصول اقتصاد هذه الدولة على إمدادات طاقة كافية، موثوقة، وميسورة التكلفة، وذلك وفقًا لمجموعة الشروط والأحكام التي تدعم النمو الاقتصادي والازدهار لتلك الدولة. وعلى الرغم من ذلك، ونظرا لطبيعة اسواق الطاقة العالمية، فإن الأحداث التي تؤثر على أمن الطاقة في دولة ما غالبا ما تؤثر على أمنها في دولة آخرى. لذا يعد الاهتمام بتحقيق امن الطاقة من خلال الانتقال إلى نظام طاقة مرن، ومستقر أمرا ضروريا 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 يرتكز على تجنب الأزمات، حيث أشار إلي أنه "يكمن بالتنوع والتنوع فقط"، مركزا بذلك على جانب تنويع مصادر الطاقة من أجل تنويع أمن العرض الذي يتحقق من خلال توفير موارد للطاقة بصورة كافية وآمنة وبأسعار في متناول الجميع[٢١]. ولعل ما دعم هذا المفهوم (أمن العرض أساس لأمن الطاقة) تلك الأزمات التي شهدها العالم خلال القرن الماضي كأزمات النفط في السبعينيات ووأواخر الثمانينيات والتسعينيات. مع العلم أن الإهتمام الأكاديمي بأمن الطاقة كان قد انخفض بعد هذه الفترة، حيث استقرارأسعار 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

[20])Hydrogen council (2017), Op.cit, p. ٢٢.

[٢١] محمد، خديجة عرفة (٢٠١٤)، امن الطاقة وآثاره الاستراتيجية ، جامعة نايف العربية للعلوم الامنية، الرياض، ص٥٢.

الإمدادات، وتنويع مصادر العرض، والوصول الآمن 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[٢٢]. 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 المتجددة المحلية، وتحسين كفاءتها، مع تقليل الاعتماد على استيراد النفط الأجنبي [٢٣].

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 منيعًا للاضطرابات، وأن الإمدادات البديلة يجب أن تكون متاحة بسهولة وبأسعار معقولة، وكافية فيما يتعلق بكل من الحجم المتاح والوقت المطلوب للتوزيع، بالاضافة إلى البنية التحتية المؤهلة، ومن ثم، فإنه يمكن القول أن أمن الطاقة يعد من بين أهم ابعاد أي دولة لتحقيق أمنها القومي المستدام[٢٤]. وبالنظر إلى أهمية هذا البعد الأمني وتزايد الإهتمام به من قبل الدول سواء كانت منتجة أم مستهلكة فقد إنعكس هذا الاهتمام على المنظمات الدولية وأهمها وكالة الطاقة الدولية الذي عرفته بأنه "التوافر المستمر لمصادر الطاقة بأسعار في متناول الجميع"[٢٥]. وكذلك البنك الدولي الذي وضح 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"[٢٦].

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

---

[٢٢] رشاد، سوزي (٢٠٢٢)، أمن الطاقة ومحاولات روسيا لفرض النفوذ الدولي، ***مجلة كلية السياسة والاقتصاد***، العدد الثالث عشر.

[23])Harris S. (2010) ،Global and regional orders and the changing geopolitics of energy. "***Australian Journal of International Affairs "***, 64(2), 166 - 185 .

[24])Babita Srivastava, Quin P. Callahan (2016), ENERGY SECURITY: TODAY AND TOMORROW**, *Humanities & Social Sciences Reviews,*** Vol 4, No 3, p. 59-67.

[25])IEA (2018). What is energy security?
https://www.iea.org/topics/energysecurity/whatisenergysecurity

[٢٦] عبد العاطي، عمرو (٢٠١٤)، أمن الطاقة في السياسة الخارجية الأمريكية، ***المركز العربي للأبحاث ودراسة السياسات***، الدوحة، ص ص ٤٨ – ٤٩.

صانعي السياسات ومنظمي الطاقة والسلطات العامة ذات الصلة بتنويع موارد الطاقة وزيادة كفاءتها بطريقة تعمل على تلبية احتياجات التنمية الاقتصادية والاجتماعية". [٢٧].

ولعل ما يعزز الاهتمام بتقنيات الطاقة المتجددة هو أن الآثار الاقتصادية الإيجابية لتطبيق هذه التقنيات تفوق الأثار السلبية لها كما هو موضح في **الشكل رقم (4)** حيث يساهم النمو الاقتصادي القائم على تقنيات الطاقة المتجددة (الخضراء) في تحسين عمليات تجارية قائمة وانشاء 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[٢٨].

شكل رقم (٤) الاثار الاقتصادية الإيجابية والسلبية لتقنيات الطاقة المتجددة

Source: Maradin D.,& Cerović L., & Mjeda, T. (2017), op.cit, p. 56.

[27] Maradin D.,& Cerović L., & Mjeda, T. (2017). Economic Effects of Renewable Energy Technologies. ***Naše gospodarstvo /Our Economy***, 63(2), 49–59.

