فرص وقود الهيدروجين في المنطقة العربية

I. مقدمة:

منذ سنوات عديدة، تسعى المفاوضات الدولية في اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ إلى الحد من ارتفاع درجة الحرارة بحيث تظل عند مستوى لا يشكل خطرًا على البشرية. أطلقت الحكومات في العديد من الدول المؤثرة، على مدار السنوات العشرين الماضية، الكثير من السياسات والبرامج لتقليل انبعاثات الغازات الدفيئة. وبالرغم من ذلك، لا تزال انبعاثات الغازات الدفيئة على مستوى العالم تتزايد جراء استهلاك وإنتاج السلع والخدمات الذي يتزايد بمعدل أسرع من الانخفاض في كثافة انبعاثات غازات الدفيئة من عملية الإنتاج [1].

مع زيادة الوعي بشأن البيئة حول العالم وزيادة الإقبال على استخدام مصادر الطاقة الصديقة للبيئة، يحظى الهيدروجين بفرصة كبيرة لأن يكون وقود المستقبل. فالهيدروجين يمثّل أحد أوجه حل معضلة تخزين الطاقة المولدة من المصادر المتجددة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح وذلك بسبب الطبيعة المتغيّرة لتوليد الكهرباء المتجددة والحاجة إلى تحقيق التوازن بين العرض والطلب في جميع الأوقات. حيث يمكن للهيدروجين أن يدعم التحول نحو نظام طاقة يعتمد على الطاقة المتجددة من خلال موازنة الطاقة المتجددة المتغيرة. يوفر الهيدروجين أيضا حلاً لإزالة الكربون من قطاعات الصناعة شديدة الانبعاثات التي تعتمد على الوقود الأحفوري، حيث لا يعد التحويل إلى الكهرباء خيارًا. لذلك يعتبر

الهيدروجين مكوّناً مركزياً في أي استراتيجية لتكامل أنظمة الطاقة للدول المختلفة، بل يعتبر الجزء المفقود في اللغز بالنسبة لاقتصاد خال تمامًا من الكربون.

فالهيدروجين أو ما يطلق عليه بـ "وقود المستقبل" يمكن إنتاجه بفعالية، ويمكن استخدامه كمصدر للكهرباء والحرارة ووقود النقل، والمواد الكيميائية المتخصصة، والإنتاج الصناعي وحتى لإنتاج مياه الشرب. وللهيدروجين الأخضر إمكانات هائلة لتوليد طاقة نظيفة يمكن أن تكون مستقلة عن شبكة التوزيع ولا مركزية، أو يمكن أن تغذي مباشرة شبكة المرافق الحالية خاصة أن التقدم في زيادة كفاءة التحويل لمعدات التحليل الكهربائي وتطوير تقنيات جديدة والضغط الاجتماعي من أجل حلول الطاقة الخضراء يدفع نحو استخدام متزايد للهيدروجين كناقل للطاقة. وهذا يمكن أن يتيح الانتقال من مصادر الطاقة الأحفورية إلى المصادر المتجددة

يبلغ الطلب العالمي الحالي على الهيدروجين في شكله النقي حوالي 70 مليون طن سنويًا. حيث يتم استخدام الهيدروجين المنتج في عدد من التطبيقات الرئيسية وهي تكرير النفط وإنتاج الأمونيا، خاصة بالنسبة للأسمدة وصناعة المواد الخام وإنتاج الميثانول وإنتاج الصلب، ويخصص ثلث الطلب على الهيدروجين اليوم لتلبية طلبات قطاع النقل بالمعنى الواسع – في المصافي والميثانول المستخدم في وقود المركبات وأقل من 0.01 مليون طن سنويًا من الهيدروجين النقي يستخدم في خلايا الوقود المستخدمة كوقود للسيارات ((Fuel Cell Electric Vehicles (FCEVs)) [2].

يعتبر إنتاج الهيدروجين صناعة راسخة ولديها عقود من الخبرة في قطاعات الصناعة التي تستخدم الهيدروجين كمادة وسيطة، حيث تبلغ قيمة سوق المواد الخام الهيدروجينية 115 مليار دولار أمريكي ومن المتوقع أن تنمو بشكل كبير في السنوات القادمة، لتصل إلى 155 مليار دولار أمريكي بحلول عام 2022 [2].

يتم إنتاج الهيدروجين حاليا بالكامل تقريبًا من الوقود الأحفوري، حيث يُستهلك 6% من الغاز الطبيعي العالمي و2% من الفحم العالمي لإنتاج الهيدروجين، وينتج عن هذا انبعاثات من غاز ثاني أكسيد الكربون تبلغ حوالي 830 مليون طن من سنويًا، وهو ما يعادل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون مجتمعة لكل من إندونيسيا والمملكة المتحدة. معظم هذه الانبعاثات يتم اطلاقها في الغلاف الجوي.

يتم إنتاج أقل من 0.7% من الهيدروجين في العالم حاليا باستخدام الطاقات المتجددة من خلال التحليل الكهربائي للماء (وهي العملية التي تنتج الهيدروجين من الماء والكهرباء) ويسمى الهيدروجين الناتج من هذه العملية بالهيدروجين الأخضر، وكذلك من محطات الوقود الأحفوري المجهزة بتقنيات تنقية

ثاني أكسيد الكربون قبل أن ينبعث منه مباشرة الى الهواء. يمكن تلخيص الفائدة الكبيرة المحتملة من استخدام وقود الهيدروجين باعتباره وقود "نظيف" لأن استخدام الهيدروجين كوقود لا ينتج عنه انبعاثات ثاني أكسيد الكربون أو غيره من الغازات الدّفيئة الأخرى (المنتوج الثانوي الوحيد هو الماء النقي). ولكن تقتصر ميزة كونه وقود نظيف صديق للبيئة على الاستخدام الفعلي للهيدروجين فقط، وليس على مرحلة إنتاجه الأولية. لأن استخدام الوقود الأحفوري في إنتاج الهيدروجين يبطل هذه الميزة. لذا فإن إنتاج الهيدروجين باستخدام مصادر الطاقة المتجددة هو الخيار الأفضل من أجل جني الفوائد البيئية كاملة.

ربما يقود ظهور اقتصادات الهيدروجين إلى تخفيض كبير في الطلب الدولي على مصادر الوقود التقليدية ومنها الفحم والغاز الطبيعي والنفط .وفي حين أن ذلك يعتبر مخاطرة كبيرة على أي دولة مصدرة للنفط وخاصة الدول العربية، فإنه قد يكون هناك أيضاً فرص استراتيجية أمام الدول العربية النفطية والغير نفطية للاستفادة الاقتصادية من هذا الطلب المستقبلي .ويقتضي الاستعداد الجيد وتحديد المكانة التي تتيح اتخاذ تدابير مبكرة في هذا الصدد أن يكون هناك تحليل منهجي ومتكامل لذلك [1].

فالدول العربية النفطية تواجه خطرًا كبيرًا متمثلًا في التضييق على الصادرات النفطية في حال نجاح ثورة تقنيات الهيدروجين في العقود المقبلة. في ذات الوقت، فإن الدول العربية تنعم بموارد وفيرة من الطاقة الشمسية والتي يمكن استخدامها بسهولة لإنتاج الهيدروجين الأخضر ومنخفض التكلفة على نطاق واسع .ولهذا من الضروري بأن تبادر الدول العربية بالبدء فورا في وضع السياسات والخطط للبدئ في استخدام تقنيات الهيدروجين وإنتاجه، وذلك في ضوء الخبرات الواسعة للمنطقة في استخدام الأنابيب والسفن لنقل المواد القابلة للاشتعال الأخرى .من المحتمل أن يستفيد المبادرون في هذا الاتجاه من تأثيرات الحجم ويصبحون رائدين في سوق الهيدروجين، وخصوصاً إذا كانت هناك تأثيرات تثبيت الأسعار لسلاسل الإمداد بالهيدروجين –بمعنى أن الدول المستوردة للهيدروجين ترغب في مواصلة الشراء من الموردين الذين لها خبرة تعامل طويلة معهم [1].

ففي أستراليا مثلا، يدور نقاش سياسي مكثف في السنوات الأخيرة حول التحول من تصدير الوقود الأحفوري إلى تصدير الهيدروجين. تدرك أستراليا جيدًا (وهي أكبر مصدر صافٍ للفحم في العالم حيث تصدر ما يقرب من 32 % من إجمالي صادرات الفحم في العالم) أن الفحم ليس له مستقبل على المدى البعيد، ولذلك تضخ استثمارات ضخمة في تطوير إنتاج الهيدروجين.

ختاما يمكن القول إن الهيدروجين قد يصبح أحد مصادر الطاقة المرشحة لتوفير حاجات العالم من الطاقة النظيفة، وأيضا تلبية المتطلبات العالية للدول الصناعية المتقدمة والمساهمة في سد الحاجة

المتزايدة للطاقة في الدول النامية بما في ذلك الدول العربية، والتوقعات المستقبلية لغاز الهيدروجين تبدو مشرقة فهو الوقود الأبدي الذي لا يفقد، كما أنه يعد الغاز الذي سيكون فعلا صديقا للبيئة مقارنة بالغاز الطبيعي.