[28])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/

بناء على مجموعة الفوائد السابق ذكرها، ووفقًا لتقرير وكالة الطاقة الدولية لعام ٢٠٢٣، من المتوقع أن يرتفع حجم الاستثمار السنوي في الطاقة النظيفة بنسبة ٢٤ % بين عامي ٢٠٢١ و ٢٠٢٣، مدفوعًا بمصادر الطاقة المتجددة والسيارات الكهربائية، مقارنة بزيادة قدرها ١٥ % في حجم الاستثمار الموجه لإنتاج الوقود الأحفوري خلال نفس الفترة المذكورة. مع العلم أن أكثر من ٩٠ % من هذه الزيادة تنشأ من الاقتصادات المتقدمة والصين. مما يمثل خطرًا 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 يتبين من **الجدول رقم (٢)**

جدول رقم (٢) حجم الاستثمار في الطاقة النظيفة والوقود الأحفوري في الفترة من (٢٠١٥ / ٢٠٢٣) على مستوى العالم

السنوات	٢٠١٥	٢٠١٦	٢٠١٧	٢٠١٨	٢٠١٩	٢٠٢٠	٢٠٢١	٢٠٢٢	٢٠٢٣*
الاستثمار في الطاقة النظيفة	١٠٧٤	١١٣٢	١١٢٩	١١٣٧	١٢٢٥	١٢٥٩	١٤٠٨	١٦١٧	١٧٤٠
الاستثمار في الوقود الأحفوري	١٣١٩	١١٠٥	١١١٤	١١٠٩	١٠٦٦	٨٣٩	٩١٤	١٠٠٢	١٠٥٠

*متوقع

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 العدد من القيود التي ينبغي تسليط الضوء عليها، كموثوقية إمدادات الطاقة المتجددة، والتي تمثل أحد القيود الرئيسية للاستخدام اليومي لهذه لتقنيات وذلك بسبب خصائصها الطبيعية المتغيرة، فمن المعروف أن مصادر الطاقة المتجددة تعتمد كليا على الانتشار الجغرافي، والظروف الجوية، وعليه، فإن التقلبات المناخية وعدم القدرة على التنبؤ بهذه المصادر يمثل قيدًا كبيرًا في إنتاج الطاقة منها. هذا بالاضافة إلى ارتفاع تكاليف البحث والتطوير المتعلقة بتطبيقها، فضلا عن اشكالية نقص الغذاء وارتفاع اسعاره، والمرتبطة بزيادة الطلب على استخدام بعض المحاصيل الزراعية الأساسية في انتاج الوقود الحيوي كمورد من موارد الطاقة المتجددة[٢٩].

من خلال ما تقدم، وبناء على ما تم ذكره، فقد أكدت الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA) خلال عام ٢٠١٩، أن الهيدروجين الأخضر يتمتع بالقدرة على تعزيز أمن الطاقة، وتأمين مصادرها بمعدلات كافية من أجل تلبية الطلب المستقبلي على الطاقة، وذلك من خلال زيادة إمدادات الطاقة المحلية، وامكانيات التخزين لفترة طويلة الأجل، ولا سيما، خلال الأوقات التي تتعرض لها الدول

[29])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/10.1016/j.rser.2015.12.344

للأزمات المرتبطة بنقص الإمدادت. نظرا لتوافر موارد الطاقة المتجددة في جميع أنحاء العالم، وذلك على عكس احتياطيات النفط التي تتركز في مجموعة دول بعينها، حيث يتركز أكثر من ٦٠ % من احتياطات النفط في خمس دول فقط [٣٠]. فضلا عن أن مصادر الطاقة المتجددة التي يتم استخدامها في انتاج الهيدروجين الأخضر يمكن أن تدمج بسهولة في أنظمة الطاقة. الأمر الذي سيساهم في حل مشكلات انقطاع الكهرباء وتخزينها[٣١].

٤: اقتصاديات الهيدروجين الأخضر والنقل المستدام

طرحت منظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي (OCDE) في المؤتمرالدولي بفانكوفر عام ١٩٩٦ تعريفا نوعيا أوليا للنقل المستدام بيئيا (Environmentally Sustainable Transportation: EST)، حيث تم تعريفه على أنه "ذلك النقل الذي لا يعرض صحة المجتمع والأنظمة البيئية للخطر، ويلبي في الوقت ذاته احتياجات التنقل بما يتفق مع أ-:استخدام الموارد المتجددة بأقل من معدلات تجديدها، **ب** -: استخدام الموارد غير المتجددة بأقل من معدلات تنمية بدائلها المتجددة"[٣٢].

كما عرفه المعهد الأمريكي للنقل بأنه "هو ذلك النظام الذي يعمل على تحقيق التنقل والوصول الأساسي لتلبية احتياجات التنمية دون التأثير على نوعية الحياة للأجيال المقبلة، بحيث يكون آمن، صحي وغير مكلف يستخدم المصادر المتجددة وغير المتجددة، ويلبي احتياجات الحاضر دون استنزاف المواردر أو إتلاف التناغم البيئي مع الأخذ في الاعتبار الصحة الاقتصادية والعدالة الاجتماعية طويلة الأجل للمجتمع"[٣٣].

بناء عليه يمكننا القول أن نظام النقل المستدام يشير إلى "ذلك النظام الذي يستهدف التنقل ضمن أنماط وآليات تكون ذات تأثير منخفض على البيئة والصحة، وتعمل على تحسين القدرة التنافسية وتحقيق معايير العدالة والمساواة في تحمل النفقات من قبل مستخدمي وسائل النقل المختلفة بحيث تلبي احتياجات الحاضر دون المساس باحتياجات الأجيال المقبلة".

---

[30])IRENA. (2019). Hydrogen: A renewable energy perspective. IRENA. https://www.irena.org/

[31])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.

[32])The Centre for Sustainable Transportation (2005), "Defining Sustainable Transportation". https://thepep.unece.org

[33])Department of Transportation (2007) ," Livability in Transportation", Guidebook, U.S. Federal Highway Administration Office of Planning, Environment and Federal Transit Administration, USA ‹p.16.