II. الهيدروجين الأخضر: مفتاح إزالة الكربون

يعرّف الهيدروجين بأنه وقود حامل للطاقة عالي الجودة يمكن إنتاجه على نطاق واسع، من خلال المعالجة الحرارية والكيميائية للهيدروكربونات، مثل الغاز الطبيعي أو الفحم أو الكتلة الحيوية أو التحليل الكهربائي للماء باستخدام أي مصدر للكهرباء بما في ذلك مصادر الطاقة المتجددة، مثل الرياح أو الطاقة الشمسية أو الطاقة النووية. حيث يمكن استخدام الهيدروجين كمادة وسيطة أو وقود أو ناقل طاقة ووسيلة تخزين، وله العديد من التطبيقات الممكنة عبر قطاعات الصناعة والنقل والطاقة والمباني. والأهم من ذلك أنه لا ينبعث منه غاز ثاني أكسيد الكربون ولا يلوث الهواء عند استخدامه. لذلك، يعد تحقيق هدف الحياد المناخي لعام 2050 لكثير من الدول جزءًا مهمًا من الحل.

يعتبر عنصر الهيدروجين من أخف العناصر الكيميائية والأكثر وفرة في الكون، وهو غاز عديم الرائحة واللون والطعم وغير سام وقابل للاشتعال، ولا يوجد منفردا في الطبيعة، وفي العادة يكون متحداً مع عدد من العناصر ليشكّل مركبات كيميائية مختلفة، سواء كانت بالحالة الغازية كالغاز الطبيعي، أو سائلة كالماء والنفط، أو صلبة كالمركبات الكربونية المختلفة.

يتم إنتاج الهيدروجين من خلال مجموعة متنوعة من العمليات. ترتبط مسارات الإنتاج هذه بنطاق واسع من الانبعاثات، اعتمادًا على التقنيات ومصدر الطاقة المستخدم، ولها آثار مختلفة في التكاليف ومتطلبات المواد. فمصطلح "الهيدروجين المعتمد على الكهرباء" يشير إلى الهيدروجين المنتج من خلال التحليل الكهربائي للماء (من خلال جهاز تحليل كهربائي يعمل بالكهرباء)، بغض النظر عن مصدر الكهرباء. تعتمد انبعاثات غازات الاحتباس الحراري لدورة الحياة الكاملة لإنتاج الهيدروجين المعتمد على الكهرباء على كيفية إنتاج الكهرباء. فإنتاج الهيدروجين عن طريق التحليل الكهربائي، وهي عملية تستخدم الكهرباء لتقسيم الماء إلى هيدروجين وأكسجين. عند استخدام الطاقة المتجددة لهذه العملية، يصبح الهيدروجين ناقلًا مكملًا للطاقة المتجددة.

عموما، يمكن تصنيف الهيدروجين بناء على مصدر الطاقة المستخدم في إنتاجه أو على التقنية كما يلي:

- الهيدروجين الأخضر او المتجدد **(Renewable hydrogen or Green Hydrogen):** هو الهيدروجين الذي يتم إنتاجه من خلال التحليل الكهربائي للماء في جهاز تحليل كهربائي يعمل بالكهرباء الناتجة عن مصادر متجددة. دورة الحياة الكاملة لانبعاثات غازات الاحتباس الحراري لإنتاج الهيدروجين في هذه الحالة المتجدد قريبة من الصفر. في هذه الحالة يمكن تخزين الهيدروجين المنتج باستخدام فائض من الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح لاستخدامه لاحقًا - كوقود للنقل والصناعة والقطاعات الأخرى. كذلك يمكن استخدام إنتاج الهيدروجين كحمل "ذكي" لزيادة مرونة نظام الطاقة والمساعدة في إزالة الكربون من منظومة الاقتصاد الكلي.

- الهيدروجين المنتج من الوقود الأحفوري **(Fossil-based hydrogen):** يشير هذا المصطلح إلى الهيدروجين المنتج من خلال مجموعة متنوعة من العمليات التي تستخدم الوقود الأحفوري كمواد وسيطة، وبشكل أساسي إعادة تشكيل الغاز الطبيعي أو تحويل الفحم إلى غاز. يمثل هذا الجزء الأكبر من الهيدروجين المنتج اليوم في العالم. إن انبعاثات غازات الاحتباس الحراري في دورة الحياة من إنتاج الهيدروجين الأحفوري مرتفعة جدا [3].

- الهيدروجين المنتج من الوقود الأحفوري مع احتجاز الكربون **(Fossil-based hydrogen with carbon capture):** هو مثل الهيدروجين المنتج من الوقود الأحفوري، ولكن في هذا النوع من الإنتاج يتم التقاط الغازات الدفيئة المنبعثة كجزء من عملية إنتاج الهيدروجين. انبعاثات غازات الاحتباس الحراري من إنتاج الهيدروجين الأحفوري مع احتجاز الكربون أو الانحلال الحراري أقل من انبعاثات الهيدروجين القائم على الوقود الأحفوري فقط، ولكن يجب أن تؤخذ الفعالية المتغيرة لالتقاط غازات الاحتباس الحراري (بحد أقصى 90%) في الاعتبار [3].

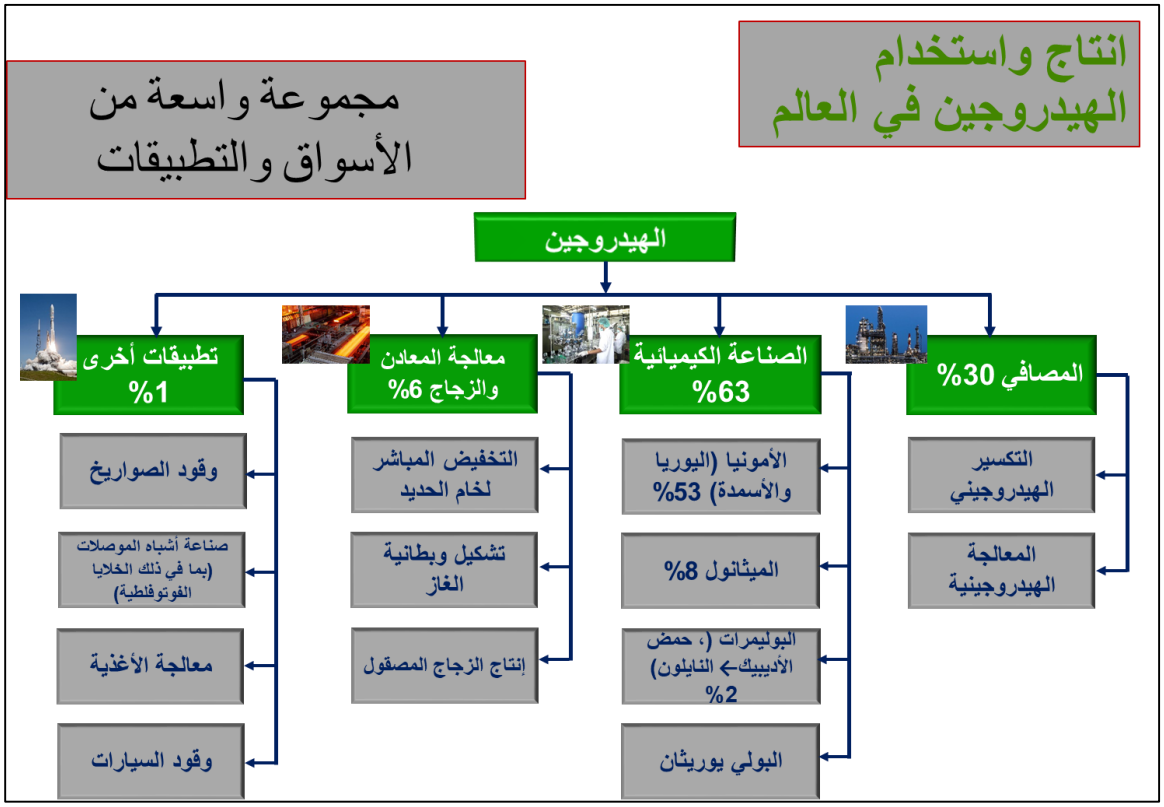
- الهيدروجين منخفض الكربون **(Low-carbon hydrogen):** وهو الهيدروجين المنتج من الوقود الأحفوري مع احتجاز الكربون والهيدروجين المنتج من التحليل الكهربائي ولكن مع تقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري خلال دورة الحياة الكاملة بشكل كبير مقارنة بإنتاج الهيدروجين الحالي.