٤ – ١: أهم تطبيقات الهيدروجين الأخضر في قطاع النقل

أولا: النقل البري

في حين أن قطاع النقل يمثل حاليا حصة ثانوية من الطلب العالمي على الهيدروجين، إلا أنه يعد من أكثر القطاعات الواعدة في تطوير تقنياته، نظرًا لاعتماده الشديد على المنتجات النفطية وقلة الخيارات منخفضة الكربون في بعض التطبيقات[٣٤]. هذا وتعد كل من خلية وقود الهيدروجين (Hydrogen Fuel Cell:HFC) والتي يتم من خلالها تحويل الطاقة الكيميائية من الهيدروجين والأكسجين إلى طاقة كهربائية، ومحرك الاحتراق الداخلي بوقود الهيدروجين (Hydrogen :HFICE Fueled Internal Combustion Engine) والذي يتم من خلاله تحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة حرارية ثم إلى طاقة ميكانيكية، أهم تقنيتين لتحويل الطاقة باستخدام الهيدروجين في قطاع النقل.

يتميز محرك الاحتراق الداخلي بوقود الهيدروجين (HFICE) في إمكانية استبداله بين أنواع الوقود الأخرى، ومرونة انتقاله المباشر من وسائل النقل التقليدية، إلى جانب أن التزود المباشر لمحرك الاحتراق الداخلي بالهيدروجين يكسبه ارتفاعا في الانتاجية وكفاءة في التشغيل[٣٥]، هذا بالاضافة إلى أنها لا تتطلب بنية تحتية ضخمة وبالتالي منخفضة التكلفة، حيث يتم يتم تصنيعها في نفس المرافق وباستخدام نفس اجراءات انتاج الوقود الأحفوري التقليدي من حيث اجراءات السلامة العامة، ومن ثم، فهي تساعد في تأمين الوظائف من خلال توفير فرص عمل صناعية مستدامة في قطاع السيارات[٣٦]. إلا أنه ينتج عنه نسبة ليست بالقليلة من الانبعاثات الكربونية الضارة.

أما تقنية خلايا وقود الهيدروجين (HFC) فتتمتع بإمكانيات هائلة لتحسين كفاءة الطاقة في قطاع النقل. فمن مميزاتها عدم الاعتماد على الطاقة الحرارية في الانتاج، ومن ثم، زيادة التوجه نحو استغلال الطاقة المتجددة في توفير هيدروجين أخضر خالي البصمة الكربونية. أيضًا، لا تقتصر استخدامات خلايا الوقود في الشاحنات والحافلات والسيارات فحسب، بل تتوسع استخداماتها لتشمل تشغيل السفن الكهربائية، واستبدال المولدات الكهربائية التي تعمل بالديزل في القاطرات وغيرها، مع

---

[34])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. https://doi.org/10.3390/su13010

[35])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]

[36])Onorati A. et al (2022), "***The Role of Hydrogen for Future Internal Combustion Engines "; International J of Engine Research***, Vol. 23(4) UK: London, UK.

العلم أنها سريعة الشحن، حيث أن مدة شحن السيارات بالطاقة الهيدروجينية لا يتعدى من ٣ – ٥ دقائق فقط، في حين يستغرق شحن السيارات الكهربائية من ٢ – ١٢ ساعة. بالإضافة إلى أنها أعلى كثافة للطاقة وأقل وزنا وأكثر قدرة على القيادة لمسافات أطول، ولا سيما بالنسبة للمركبات الثقيلة التي تصبح فيها البطاريات غير عملية، وغير فعالة. فعلى سبيل المثال: ١ كجم من الهيدروجين نستطيع أن نحصل منه على ١٠ كيلوجول، أما ١ كجم من البنزين نستطيع أن نحصل منه على ٥ كيلوجول.

كذلك سيؤدي استخدام الهيدروجين الأخضر كخيار بديل للديزل والبنزين في قطاع النقل إلى تقليل صدمات الأسعار على المدى البعيد والتي تحدث عاددة في سلسلة توريد الوقود الأحفوري العالمية، ويرجع ذلك بصفة أساسية إلى أنه يتم انتاجه من مصادر الطاقة المتجددة كما ذكرنا سلفا. الأمر الذي سيجعل منها أكثر مصادر الطاقة الواعدة لسيارات الجيل التالي في اقتصاد الهيدروجين، والتقنية الوحيدة التي لديها فرصة لمنافسة محركات الاحتراق الداخلي (ICEs)[٣٧]. إلا أنه لا يزال الافتقار إلى البنية التحتية العقبة الرئيسية أمام انتشار هذه التقنية. فعلى سبيل المثال: يوجد أقل من ١٠٠٠ محطة للتزود بوقود الهيدروجين على مستوى العالم، مقارنة بأكثر من ٥٠٠.٠٠٠ نقطة شحن للمركبات الكهربائية[٣٨].

إضافة إلى ما سبق، وإلى جانب النقل البري الذي استهلك الغالبية العظمى من الطاقة المرتبطة بالنقل (ما يقرب من ٧٨%) خلال عام ٢٠٢١[٣٩]، يتوقع أن يصبح الهيدروجين الحل الأمثل لإزالة الكربون من أنظمة السكك الحديدية وكلا من النقل البحري والجوي، وخطوة رئيسية في الانتقال إلى أنظمة النقل المستدامة العالمية. فالنسبة للسكك الحديدية التي استهلكت نحو ٣% من الطاقة وتنقل نحو ٩ % من الركاب على مستوى العالم و٧ % من شحن ونقل البضائع، تعمل قطارات الهيدروجين على تقليل الانبعاثات بتكلفة أقل عن البدائل الأخرى منخفضة الكربون كالقطارات الكهربائية. ففي حين أن قطار(Coradia iLint) الإيطالي المصنوع من قبل شركة (Alstom) والذي يعمل بخلايا وقود الهيدروجين الأخضر ويصدر عنه مستويات منخفضة من الضوضاء وانبعاثات من البخار والمياه المكثفة فقط، يمكن أن يكلف ما يصل إلى ١١ مليون دولار

[37])Staffell I. et al (2019) ،"The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system", ***Energy & Environmental Science***, 12 (2), 463-491

[38])IEA (2019), "The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities", ***Report prepared by the IEA for the G20***, Japan.