- الوقود الاصطناعي المشتق من الهيدروجين **(Hydrogen-derived synthetic):** يشير هذا النوع إلى مجموعة متنوعة من الوقود الغازي والسائل على أساس الهيدروجين والكربون. لكي يتم

اعتبار الوقود الاصطناعي متجددًا، يجب أن يكون جزء الهيدروجين من الغاز الصناعي متجددًا. يشمل الوقود الاصطناعي على سبيل المثال الكيروسين الاصطناعي المستخدم في الطيران والديزل الصناعي للسيارات والمركبات المختلفة المستخدمة في إنتاج الكيماويات والأسمدة. يمكن أن يرتبط الوقود الاصطناعي بمستويات مختلفة جدًا من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري اعتمادًا على المواد الأولية والعملية المستخدمة. أما فيما يتعلق بتلوث الهواء، ينتج عن حرق الوقود الاصطناعي مستويات مماثلة من انبعاثات ملوثات الهواء مقارنة بالوقود الأحفوري.

يحظى الهيدروجين حالياً باهتمام متجدد مدفوعًا بالمخاوف المتزايدة بشأن الانبعاثات الكربونية وتغير المناخ ونوعية الهواء ودمج الطاقة المتجددة المتغيرة في نظام الطاقة. حيث أن كثير من الدراسات الحديثة المتعلقة بالطاقة تشير إلى أن إنتاج الهيدروجين – الذي أصبح ممكنًا بسبب الانخفاض السريع في تكلفة الطاقة المتجددة وتسريع التطورات التقنية – وتوسيع استخدامه في القطاعات حيث يمكن أن يحل محل الوقود الأحفوري.

يتميز غاز الهيدروجين بعدد من الخصائص الهامة التي تؤهله لأن يكون "وقود المستقبل"، فهو وقود نظيف وآمن بيئياً ولا يطلق غازات ضارة عند حرقه، ويمتلك طاقة عالية، لذلك يعد من المصادر المميزة للطاقة كوقود أو كناقل للطاقة في خلايا الوقود، حيث يمكن استخدامه سواء بشكل مباشر أو عند خلطه بالغاز الطبيعي بنسب محددة. حيث يمكن استعماله لإنتاج الطاقة بعدة طرق، منها استعماله لتشغيل محركات الاحتراق الداخلي للسيارات والمركبات والسفن والطائرات، أو في خلايا الوقود لإنتاج التيار الكهربائي، كما يستعمل الهيدروجين كوقود في المركبات الفضائية وصواريخ الدفع. إنَّ الهيدروجين – على عكس الوقودِ الأحفوريّ –لا يَنتجُ عنه انبعاثُ للغازاتِ الدفيئةِ أو تلوثُ الهواءِ عند استخدامه في المَركَبَات أو المباني التي تعملُ بخلايا الوقود (الشكل رقم 1).



الشكل رقم 1: إنتاج واستخدام الهيدروجين في العالم

III. إنتاج الهيدروجين في العالم الأن:

يمكن إنتاج الهيدروجين والحصول عليه من عدد كبير من المصادر وبطرق مختلفة، كالتحليل الكهربائي للماء أو من الغاز الطبيعي أو من الفحم. يتم استخراج معظم الهيدروجين المنتج حاليا من الوقود الأحفوري (الهيدروكربوني) بأنواعه المختلفة مع انتاج جزء بسيط من الكتلة الحيوية، أو من الماء، أو من مزيج من الاثنين معاً. يتم استهلاك 275 مليون طن مكافئ نفط من الطاقة لإنتاج الهيدروجين والذي يمثل حوالي 2% من إجمالي الطلب العالمي على الطاقة الأولية. فالغاز الطبيعي حاليًا هو المصدر الرئيسي لإنتاج الهيدروجين المخصص لصناعات الأمونيا والميثانول في المصافي، حيث يتم استهلاك 205 مليار متر مكعب من الغاز الطبيعي (6% من استخدام الغاز الطبيعي العالمي) وذلك لإنتاج حوالي 75% من الإنتاج العالمي من الهيدروجين. يأتي بعد ذلك الفحم – بسبب دوره المهيمن في الصين– بنسبة 23% من الإنتاج العالمي المخصص للهيدروجين ويستخدم 107 مليون طن من

الفحم (2% من استخدام الفحم العالمي). بينما النفط والكهرباء مسؤولان عن بقية الإنتاج من الهيدروجين بنسبة 2% من الإنتاج العالمي (الشكل رقم 2).

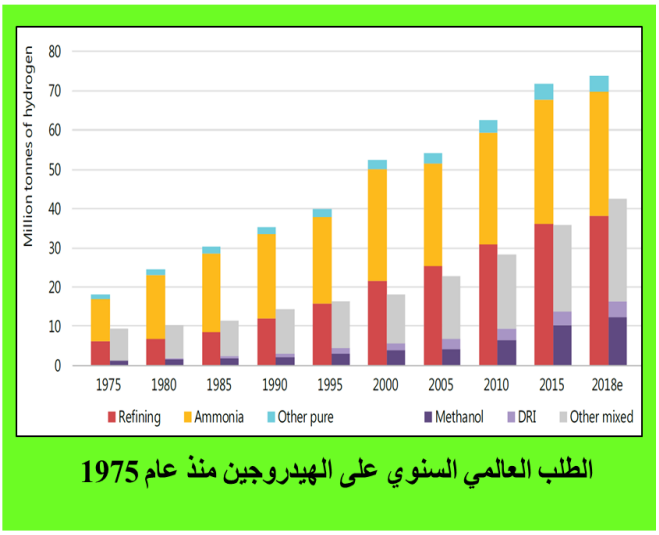
مما سبق يتبين أن حوالي 98% من الهيدروجين المنتج في العالم اليوم يتم استخراجه من الغاز الطبيعي والفحم والذي بدوره ينتج عنه انبعاثات كبيرة من ثاني أكسيد الكربون والغازات الدفيئة الأخرى، حيث يتولد عن كل طن من الهيدروجين المنتج 10 أطنان من ثاني أكسيد الكربون ($10\ tCO_2/tH_2$) عند استخدام الغاز الطبيعي و12 طن من ثاني أكسيد الكربون ($12\ tCO_2/tH_2$) باستخدام المنتجات النفطية و19 طن من ثاني أكسيد الكربون ($19\ tCO_2/tH_2$) عند استخدام الفحم في الانتاج. ينتج عن هذا تكون إجمالي لثاني أكسيد الكربون يبلغ حوالي 830 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون سنويًا، وهو ما يعادل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون مجتمعة لكل من إندونيسيا والمملكة المتحدة. معظم هذه الانبعاثات يتم اطلاقها في الغلاف الجوي [2].

تعد تقنية التحليل الكهربائي للماء لإنتاج الهيدروجين وهي عملية كهروكيميائية يتم فيها فصل الماء إلى هيدروجين وأكسجين إحدى التقنيات المستخدمة في إنتاج الهيدروجين وإن كانت مساهمتها عالميا أقل من 0.1% من إنتاج الهيدروجين العالمي إلا أنها تستخدم لإنتاج هيدروجين عالي النقاوة والذي يستخدم على سبيل المثال في صناعة الإلكترونيات والبولي سيليكون.

مع انخفاض تكاليف الكهرباء المنتجة من المصادر المتجددة لا سيما الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح، يتزايد الاهتمام حاليا بإنتاج ما يسمى **بالهيدروجين الأخضر (Green Hydrogen)** والذي يتم إنتاجه من مصادر الطاقات المتجددة باستخدام تقنية التحليل الكهربائي.

وفي هذا السياق وباعتبار أن كفاءة أنظمة التحليل الكهربائي اليوم تتراوح بين 60% و80% اعتماداً على نوع التقنية المستخدمة، فإن انتاج كل الهيدروجين في العالم اليوم (يقدر بـحوالي 70 مليون طن مكافئ نفط) من الكهرباء يحتاج الى طاقة كهربائية مقدارها 3710 تيراوات/ساعة، أي أكثر من إجمالي توليد الكهرباء السنوي للاتحاد الأوروبي. من هنا يظهر جلياً أن ارتفاع الأسعار هي أبرز التحديات التي تواجه إنتاج الهيدروجين من الكهرباء من ناحية ولكن نظرًا لتنوعه من حيث خيارات الإنتاج والتطبيق، فإن الهيدروجين لديه فرصة كبيرة جدًا للاضطلاع بدور رئيسي في نظام الطاقة المستدامة في المستقبل وفي الانتقال نحو ذلك من ناحية أخرى. يعتبر الهيدروجين أحد الخيارات الرائدة لتخزين الطاقة من المصادر المتجددة ويبدو أنه خيار فعال من حيث التكلفة لتخزين الكهرباء على مدار أيام

أو أسابيع أو حتى أشهر. يمكن للوقود الهيدروجيني نقل الطاقة من المصادر المتجددة عبر المسافات الطويلة – من المناطق ذات الموارد الشمسية والريحية الوفيرة إلى المدن المتعطشة للطاقة التي تبعد آلاف الأميال؛ وبذلك يمكن لصناعة وقود الهيدروجين "عن طريق ميزة التخزين" أن تزيد من مساهمة الطاقات المتجددة في خليط الطاقة للدول وذلك لما له من قدرة على المساعدة في التغلب على مشكلة الإنتاج المتغير أو المتقلب للطاقات المتجددة مثل الطاقة الشمسية الكهروضوئية والرياح، والتي لا يتناسب توافرها دائمًا مع الطلب.