[39]) REN21 (2023), "Transport in Foucs", Op.cit, pp. 39-41.

أمريكي[٤٠]، مقارنة بما وضحته ما قامت به إحدى الدراسات من تحليل حجم التكاليف لنحو ٢٠ خطا من خطوط السكك الحديدية في المملكة المتحدة والبر الرئيسي لأوروبا إلى أن كهربة كيلومتر واحد لخط من خطوط السكك الحديدية يمكن أن يكلف ما يزيد عن مليون دولار أمريكي[٤١].

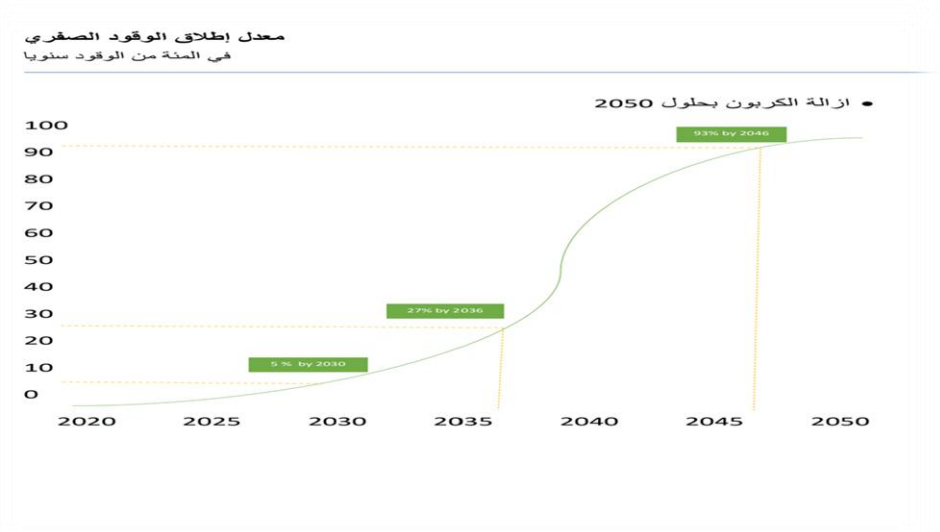
كذلك تمثل خلايا الوقود الهيدروجينية حلا فعالا في مواجهة الاضطرابات التي قد تحدث على مستوى شبكة السكك الحديدية، حيث أن أي ضرر قد يحدث للبنية التحتية الكهربائية المشتركة سيؤثر حتما على جميع القطارات الكهربائية التي تشغل خط معين. بينما يمكن لقطار الهيدروجين أن ينتقل ببساطة إلى خلية الوقود الخاصة به لإنتاج الكهرباء اللازمة لتشغيله من خلال تزويد الخلية بغازي الأكسجين والهيدروجين بصفة مستمرة نظرا لكونهما ليسا من مكونات الخلية نفسها كما في حالة البطاريات التقليدية. فضلا عن أن خلايا الوقود ليست سوى رقائق مسطحة تنتج كل واحدة منها فولطا كهربائيا واحدا. مما يعني أنه كلما زاد عدد الرقائق المستخدمة كلما زادت قوة الجهد الكهربائي[٤٢]. بناء عليه، تعتبر منتجات خلايا الوقود الهيدروجينية أكثر كفاءة من محركات الإحتراق الداخلي، حيث يمكن انتاج الهيدروجين من مصادر الطاقة المتجددة بشكل آمن ونظيف وخالي البصمة الكربونية.

ثانيا/ النقل البحري

أما بالنسبة للنقل البحري فعلى الرغم من كونه أحد أكثر أشكال نقل البضائع كفاءة، إلا أنه لا يزال يمثل تحديًا لجهود إزالة الكربون وتحقيق النقل المستدام. حيث أنه مسؤول عن حوالي ٣% من الانبعاثات العالمية لثاني أكسيد الكربون، و ١١% من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المرتبطة بقطاع النقل[٤٣]، مع العلم أنه يستهدف خفض الانبعاثات بنسبة ٤٠% بحلول عام ٢٠٣٠ ونحو ٧٠ % بحلول عام ٢٠٥٠ مقارنة بانبعاثات عام ٢٠٠٨[٤٤]، مما يتطلب استخدام وقود ذي انبعاثات صفرية لتكوين ٥% من الطاقة بحلول عام ٢٠٣٠، و ٢٧ % بحلول عام ٢٠٣٦ ونحو ٩٣ % بحلول عام

[40])Alstom (2020), "Alstom to supply Italy's first hydrogen trains" Press Release .http://www.alstom.com/
[41])Railway Industry Association (2019), "RIA Electrification Cost Challenge. http://www.riagb.org.uk/
[42]) Altork L. N. & Busby J. R. (2010 Oct), Op. cit,
[43])International Maritime Organization (2018), "UN body adopts climate change strategy for shipping"، https://www.imo.org/
[44])Atilhan S .et al,.(2021), "Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry", ***Curr. Opin.Chem. Eng***, 31, 100668.

٢٠٤٦ كما يتبين من **الشكل رقم (3)**



شكل رقم (٢) نسبة استخدام وقود الهيدروجين الأخضر خلال الأعوام (٢٠٣٠)، (٢٠٣٦)، (٢٠٤٦).