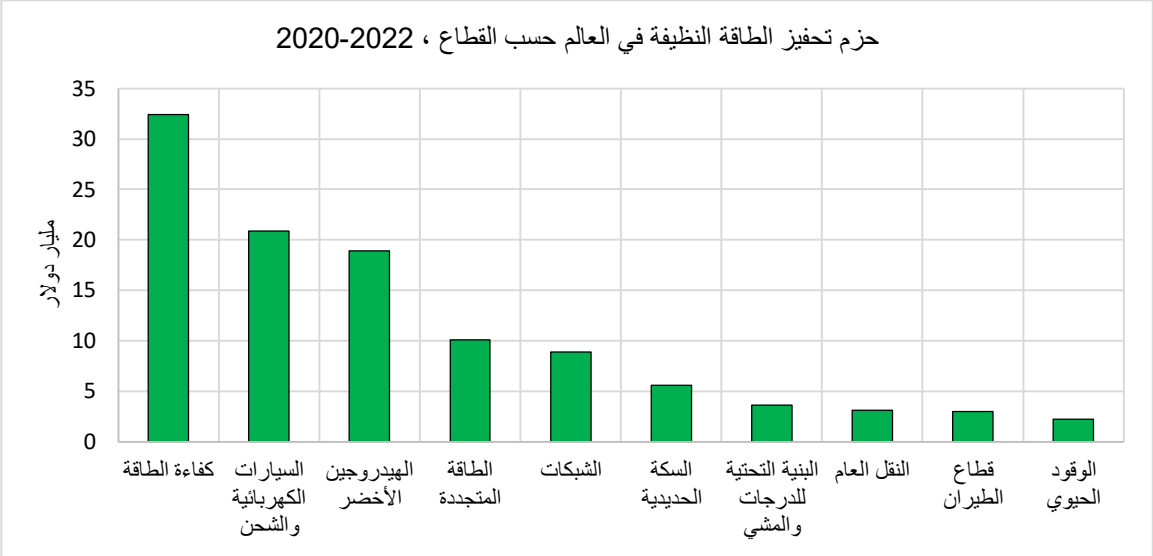


الطلب العالمي السنوي على الهيدروجين منذ عام 1975

- ينتج العالم سنويا 70 مليون طن من الهيدروجين النقي حيث يستخدم الجزء الأكبر منه في تكرير النفط وتصنيع الأمونيا للأسمدة
- يتم استخدام 45 مليون طن متري إضافي في صورة غير نقية في الصناعة دون فصل مسبق عن الغازات الأخرى.

الشكل رقم 2: نمو الطلب العالمي على الهيدروجين

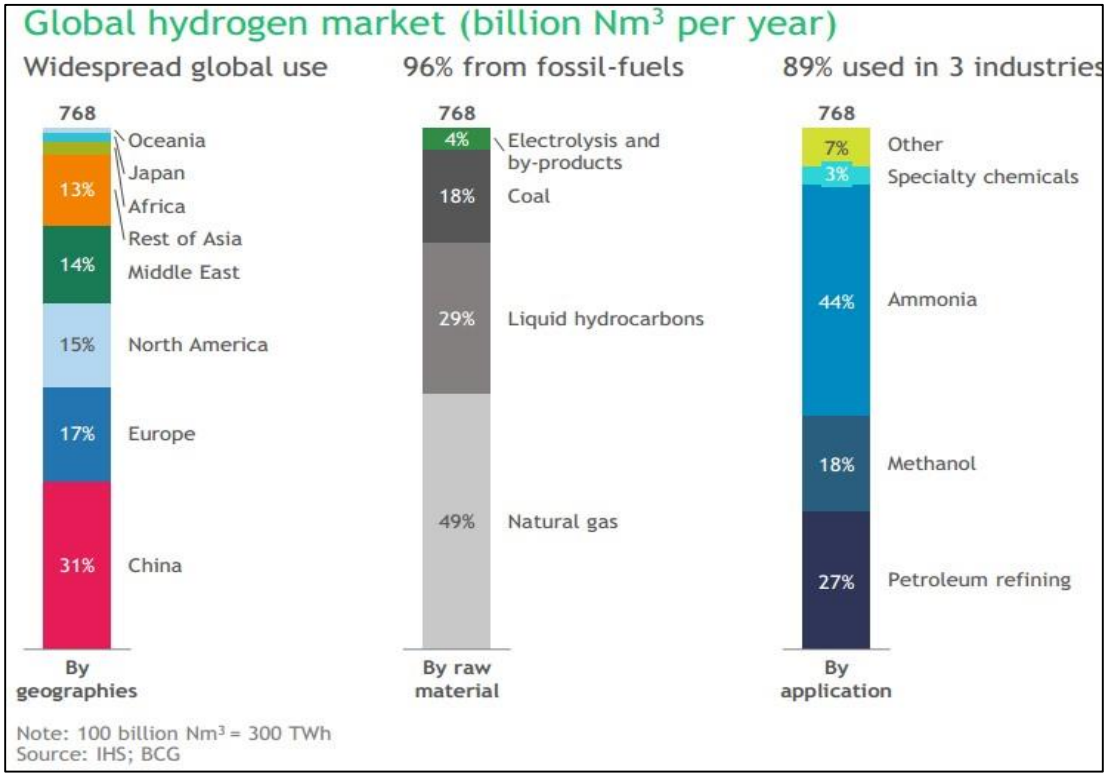
الشكل رقم 3 يوضح حزم تحفيز الطاقة النظيفة في العالم حسب القطاع للسنوات من 2020-2022، حيث يمكن رؤية ان الهيدروجين الاخضر يأتي في المرتبة الثالثة بعد برامج كفاءة الطاقة والسيارات الكهربائية من ناحية التمويل. من الواضح من الخطط قصيرة الأجل الموضوعة عالميا أن إنتاج الهيدروجين الأخضر سيكون من أولويات الدول المتقدمة في السنوات القليلة القادمة وخاصة مع وجود وفرة من مصادر الطاقة المتجددة رخيصة الثمن. ومع وجود خطط لبعض الدول باعتماد سياسات وخطط إزالة الكربون من منظومات إمداد الطاقة بها، سيصبح الهيدروجين الأخضر في ريادة مصادر الطاقة قريبا.



الشكل رقم 3: نمو الطلب العالمي على الهيدروجين [4]

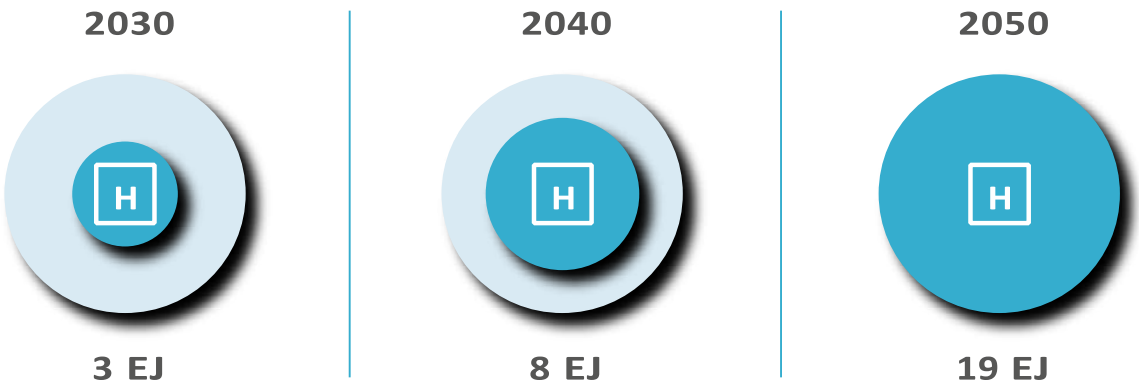
IV. نظرة عامة على حالة تقنيات الهيدروجين

صناعة الهيدروجين راسخة ولديها عقود من الخبرة في القطاعات الصناعية التي تستخدم الهيدروجين كمادة وسيطة (الشكل رقم 4). يمكن إنتاج الهيدروجين عبر عدة عمليات، مثل إعادة تشكيل الميثان بالبخار (Steam Methane Reforming-SMR)، تغويز الفحم (Coal Gasification)، إعادة تشكيل السوائل المتجددة باستخدام الإيثانول (renewable liquid reforming (using ethanol) والتحليل الكهربائي (Electrolysis.). يركز هذا الموجز على الهيدروجين المنتج من الكهرباء المتجددة من خلال التحليل الكهربائي، أي تحويل الطاقة المتجددة إلى الهيدروجين، وهو نظام يمكن استخدامه في أنظمة الطاقة ذات الحصص العالية من الطاقات المتجددة. يشير التحليل الذي قامت به الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA) [5] إلى أن إنتاج الهيدروجين بالكهرباء المتجددة يجب أن يصل إلى 19 أكساجول (19 EJ) في عام 2050، من أجل تحقيق أهداف تحويل الطاقة العالمية وإزالة الكربون (Decarburization) (الشكل رقم 5).



الشكل رقم 4: سوق الهيدروجين العالمي [6].

ملاحظة: يحتوي 1 أكساجول (1 EJ) على 7 ملايين طن أو 78 مليار متر مكعب من الهيدروجين الغازي. وهو ما يعادل 990 مليار وحدة حرارية بريطانية (BTU)، و278 تيراوات ساعة من الكهرباء، وتقريباً 170 مليون برميل نفط أو 290 مليار قدم مكعب من الغاز الطبيعي.



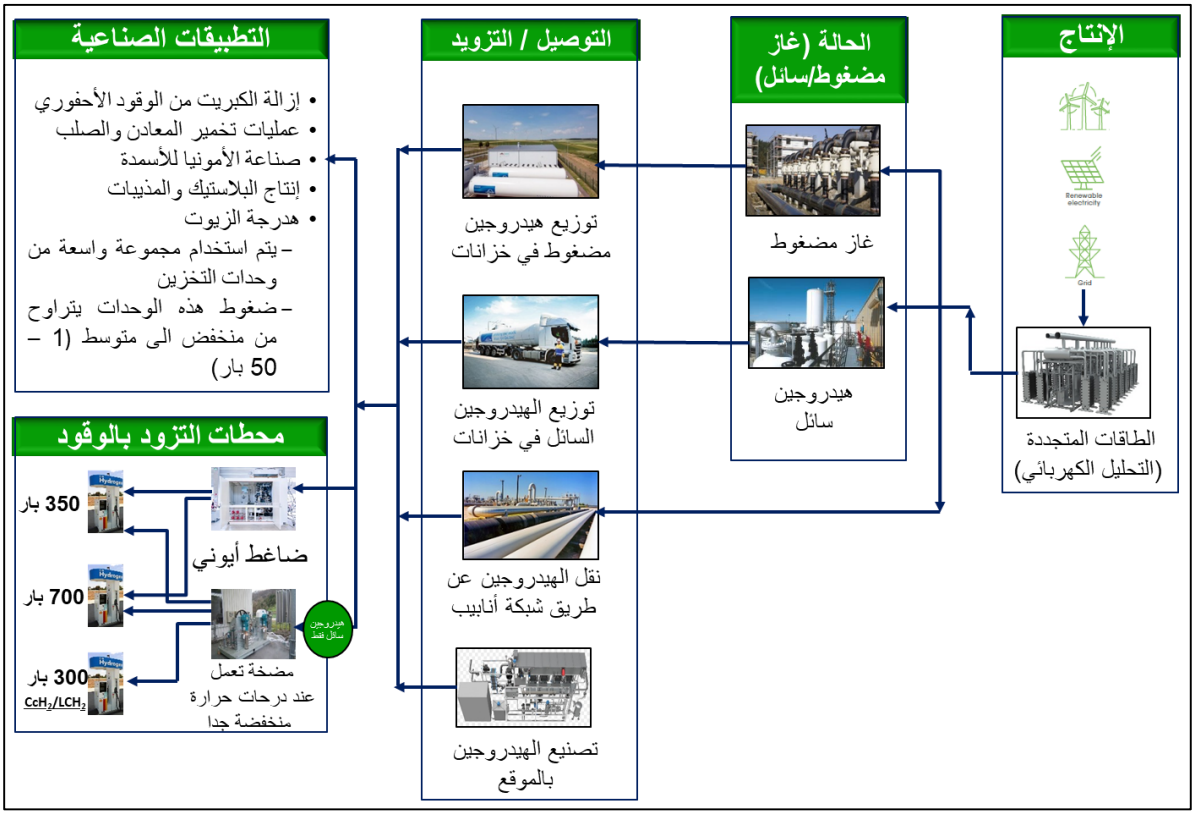
الشكل رقم 5: النمو في إنتاج الهيدروجين بالكهرباء المتجددة في السيناريو المتوافق مع اتفاقية باريس

يتم التحليل الكهربائي عن طريق جهاز يقسم الماء إلى هيدروجين وأكسجين باستخدام الكهرباء. عندما يتم استخدام الكهرباء المنتجة من مصادر الطاقة المتجددة في هذه العملية، يصبح الهيدروجين ناقلًا للطاقة المتجددة، ومكملاً للكهرباء. كما هو موضح في الجدول رقم 1، هناك ثلاثة أنواع رئيسية من المحلل الكهربائي: محلل كهربائي قلوي (Alkaline electrolyser)، محلل كهربائي بغشاء تبادل البروتون (Proton exchange membrane-PEM electrolyser)، والمحلل الكهربائي للأكسيد الصلب (Solid oxide electrolyser-SOE).

يمكن استخدام الهيدروجين المنتج أثناء عملية التحليل الكهربائي كوسيلة لتخزين الطاقة وللتطبيقات مثل إنتاج الحرارة للمباني وتزويد مركبات خلايا الوقود بالوقود وكمصدر للمواد الأولية للصناعة (الشكل رقم 5). من الاختلافات المهمة بين الهيدروجين والأشكال الأخرى لتخزين الطاقة أنه يمكن تخزين الهيدروجين ونقله عبر شبكة الغاز الطبيعي الحالية. هناك حاجة إلى القليل من الاستثمار لتكييف البنية التحتية للغاز الطبيعي لنقل الهيدروجين [5].

يعتبر الهيدروجين حلاً رئيسياً لخفض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري في القطاعات التي يصعب إزالة الكربون منها وحيث تكون الكهرباء صعبة أو مستحيلة. هذه هي حالة القطاعات الصناعية مثل إنتاج الصلب، أو النقل الثقيل على سبيل المثال. باعتباره ناقل طاقة خالٍ من الكربون، سيسمح الهيدروجين أيضًا بنقل الطاقة المتجددة عبر مسافات طويلة وتخزين كميات كبيرة من الطاقة.

يتمثل أحد التطبيقات الفورية في الصناعة في تقليل واستبدال استخدام الهيدروجين كثيف الكربون في معامل التكرير، وإنتاج الأمونيا، وللأشكال الجديدة من إنتاج الميثانول، أو استبدال الوقود الأحفوري جزئيًا في صناعة الصلب. يمتلك الهيدروجين القدرة على تشكيل الأساس لعمليات تصنيع الصلب الخالية من الكربون. في النقل، يعتبر الهيدروجين أيضًا خيارًا واعدًا حيث تكون الكهرباء أكثر صعوبة. على سبيل المثال في حافلات المدينة المحلية أو الأساطيل التجارية أو أجزاء محددة من شبكة السكك الحديدية. يمكن أيضًا إزالة الكربون من المركبات الثقيلة بما في ذلك الحافلات والمركبات ذات الأغراض الخاصة والشحن البري لمسافات طويلة باستخدام الهيدروجين كوقود. يمكن تمديد قطارات خلايا الوقود الهيدروجينية واستخدام الهيدروجين كوقود للنقل البحري في الممرات المائية الداخلية والشحن البحري القصير [3].



الشكل رقم 6: مبدأ إنتاج الهيدروجين من الطاقات المتجددة وتطبيقات استخدامه

الجدول رقم 1: وصف موجز لأجهزة التحليل الكهربائي [5]

	أنواع أجهزة التحليل الكهربائي		
	محلل الماء القلوي (Alkaline)	مولد الهيدروجين بغشاء تبادل البروتون Proton exchange membrane-PEM))	مولد الهيدروجين الأكسيد الصلب Solid oxide electrolyser-) (SOE
مدى نضج التقنية	التطبيقات التجارية	التطبيقات التجارية والصغيرة والمتوسطة الحجم لسعات أقل من 300 كيلوواط	في طور التطوير
وصف مختصر	• نقل أيون الهيدروكسيد عبر الإلكتروليت • يتم توليد الهيدروجين عند القطب السالب (الكاثود) • محلول قلوي سائل من الصوديوم أو هيدروكسيد البوتاسيوم يستخدم كمحلول إلكتروليت	• يتفاعل الماء عند القطب الموجب (الأنود) ويكوّن أيونات الأكسجين والهيدروجين (البروتونات) • تسري الإلكترونات من خلال دائرة كهربائية خارجية وتتحرك أيونات الهيدروجين بشكل انتقائي عبر غشاء تبادل البروتون PEM إلى القطب السالب (الكاثود).	• يتحد الماء في الكاثود مع الإلكترونات من دائرة كهربائية خارجية لتكوين غاز الهيدروجين وأيونات الأكسجين سالبة الشحنة • تمر أيونات الأكسجين عبر غشاء السيراميك الصلب وتتفاعل عند القطب الموجب (الأنود) لتكوين غاز الأكسجين وتوليد

		• **الإلكتروليت هو مادة بلاستيكية خاصة صلبة**	**الإلكترونات للدائرة الكهربائية الخارجية** • **مادة خزفية صلبة تستخدم كإلكتروليت**
درجة حرارة التشغيل	100-150 درجة مئوية	70-90 درجة مئوية	700-800 درجة مئوية
Sources: Bertuccioli et al., 2014; Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2018.			