Source: COP26 Climate Champions, UMAS.

بناء عليه، حدد رواد المناخ مصادر الطاقة المنخفضة والخالية من الكربون ذات الكثافة المرتفعة للطاقة التي ينبغي الاعتماد عليها من أجل تحقيق الهدف السابق، والتي شملت الهيدروجين الأخضر ومشتقاته مثل الأمونيا والميثانول، والهيدروجين الأزرق ومشتقاته ،أخيرا الوقود الحيوي المستدام. مع العلم أنه قد تم التأكيد على أنه من حيث قابلية التوسع في الاستخدام فإن الوقود المشتق من الهيدروجين سيكون لديه أكبر إمكانية طويلة الأجل للتوسع السريع في العقود التالية، وعليه يتطلب الأمر استخدام الوقود المعتمد على الهيدروجين الأخضر بنحو ٥ مليون طن بحلول عام ٢٠٣٠ ونحو ٩٠ مليون طن بحلول عام ٢٠٤٠[٤٥].

وفي سياق ذلك تم تأسيس مركز (Ballard) البحري خلال عام ٢٠١٩ والمخصص لهندسة وتصنيع وخدمة خلايا الوقود الهيدروجينية الثقيلة عديمة الانبعاثات للسفن البحرية. والتي تعمل بطاقة من ٢٠٠ كيلووات إلى ميغاواط من أجل أن تناسب مجموعة واسعة منها. كذلك قامت

[45] Five percent zero emission fuels by 2030 needed for Paris-aligned shipping decarbonization. (2021, March). Getting to Zero Coalition. https://www.globalmaritimeforum.org/

مجموعة من الشركات اليابانية مع إحدى شركات النقل الرائدة في العالم NYK Line (Nippon Yusen Kaisha) خلال عام ٢٠٢٠على مشروع لتسويق وتوريد سفن خلايا الوقود الهيدروجينية [٤٦]

ثالثا: النقل الجوي

يعد القطاع الجوي أحد أسرع المصادر نموًا لانبعاثات غازات الاحتباس الحراري. ففي عام ٢٠١٩، شكل الطيران حوالي ٣٪ من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المرتبطة بقطاع الطاقة على مستوى العالم، ونحو ١٢٪ من انبعاثات قطاع النقل[٤٧]. يشير تحليل (Waypoint 2050) للصناعة أن استخدام وقود الطيران المستدام بما في ذلك الهيدروجين الأخضر سيساهم بما يتراوح ما بين ٥٣ و ٧١ % من انخفاضات الانبعاثات اللازمة للوصول إلى صافي الصفر بحلول عام ٢٠٥٠. الجدير بالملاحظة أنه في مارس ٢٠٢٣ نجحت شركة (Universal Hydrogen) في القيام بأول رحلة تجريبية لطائرة إقليمية تعمل بخلايا وقود الهيدروجين خالية من الانبعاثات بأمريكا الشمالية. أطلق عليها اسم (Lightning McClean) تحمل على متنها ٤٠ راكبا ولمدة خمسة عشر دقيقة، بناء عليه تم التخطيط لتحويل محركات ٧٥ طائرة إقليمية تقليدية إلى محركات هيدروجين بحلول عام ٢٠٢٥[٤٨].

تأسيسا على ما تم عرضه، يمكننا استنتاج العلاقة النطرية بين اقتصاد الهيدروجين الأخضر وكيفية تعزيزه لأمن الطاقة وتحقيق النقل المستدام. فإذا كان الهيدروجين الأخضر المشتق من عملية التحليل الكهربائي من مصادر الطاقة المتجددة والذي يعمل كناقل للطاقة النظيفة والآمنة في كافة القطاعات الاقتصادية، ولا سيما في قطاع النقل من خلال استخدام تقنية خلايا الوقود الهيدروجينية التي تتميز بأنها أعلى كثافة للطاقة وأقل وزنا، واكثر قدرة على القيادة لمسافة أطول، سيعزز من تقليل الإعتماد على واردات الوقود الأحفوري مرتفعة الإنبعاثات متقلبة الأسعار، ومن ثم، الحد من مواجهة صدمات الأسعار، والتخفيف من المخاطر الجيوسياسية المتعلقة بها. فضلا عن خفض غازات الدفيئة والحفاظ على البيئة.

من جميع ما سبق، يتضح لنا مدى الحاجة إلى تغيير الطريقة التي نحصل بها حاليا على خدمات الطاقة من أجل تقليل اعتمادنا على الوقود الأحفوري غير المتجدد من جهة، ولتجنب تغير المناخ

[46])Hydrogen Council (2020), "Hydrogen in the Maritime Sector", https://wwwcdn.imo.org/
[47])Air Transportation Action Group (2021), "Facts and Figures" https://www.atag.org/
[48])Flying Magazine article (2023),"Universal Hydrogen Completes First Test Flight of Fuel Cell-Powered Airliner". https://newsroom.aviator.aero/