الجدول رقم 2 يعرض عدد من الحقائق حول الوضع الراهن للهيدروجين الأخضر اليوم. نجد بوضوح أن تكاليف الإنتاج للهيدروجين الأخضر والهيدروجين المنتج من الوقود الأحفوري مع احتجاز الكربون أعلى بـــ 5 مرات من تكلفة الهيدروجين المنتج من الوقود الأحفوري. حيث تبلغ التكاليف المقدرة الحالية للهيدروجين المستخرج من الوقود الأحفوري حوالي 1.5 يورو/كجم وتعتمد بشكل كبير على أسعار الغاز الطبيعي. تبلغ التكاليف المقدرة للهيدروجين المستخرج من الوقود الأحفوري مع احتجاز الكربون وتخزينه حوالي 2 يورو/كجم، والهيدروجين الأخضر في حدود 6.7 يورو/كجم.

ومع ذلك، فإن تكاليف الهيدروجين الأخضر تنخفض بسرعة. لقد تم بالفعل تخفيض تكاليف أجهزة التحليل الكهربائية بنسبة 60٪ في السنوات العشر الماضية [3]، ومن المتوقع أن تنخفض إلى النصف في عام 2030 مقارنة باليوم مع وفورات الحجم. في المناطق التي تكون فيها الكهرباء المتجددة رخيصة، من المتوقع أن يكون الهيدروجين الأخضر (أجهزة التحليل الكهربائية) قادر على التنافس مع الهيدروجين المستخرج من الوقود الأحفوري في عام 2030.

الجدول رقم 2: حقائق أساسية حول الوضع الراهن للهيدروجين الأخضر [5]

الوصف	البيان
حصة الهيدروجين المنتجة من التحليل الكهربائي عالميا	يتم إنتاج 4 % من إمدادات الهيدروجين العالمية عن طريق التحليل الكهربائي (الباقي يعتمد على الوقود الأحفوري).
تكلفة إنتاج الهيدروجين من التحليل الكهربائي	• تكلفة إنتاج الهيدروجين من التحليل الكهربائي من خلال تقنية غشاء التبادل البروتوني PEM، في عام 2017: 6.7 يورو / كجم من الهيدروجين، احتمال الانخفاض إلى 4.1 يورو / كجم في عام 2025. (تقنية غشاء التبادل البروتوني هي الأنسب لتوفر المرونة بها) • من المتوقع أن تنخفض تكلفة رأس المال لمولدات الهيدروجين بتقنية غشاء التبادل البروتوني من 1200 يورو/كيلوواط (2017) إلى 700 يورو/ كيلوواط (2025). • من المتوقع أن تنخفض التكلفة الرأسمالية لمولدات الهيدروجين باستخدام محللات الماء القلوية من 750 يورو/كيلوواط (2017) إلى 480 يورو/كيلوواط (2025).
تكلفة البنية التحتية للهيدروجين (بما في ذلك الإنتاج والنقل والتوزيع)	• 8-10 دولار/ كجم (التقديرات الحالية) • 2-4 دولار/كجم (متوقع في المستقبل القريب)

الدول الرئيسية التي لديها مشاريع توليد الهيدروجين الأخضر	أستراليا والنمسا وكندا وتشيلي والدنمارك وفرنسا وألمانيا واليابان والمملكة المتحدة والولايات المتحدة
البلدان التي لديها أهداف لإدخال الهيدروجين في قطاع النقل	الصين وفرنسا وألمانيا وهولندا واليابان وكوريا والمملكة المتحدة والولايات المتحدة
توقع الطلب على الهيدروجين في المستقبل حسب القطاع	• العالم: سيزداد الطلب الإجمالي على الهيدروجين مما يقرب من 8 أكساجول الأن إلى 29 أكساجول في عام 2050. • أوروبا: من المتوقع أن تبلغ سعة أجهزة التحليل الكهربائي 2.8 جيجاوات بحلول عام 2025. • اليابان: تستهدف اليابان إنتاج 300000 طن في السنة بحلول عام 2030.

V. فرص وقود الهيدروجين في المنطقة العربية:

❖ من وضع الاستراتيجيات الوطنية إلى التعاون الإقليمي

أخذ استخدام الهيدروجين كوقود منخفض الكربون دورًا بارزًا بشكل متزايد في مناقشات الطاقة العالمية. ففي قمة أوساكا باليابان في عام 2019، أكد قادة مجموعة العشرين على أن تقنيات الهيدروجين ضرورية لتمكين تحولات الطاقة النظيفة على النحو المبين في تقرير وكالة الطاقة الدولية (The Future of Hydrogen). ومنذ أن نشرت اليابان استراتيجيتها الأساسية للهيدروجين في عام 2017، قامت العديد من الحكومات الأخرى - بما في ذلك إسبانيا وألمانيا وهولندا مؤخرًا، بالإضافة إلى المفوضية الأوروبية - بوضع استراتيجيات وخرائط طريق للهيدروجين. فمن المتوقع أن تؤدي أهداف الانبعاثات الصافية الصفرية في الأسواق الرئيسية العالمية إلى تسريع نشر مصادر الطاقة المتجددة بعد الاتحاد الأوروبي والعديد من الدول الأوروبية، أعلنت ثلاثة اقتصادات آسيوية كبرى مؤخرًا أهدافًا للوصول إلى صافي انبعاثات صفرية: اليابان وكوريا الجنوبية بحلول عام 2050 ، والصين بحلول عام 2060 في حين أنه من السابق لأوانه تقييم آثارها بدقة ، فمن المرجح جدًا أن تؤدي هذه الطموحات المعلنة إلى زيادة تسريع نشر مصادر الطاقة المتجددة في جميع القطاعات، مع احتمال حدوث تأثيرات كبيرة على الأسواق العالمية وخاصة فيما يتعلق بتكون سوق الهيدروجين. ففي عام 2025، من المقرر أن تصبح مصادر الطاقة المتجددة أكبر مصدر لتوليد الكهرباء في جميع أنحاء العالم، لتنهي خمسة عقود من الفحم كأكبر مزود للطاقة. بحلول ذلك الوقت، من المتوقع أن تزود مصادر الطاقة المتجددة ثلث الكهرباء في العالم - وستكون قدرتها الإجمالية ضعف حجم قدرة الطاقة الكاملة في الصين اليوم [6].

يمكن أن تصبح المنطقة العربية مساهماً رئيسياً في الدفع العالمي نحو الهيدروجين منخفض الكربون. تماشياً مع التطورات العالمية، تتخذ حاليا بعض الحكومات في المنطقة خطوات حاسمة لتعزيز إمكانات الهيدروجين كعنصر رئيسي في تحولات الطاقة النظيفة ومصدر لإيرادات الصادرات. في الاجتماع الوزاري العربي الثالث عشر للكهرباء (2019/11/05)، تم بحث أهمية الهيدروجين الأخضر في خليط الطاقة بالمنطقة العربية، أشار العديد من الوزراء إلى أهمية التوجه الى وقود الهيدروجين بصفة عامة كمرحلة انتقالية والهيدروجين الأخضر كهدف استراتيجي باعتباره ناقل طاقة واعدا لتحولات الطاقة على المدى الطويل في المنطقة. تأتي هذه الدراسة بناء على توصيات المجلس الوزاري العربي للكهرباء في هذا السياق.

يمكن للنهج التعاوني الإقليمي بين الدول العربية للهيدروجين أن يكمل المبادرات الوطنية، مما يسمح للبلدان بالتقاط أوجه التكامل في أنماط الطلب والإنتاج، وإطلاق العنان لأوجه التآزر في استخدام البنية التحتية وتطويرها. يتماشى هذا النهج مع مشروع الربط العربي للكهرباء وإنشاء السوق العربية المشتركة للكهرباء وما يصاحبها من مشاريع بنية تحتية للغاز الطبيعي. فعلى سبيل المثال يمكن حقن منظومات نقل الغاز الطبيعي الان مباشرة بما يعادل 5% من الهيدروجين دون إجراء أي تعديلات سواء على منظومات النقل او منظومات الاستخدام النهائي للغاز. هذا بدوره يوفر كمية ضخمة من السعات التخزينية للطاقات المتجددة بالدول العربية وذلك بعد تحويل الطاقة الكهربائية المنتجة بالمصادر المتجددة الى هيدروجين. بعد ذلك يمكن استخدام الهيدروجين عند الضرورة في تشغيل محطات القوى المختلفة لإنتاج الكهرباء في أوقات عدم توفر الطاقة المتجددة. من جهة أخرى ستعطي صناعة وقود الهيدروجين دفعة كبيرة للسوق العربية المشتركة للكهرباء وبالتالي فرصة كبيرة جدا لزيادة السعات المركبة من الطاقات المتجددة المختلفة. حيث يمكن لجميع الدول العربية تركيب سعات كبير من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح ونقلها وتسويقها عبر شبكة الربط لاستخدامها في إنتاج الهيدروجين الأخضر في الأماكن التي بها منشأت إنتاج الهيدروجين.

كذلك يتماشى هذا النهج أيضا مع المبادرات الأوربية لإنتاج الهيدروجين وخاصة المبادرة المسماة الهيدروجين الأخضر لصفقة أوروبية خضراء مبادرة 2*40 جيجاوات (**Green Hydrogen for a A 2x40 GW Initiative European Green Deal**) والتي سيتم عرض خارطة الطريق الخاصة بها لاحقا في هذه الدراسة.

حاليًا يقتصر إنتاج الهيدروجين واستخدامه في المنطقة العربية على عدد من البلدان، حيث يتم استخدامه بشكل أساسي كمواد وسيطة لمصافي التكرير والصناعة الكيميائية، كما هو الحال في أجزاء أخرى من العالم. ومع ذلك، فإن العديد من البلدان تمضي قدمًا في وضع استراتيجيات ومشاريع تجريبية لتعزيز استخدامها كناقل للطاقة. حيث أعلنت كل من السعودية والمملكة المغربية والامارات العربية المتحدة وسلطنة عمان عن برامجها في هذا المجال كما يلي:

أولا: مشروع نيوم في المملكة العربية السعودية

يعتبر مشروع نيوم أحد المشاريع الاستراتيجية لأجندة السعودية 2030 [7]، حيث سيتم إنشاءه على مساحة 26000 كيلومتر مربع وتقدر قيمة الاستثمارات بالمشروع بـــ 500 مليار دولار. سيتم تزويد نيوم بالطاقة المتجددة منخفضة التكلفة بنسبة 100% (40-60 جيجاوات). نظرًا لتوفر طاقة متجددة تنافسية ومنخفضة التكلفة، ستنتج نيوم الهيدروجين الأخضر على نطاق واسع للأسواق المحلية والعالمية. حيث سيتم بناء محطات للطاقة الشمسية وطاقة الرياح بسعة 4 جيجاوات لتزويد محطات انتاج الهيدروجين والأمونيا، لإنتاج 650 طن من الهيدروجين يوميا و1.2 مليون طن من الأمونيا سنويا.

خطط المملكة المغربية لتطوير وقود الهيدروجين

يمتلك المغرب القدرة على تطوير اقتصاد هيدروجين رائد عالميًا للطلب المحلي والتصدير. فالدول الأوروبية مهتمة بتطوير برنامج مشترك وتأمين هيدروجين أخضر تنافسي من المغرب. تقدر الوكالة الدولية للطاقة المتجددة أن شمال إفريقيا لديه إمكانات مجدية للطاقة الشمسية بما يقرب من 120 جيجاوات، مع 70 جيجاوات من الرياح وبقية الطاقة الشمسية الكهروضوئية والطاقة الشمسية المركزة بحلول عام 2030. هذه الإمكانات الضخمة من الطاقات المتجددة يمكن استخدام جزء كبير منها في صناعة وقود الهيدروجين. يمكن أن يحل الهيدروجين الأخضر التنافسي المنتج في شمال إفريقيا محل الوقود الأحفوري، مما يعود بالفائدة على كل من المستوردين (المغرب وتونس) والمصدرين (الجزائر وليبيا).

حاليا توفر شمال إفريقيا 13% من طلب أوروبا على الغاز الطبيعي و10% من الطلب على النفط. يتم إرسال أكثر من 60% من صادرات النفط والغاز في شمال إفريقيا إلى أوروبا [8].

أهم الأعمال التي قامت بها المملكة المغربية هذا الاتجاه

- إنشاء اللجنة الوطنية للهيدروجين الأخضر، التي تجمع بين الجهات الفاعلة العامة والخاصة [9].
- إطلاق دراسة لتطوير خارطة طريق الهيدروجين الأخضر، والتي من المقرر الانتهاء منها في مايو 2020 [9].
- جاري العمل على إنجاز مشروع تجريبي لإنتاج الأمونيا الخضراء.
- تطوير برنامج متكامل لإنتاج الأمونيا الخضراء من خلال إعادة نشر الطاقات المتجددة.

الامارات العربية المتحدة

دولة الإمارات العربية المتحدة هي فعلًا إحدى الدول الرائدة في الشرق الأوسط في هذا المجال، حيث تم إنشاء أول محطة للتحليل الكهربائي للهيدروجين من الطاقة الشمسية في دبي، والدولة لديها أسطول متنامي من المركبات الكهربائية التي تعمل بخلايا الوقود. وبما أن دولة الإمارات العربية المتحدة نجحت في تخفيض تكلفة الطاقة الشمسية، فإن الدولة ستكون في موقع ممتاز يؤهلها لتحقيق أقل تكلفة على مستوى العالم لإنتاج الهيدروجين من المصادر الخضراء.

في شهر فبراير 2019، بدأ إنشاء أول محطة للتحليل الكهربائي للمياه بالطاقة الشمسية في الشرق الأوسط في دبي، والتي تشغلها هيئة كهرباء ومياه دبي وبطاقة سنوية قدرها 250 طناً، وهي تعتمد على تقنيات من إنتاج شركة سيمنس الألمانية. سيتم استخدام مركبات تعمل بخلايا الوقود باستخدام الهيدروجين الناتج من هذه المحطة في معرض الإكسبو 2020 والذي تم تأجيل انطلاقه بسب كوفيد-19 الى سنة 2021. كذلك افتتحت أول محطة لتعبئة الهيدروجين في الشرق الأوسط في دبي في أكتوبر 2017 [1].

سلطنة عمان

تم إطلاق مركز جديد للهيدروجين يهدف إلى بناء اقتصاد حول "الهيدروجين الخضر" في بداية العام 2020، والخطط جارية لتأسيس منشأة لإنتاج الهيدروجين بسعة 500 ميجاوات.

❖ **فرصة كبيرة في المنطقة العربية لتصدير الهيدروجين على نطاق واسع**

يتمتع الاتحاد الأوروبي مع شمال إفريقيا وأوكرانيا والدول المجاورة الأخرى بفرصة فريدة لتحقيق نظام هيدروجين أخضر. أوروبا بما في ذلك أوكرانيا لديها موارد طاقة متجددة جيدة، بينما تتمتع شمال إفريقيا بموارد رائعة ووفيرة. يمكن لأوروبا إعادة استخدام بنيتها التحتية للغاز مع منظومات نقل الغاز من شمال إفريقيا ودول أخرى لنقل وتخزين الهيدروجين.

توجد في أوروبا موارد جيدة من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، خاصة في شمال وجنوب أوروبا. في المناطق المجاورة لشمال إفريقيا والشرق الأوسط، توجد مصادر أفضل للطاقة الشمسية وطاقة الرياح أيضًا. ومع ذلك، فإن المناطق ذات الموارد الجيدة تكون عادة بعيدة عن الطلب على الطاقة في المواقع الصناعية والمدن في أوروبا. يوفر التحويل إلى الهيدروجين باستخدام الكهرباء المنتجة من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح الفرصة لنقل كهرباء الطاقة الشمسية وطاقة الرياح عبر مسافات كبيرة، ورخيصة نسبيًا وبدون خسائر.

في شمال إفريقيا، تعد موارد الطاقة الشمسية أفضل وأكثر وفرة مما عليه في جنوب أوروبا. الصحراء الكبرى هي أكثر مناطق العالم إشراقًا على مدار العام. إنها مساحة كبيرة (تبلغ 9.4 مليون كيلومتر مربع أكثر من ضعف حجم الاتحاد الأوروبي) وتتمتع، في المتوسط، بـ 3600 ساعة من أشعة الشمس سنويًا وفي بعض المناطق 4000 ساعة [10]. بذلك تصل مستويات الإشعاع الشمسي في هذه المناطق من 2500 إلى 3000 كيلو واط ساعة لكل متر مربع سنويًا. جزء صغير (8-10% من مساحة الصحراء الكبرى يمكن أن يولد الطلب العالمي على الطاقة بالكامل [8].

- **استراتيجيات الاتحاد الأوروبي لتكامل أنظمة الطاقة والهيدروجين**

يشير مبدأ تكامل نظام الطاقة إلى تخطيط وتشغيل نظام الطاقة "ككل" كوحدة واحدة عبر العديد من شركات الطاقة وشركات البنى التحتية وقطاعات الاستهلاك المختلفة مثل النقل والصناعة، بحيث يتم تكوين روابط أقوى بينها بهدف تقديم خدمات طاقة منخفضة الكربون وموثوقة وفعالة في استخدام الموارد بأقل تكلفة ممكنة. إن تكامل نظام الطاقة هو الطريق نحو الاستغناء عن الوقود الكربوني بشكل فعال وبأسعار معقولة وعميقة للاقتصاد الأوروبي. على سبيل المثال، هذا يعني نظامًا حيث يمكن

للكهرباء التي تغذي سيارات أوروبا أن تأتي من الألواح الشمسية على المركبة على الأسطح، في حين يتم تدفئة المباني باستخدام الطاقة الحرارية الناتجة من مصنع قريب والتي في العادة يتم التخلص منها، ويتم تشغيل المصنع بواسطة الهيدروجين النظيف المنتج من طاقة الرياح والطاقة الشمسية.