واثاره السلبية من جهة اخرى، ولعل ما تناولناه عن إمكانيات اقتصاد الهيدروجين في إستعادة أمن الطاقة بإعتبارة متطلبا رئيسيا لكافة الدول على مستوى العالم، خاصة وأن تحقيقه قد صار مبعث قلق في ظل صدمات أسعار الطاقة والصراعات الجغرافية – السياسية. فضلا عن دوره في تحقيق النقل المستدام، يساهم في تغيير السيناريوهات الحالية الخاصة بإمدادات الطاقة، واستهلاكها غير المستدام بيئيًا واقتصاديًا واجتماعيًا. والتي إذا استمر العمل بها بنفس الطريقة فسوف ننفق المزيد والمزيد مقابل طاقتنا، مما يؤدي حتما إلى حدوث اضطرابات وصراعات اجتماعية بالغة، ومن ثم، إنهيار اقتصادي مؤكد، جنبا إلى جنب مع حدوث تغير مناخي كارثي. مع العلم أن ثورة الطاقة التي نحتاجها ستكون مرتفعة التكلفة، غير أن هذه التكلفة ستتضاعف إذا لم نتخذ إجراءات فورية تستهدف تعزيز الانتقال إلى مستقبل منخفض الكربون. وبشكل عام، سيكون الإبتكار التكنولوجي أمرا حتميا من أجل خفض التكاليف، وتحسين أداء المحلل الكهربائي، وخلايا الوقود الهيدروجينية للتوسع في استخدامها والإستفادة منها في تحقيق نمو اقتصادي مستدام في كافة القطاعات الاقتصادية والخدمية.

٥ : مصر والهيدروجين الأخضر:

يستند المبدأ الاقتصادي للطاقة[٤٩] إلى المبدأ الذي يكون به قطاع الطاقة قادراً على تلبية كافة متطلبات التنمية الوطنية المستدامة من موارد الطاقة، وتعظيم الاستفادة الكفء من مصادرها المتنوعة، ولا سيما المتجدّدة منها، خاصة وأن هناك ارتباط شديد الصلة بين نجاح التنمية، وما يتم توفيره من طاقة باعتبارها المحرك الرئيسى لها.

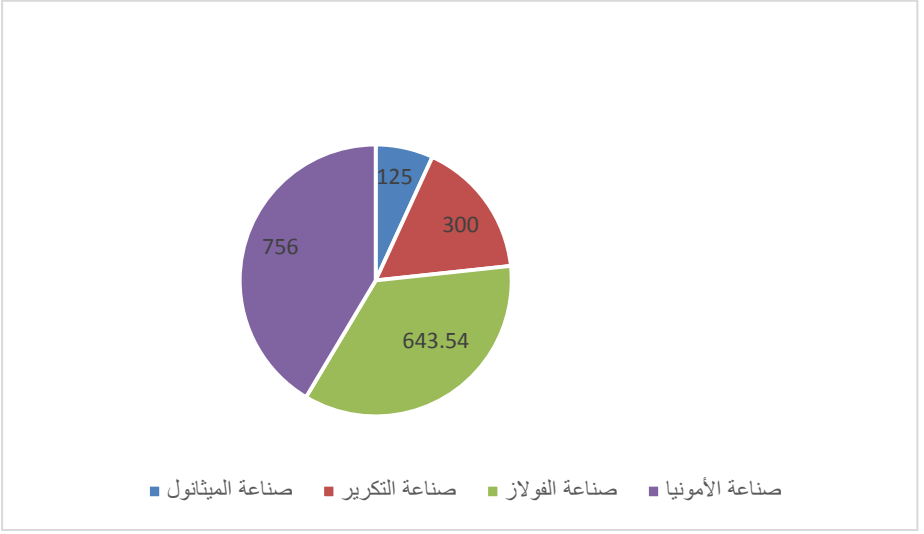
هذا وتعد مصر واحدة من بين أكبر دول الشرق الأوسط وشمال إفريقيا امتلاكا لمصادر الطاقة المتجددة. وواحدة من بين الدول الملتزمة بالاتفاقيات الدولية بشأن حماية البيئة وتقليل الانبعاثات الملوثة لها. لذا تسعى الدراسات الاقتصادية والبيئية بالدولة إلى تحديد الآليات المناسبة في مجال انتاج الطاقة المتجددة بصفة عامة، والهيدروجين الأخضر بصفة خاصة، من خلال تبني مجموعة من الخطط والمقترحات، فضلا عن توقيع عدد من المذكرات والاتفاقيات لتنفيذ مشروعات إنتاج الهيدروجين الأخضر وتصديره، من أجل تحقيق وتفعيل مبادىء الاستدامة فى عملية التنمية، والحفاظ على البيئة ومواردها فى مجال الطاقة.

[٤٩] وزارة التخطيط والمتابعة والإصلاح الإداري (٢٠١٧)، استراتيجية التنمية المستدامة : ***رؤية مصر ٢٠٣٠***، ص ٢٣.

ومما تجدر الإشارة إليه، أنه على الرغم من أنه يتم استهلاك كافة الهيدروجين الذي يتم إنتاجه حاليا في مصر على المستوى المحلي. إلا أنه لا تتوافر بيانات منتظمة كافية عن الهيدروجين الأخضر التي يمكن الاعتماد عليها في تقييم الوضع الحالي لهذه الصناعة على معدلات النمو الاقتصادي المصري[٥٠]. ولعل ما قامت به إحدى الدراسات من إجراء تقدير تقريبي لسوق الهيدروجين الحالي في مصر، يساعد الحكومة في اتباع السياسات الاقتصادية الملائمة لإتخاذ القرارات المناسبة لإنتاج وتسويق هذه الصناعة المهمة في وقتنا الحالي.

هذا وتعتمد مصر كغيرها من الدول المختلفة على الهيدروجين الرمادي في العديد من قطاعاتها الاقتصادية المختلفة. فقد أظهرت البيانات التقديرية لإحدى الدراسات الاقتصادية، أن كافة إنتاج مصر من الهيدروجين من الهيدروجين الرمادي، والذي يستخدم في الإنتاج المحلي لبعض الصناعات الإستراتيجية، كصناعة الأمونيا (لتصنيع الأسمدة النيتروجينية) والفولاز والميثانول، وتكرير البترول، ومسؤولة في الوقت ذاته في إطلاق نحو ١٦ مليون طن من ثاني أكسيد الكربون، أو ما قدر بنحو ٦ % من إجمالي الإنبعاثات الكربونية خلال نفس العام (٢٠١٩)، حيث بلغ إجمالي استهلاك/ إنتاج الهيدروجين الرمادي خلال عام ٢٠١٩ نحو (١.٨٢٤.٥٤٠) مليون طن مقسمة ما بين (٧٥٦) ألف طن لصناعة الأمونيا أوما نسبته نحو ٤١ %، ونحو (643.540) ألف طن لصناعة الفولاز أو ما نسبته نحو ٣٥%، ونحو (١٢٥) ألف طن لإنتاج الميثانول أوما نسبته نحو ٧%، ونحو (٣٠٠) ألف طن لتكرير البترول أوما نسبته نحو ١٦ %. كما يظهر من **الشكل رقم (٤)**.

[50])Habib A., Ouki M. (November 2021), "Egypt's Low Carbon Hydrogen Development Prospects" ***Oxford Institute for Energy Studies***, P. 5.



شكل رقم (٤): إجمالي الإنتاج والاستهلاك المقدر للهيدروجين الرمادي في مصر خلال عام ٢٠١٩.

Source: Habib A., Ouki M. (November 2021), ibid, P. 7.

بناء عليه، يعد الهيدروجين منخفض الإنبعاثات (الهيدروجين الأزرق) وكذلك الهيدروجين الأخضر، أحد الحلول المهمة التي ينبغي أن تعتمد عليها الحكومة المصرية، من أجل انخفاض الإنبعاثات الكربونية من القطاعات الاقتصادية التي من الصعب تخفيف انبعاثاتها كالصناعات السابق ذكرها. وعليه قامت الحكومة المصرية بإنشاء مركز إقليمي للطاقة الخضراء بالمنطقة الصناعية بالعين السخنة التابعة للمنطقة الاقتصادية لقناة السويس، بغرض اقامة مشروعات الهيدروجين الأخضر والأمونيا الخضراء، بميزانية أولية قدرت بنحو ١٠ مليار دولار. حيث تم إطلاق التشغيل التجريبي للمرحلة الأولى من مصنع الهيدروجين الأخضر بقدرة (١٠٠) ميجاوات بالمنطقة لإنتاج (١٥.٠٠٠) طن من الهيدروجين الأخضر كمادة وسيطة لإنتاج ما يصل إلى (٩٠.٠٠٠) طن من الأمونيا الخضراء سنويا. هذا بالإضافة إلى أنه تم التوقيع على عدد (٢٣) مذكرة تفاهم مع كبرى الشركات العالمية لإنتاج الهيدروجين الأخضر بإجمالي قدرات طاقة متجددة يصل إلى حوالي (٩٥) جيجاوات، نتيجة لما تملكه مصر من بنية تحتية تدعم تواجد هذه المشروعات.

يضاف إلى ما سبق، ما قامت به مصر من تبنيها لإستراتيجية توطين صناعة الهيدروجين الأخضر، مستهدفة بذلك أن تكون مصر من بين المراكز الأساسية لتصدير الهيدروجين الأخضر

ومشتقاته لكافة دول العالم، ولا سيما أوروبا من جانب، وأن تكون دولة جاذبة للإستثمارات في هذا المجال من جانب آخر.

تعتمد هذه الإستراتيجية على ثلاث محاور رئيسية وهما ١- تصنيع الوقود الأخضر من (هيدروجين أخضر، أمونيا خضراء، إيميثانول، ٢- توفير الصناعات المكملة لصناعات الهيدروجين الأخضر من (محللات كهربائية - ألواح شمسية - توربينات)، ٣- خدمات تموين السفن بالوقود الأخضر عن طريق الموانى التابعة للهيئة الاقتصادية لقناة السويس[٥١]. هذا مع العلم أن يتم الانتقال من المرحلة التجريبية والتي بدأت خلال عام ٢٠٢٠ الماضي، حيث وضع الأسس اللازمة لإنتاج سوق لتصدير الهيدروجين منخفض الكربون، فضلا عن تقديم الحوافز اللازمة لتشجيع المشروعات الدولية مع انشاء هيكل حوكمة مناسب، إلى المرحلة التوسعية بحلول عام ٢٠٣٠، والتي تستهدف زيادة تأمين مكانة السوق في اقتصاد الهيدروجين المتنامي، باستخدام التكاليف المنخفضة للهيدروجين لدعم إزالة الكربون على نطاق أوسع في مصر لتحل محل الهيدروجين الرمادي. أيضا زيادة قدرات مشروعات انتاج الهيدروجين ليصل بالجيجاوات فأكثر. أخيرا مرحلة التنفيذ الكامل وتكون بحلول عام ٢٠٤٠، والتي تستهدف الحفاظ على مكانة السوق في اقتصاد الهيدروجين منخفض الكربون، هذا بالإضافة إلى استخدامه مجتمعيا، من أجل دعم وتأمين إزالة الكربون في مصر ولا سيما، على مستوى القطاعات التي يصعب إزالة الكربون عنها كقطاعي الصناعة والنقل.

٦: النتائج والتوصيات

٦ -١ : النتائج: تتمثل أهم النتائج التي توصل إليها البحث بإيجاز فيما يلي:

- يطلق على الهيدروجين الأخضر "الهيدروجين النظيف". إذ تستخدم الكهرباء المولدة من مصادر الطاقة المتجددة في عملية إنتاجه (الطاقة المائية وطاقة الرياح). وعليه، فلا ينتج عنه أي انبعاثات كربونية ضارة (صفر كربون).
- يستطيع الهيدروجين الأخضر تخفيف الإنبعاثات الكربونية في القطاعات التي يصعب تخفيف انبعاثاتها مثل قطاعي الصناعة والنقل.
- يؤدي انتشار تقنيات الهيدروجين الأخضر في القطاعات الاقتصادية المختلفة إنشاء العديد من الوظائف الخضراء المستدامة.
- تتعد الإستخدامات الحالية للهيدروجين الأخضر ما بين مادة خام في بعض الصناعات مثل: صناعة السماد والمواد الكيميائية، أو لتوفير الحرارة في الصناعات كثيفة استهلاك الطاقة، مثل

[٥١]) هيئة الطاقة الجديدة والمتجددة (٢٠٢٢)، ***التقرير السنوي***، ص ٢٤.

صناعة الصلب، الأمونيا، وكطاقة كهربائية لتغذية الهواتف النقالة والحواسيب المحمولة وصناعة السيارات. هذا بالإضافة إلى التوقعات التي تشير إلى امكانية مساهمته في إنتاج الحديد والصلب، وبعض الصناعات الثقيلة كالمواد الكيميائية والأسمنت بحلول عام ٢٠٥٠.

- تتمتع تقنية خلايا وقود الهيدروجين (HFC) بإمكانيات هائلة لتحسين كفاءة الطاقة في قطاع النقل، فلا تقتصر استخدامات خلايا الوقود في الشاحنات والحافلات والسيارات فحسب، بل تتوسع استخداماتها لتشمل تشغيل السفن والقطارات الكهربائية، وغيرها.
- يختلف مفهوم أمن الطاقة من دولة إلى أخرى، ويتحدد حسب موقع الدولة منتجة كانت أم مستهلكة.
- يتمتع الهيدروجين الأخضر بالقدرة على تعزيز أمن الطاقة، وتأمين مصادرها بمعدلات كافية من أجل تلبية الطلب المستقبلي على الطاقة، وذلك من خلال زيادة إمدادات الطاقة المحلية، وامكانيات التخزين لفترة طويلة الأجل، ولا سيما، خلال الأوقات التي تتعرض لها الدول للأزمات المرتبطة بنقص الإمدادت.
- يظل الافتقار إلى إنشاء وتطوير البنية التحتية لإستخدام الهيدروجين الأخضر وتقنياته العائق الأكبر لإنتشاره.
- على الرغم من ارتفاع حجم التكاليف اللازمة لإنتاج تقنيات الهيدروجين الأخضر في الوقت الحالي. إلا أنه ووفقا لعدة عوامل من بينها زيادة القدرة التنافسية لتكاليف الإنتاج، ووفورات الحجم، فضلا عن الإبتكار التكنولوجي ومجموعة القوانين والمبادرات السياسية التي إتخذتها بعض الدول الكبرى، يتوقع أن يزداد الطلب على الهيدروجين الأخضر بنحو ١٤% من إجمالي الطلب العالمي المتوقع على الطاقة بحلول عام ٢٠٥٠.
- تسير مصر بخطوات متسارعة في تبني الخطط والمقترحات التي من شأنها إنتاج الهيدروجين الأخضر، وجذب المزيد من الإستثمارات الأجنبية في مجال إنتاج الطاقة المتجددة.

٦ – ٢ : التوصيات: في ضوء النتائج التي تم التوصل إليها تتمثل أهم التوصيات التي يمكن أن تساهم في توسع استخدام الهيدروجين الأخضر خلال الأعوام القليلة القادمة.

- يتعين على حكومات الدول المختلفة العمل على الحد من مخاطر الإستثمار في إمدادات الهيدروجين النظيف، من خلال توليد طلب مستمر في القطاعات التي يصعب تخفيف انبعاثاتها، ومن ثم، تحقيق خفض إضافي في التكاليف وزيادة الانتاج.

- ضرورة الإهتمام بتطوير البنية التحتية للهيدروجين الأخضر، وذلك من خلال انشاء أصول جديدة تتناسب مع الخصائص المختلفة للهيدروجين، أو من خلال إعادة استخدام البنية التحتية الحالية للغاز الطبيعي.
- ضرورة اتخاذ التدابير والإجراءات اللازمة لتسعير الكربون من أجل تحفيز الطلب التجاري على الهيدروجين النظيف
- العمل على تعزيز التعاون في البحث، والتطوير، والإبتكار، وتبادل المعرفة التي تعد ضرورية لخفض التكاليف، وزيادة القدرة التنافسية لتقنيات الهيدروجين بين كل من القطاعين العام والخاص.
- ينبغي أن تحصل الاقتصادات النامية على مساعدات مالية وفنية، حتى يتسنى لها الاستفادة من طفرة الهيدروجين الأخضر.

المراجع:

أولا المراجع باللغة العربية:

١) رشاد، سوزي (٢٠٢٢)، أمن الطاقة ومحاولات روسيا لفرض النفوذ الدولي، مجلة كلية السياسة والاقتصاد، العدد الثالث عشر.

٢) عبد العاطي، عمرو (٢٠١٤)، أمن الطاقة في السياسة الخارجية الأمريكية، المركز العربي للأبحاث ودراسة السياسات، الدوحة.

٣) محمد، خديجة عرفة (٢٠١٤)، امن الطاقة وآثاره الاستراتيجية ، جامعة نايف العربية للعلوم الامنية، الرياض، ص٥٢.

٤) وزارة التخطيط والمتابعة والإصلاح الإداري (٢٠١٧)، استراتيجية التنمية المستدامة : رؤية مصر ٢٠٣٠.

ثانيا: المراجع باللغة الإنجليزية

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 ٢٠٢٣, 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/