لذلك أعلنت المفوضية الأوروبية أن استراتيجيات الاتحاد الأوروبي الخاصة بتكامل أنظمة الهيدروجين والطاقة ستضع أجندة جديدة للاستثمار النظيف، حيث يمكن لاستراتيجية الهيدروجين في الاتحاد الأوروبي أن تدفع الى انشاء محطات بسعة اجمالية تصل لـ 120 جيجاوات من الطاقة المتجددة لتوليد الطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل أجهزة التحليل الكهربائي لإنتاج الهيدروجين. فقد حددت المفوضية الأوروبية خطة استثمارية بقيمة تصل إلى 340 مليار يورو لمشاريع الطاقة الشمسية وطاقة الرياح الجديدة على مدى العقد المقبل، مع تصور استراتيجية للثلاثين عامًا القادمة يتم إنفاق خلالها ما يصل إلى 470 مليار يورو على قدرات التحليل الكهربائي الخاصة بإنتاج الهيدروجين الأخضر.

تحدد استراتيجية تكامل نظام الطاقة رؤية حول كيفية تسريع الانتقال نحو نظام طاقة أكثر تكاملاً، لدعم الطاقة النظيفة واقتصاد محايد مناخياً (Climate Neutrality) مع تعزيز أمن الطاقة وحماية الصحة والبيئة وتعزيز النمو. تحدد الاستراتيجية عدد من الإجراءات المطلوبة لتنفيذ الإصلاحات اللازمة، وتشمل هذه:

- مراجعة تشريعات الطاقة الحالية، والدعم المالي ونشر التقنيات والأدوات الرقمية الجديدة، والتخلص التدريجي من إعانات ودعم الوقود الأحفوري، وإصلاح إدارة السوق، والتخطيط الشامل للبنية التحتية، وتوفير المعلومات للمستهلكين.
- تتطلب الاستراتيجية من الهيئات التشريعية في الاتحاد الأوروبي ضمان إرساء سياسة الهيدروجين في قوانين المناخ والطاقة، واستخدام تصنيفات ومصطلحات موحدة، وأن يتم تطبيق الشهادات والمعايير المشتركة القائمة على انبعاثات الكربون لدورة الحياة.
- تعهدت المفوضية بضمان إدراج الهيدروجين النظيف في جميع أدوات الاستثمار الخضراء التي يقدمها الاتحاد الأوروبي. ومع ذلك، اقرت الاستراتيجية بأن بعض "الهيدروجين الأزرق" – المولّد من الغاز الطبيعي ومع الانبعاثات التي يتم تعويضها عن طريق احتجاز الكربون وإعادة استخدامه وتخزينه – سيكون ضروريًا لإنشاء سوق مبدئي في المراحل الأولى.

- سيتم تكليف تحالف الهيدروجين الأوروبي النظيف الذي يضم قادة الصناعة والمجتمع المدني وصانعي السياسات وبنك الاستثمار الأوروبي ببناء خط أنابيب للاستثمار في الهيدروجين والطلب على مصدر الطاقة وبتطوير قائمة من المشاريع الملموسة لدعم جهود إزالة الكربون من الصناعات الأوروبية كثيفة الاستخدام للطاقة مثل الفولاذ والمواد الكيميائية.
- سيتطلب هذا الانتقال التدريجي نهجًا مرحليًا كما يلي:

1. الفترة الزمنية 2020–2024: خلال هذه الفترة سيدعم الاتحاد الأوروبي تركيب ما لا يقل عن 6 جيجاوات من أجهزة التحليل الكهربي لتوليد الهيدروجين الأخضر في دول الاتحاد، وإنتاج ما يصل إلى مليون طن من الهيدروجين الأخضر [11].

2. الفترة الزمنية 2025–2030: التركيز على جعل وقود الهيدروجين جزءًا جوهريًا من نظام الطاقة المتكامل، مع تركيب ما لا يقل عن 40 جيجاوات من أجهزة التحليل الكهربائي لتوليد وإنتاج ما يصل إلى عشرة ملايين طن من الهيدروجين الأخضر في الاتحاد الأوروبي.

3. الفترة الزمنية 2030–2050: يجب أن تصل تقنيات الهيدروجين الأخضر إلى مرحلة النضج وأن يتم نشرها على نطاق واسع عبر جميع القطاعات التي يصعب التخلص منها.

العناصر الرئيسية لهذه الاستراتيجية [12]

تم بناء الاستراتيجية على ثلاثة عناصر متكاملة ومكملة لبعضها البعض كما يلي:

- نظام طاقة أكثر دائرية (Circular Energy System)، حيث لا يتم إهدار الطاقة وتكون كفاءة الطاقة هي الاعتبار الأول. ستحدد الاستراتيجية الإجراءات الملموسة لتطبيق مبدأ "كفاءة الطاقة أولاً" في الممارسة العملية واستخدام مصادر الطاقة المحلية بشكل أكثر فعالية في المباني وحياة المجتمعات. من الأمثلة على ذلك، تسهيل إعادة استخدام الحرارة المفقودة من

المواقع الصناعية وفي إعادة استخدام حرارة النفايات من المواقع الصناعية والطاقة المنتجة من النفايات البيولوجية أو في محطات معالجة مياه الصرف الصحي.

- استخدام الكهرباء النظيفة المنتجة من المصادر المتجددة وزيادة كهربة قطاعات الاستخدام النهائي. نظرًا لأن قطاع الطاقة لديه أعلى حصة من مصادر الطاقة المتجددة، لذا يجب استخدام الكهرباء بشكل متزايد حيثما أمكن ذلك: على سبيل المثال استخدام مضخات الحرارة (Heat Pumps) في المباني واستخدام السيارات الكهربائية في النقل أو الأفران الكهربائية في صناعات معينة. وستكون من بين النتائج المرئية، شبكة من مليون نقطة شحن للسيارات الكهربائية، إلى جانب التوسع في الطاقة الشمسية وطاقة الرياح. بمعنى أخر، ضرورة توسيع استخدام الكهرباء النظيفة لتشمل المزيد من المجالات مثل المباني والصناعة والنقل، والتي حاليا تعتمد تقليديًا على الوقود الأحفوري.
- الترويج للوقود المتجدد والمنخفض الكربون، بما في ذلك الهيدروجين والوقود الحيوي المستدام والغاز الحيوي، وخاصة للقطاعات التي يصعب التخلص فيها من الوقود الأحفوري مثل قطاع النقل الثقيل والصناعة. سيتم ذلك عن طريق استخدام إمكانات الكتلة الحيوية والوقود الحيوي المستدام، والهيدروجين الأخضر، والوقود الاصطناعي من النفايات واحتجاز الكربون وتخزينه واستخدامه.

ستكون الاستراتيجية داعمة بشكل كبير للمستهلكين، حيث ستوفر معلومات واضحة يسهل الوصول إليها بشأن الحلول الأنظف والخيارات الصديقة للمناخ في السوق، مما يتيح ويشجع استخدام الطاقة بشكل أكثر ذكاءً واستدامة. ستعتمد الاستراتيجية كذلك على زيادة استخدام المنظومة الرقمية لربط المستهلكين والمنتجين ومشغلي أنظمة الطاقة مع بعضهم البعض.

ستقترح المفوضية إجراءات وتدابير تنظيمية لبعث الثقة لدى المستثمرين في مجال الهيدروجين الأخضر، ومن ثم تسهيل امتصاص الهيدروجين المنتج، وتعزيز البنية التحتية الضرورية وشبكات النقل، وتكييف أدوات تخطيط البنية التحتية، ودعم الاستثمارات.

- **"مبادرة الهيدروجين الخضراء 2 × 40 جيجاوات"**

القدرة المركبة لأجهزة التحليل الكهربائي للمياه اليوم في الاتحاد الأوروبي محدودة للغاية. في السنوات الماضية، بذلت شركات إنتاج أجهزة التحليل الكهربائي جهدًا هائلاً، بدعم من الاتحاد الأوروبي، لخفض التكلفة، وزيادة الكفاءة، وزيادة حجم وحدات هذه الأجهزة، وبناء أحجام إنتاجية كبيرة. ولكن من أجل زيادة خفض التكلفة وتطوير صناعة أجهزة تحليل كهربائية قوية وتنافسية، لابد من توسيع نطاق سوق أجهزة التحليل الكهربائية. في هذا السياق تم إنشاء مبادرة لإنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام تقنية التحليل الكهربائي بسعة كلية 80 جيجاوات حتى عام 2030، موزعة بالتساوي بين **دول الاتحاد الأوربي ودول شمال أفريقيا**، بحيث يتم إنشاء محطات بدول الاتحاد الأوروبي بسعة 40 جيجاوات أي ما يعادل 173 تيراوات ساعة لإنتاج 4.4 مليون طن من الهيدروجين الأخضر وهو ما يشكل ربع احتياجات الاتحاد الأوربي سنة 2030، وأخرى في منطقة شمال أفريقيا وأوكرانيا وهي أيضا بسعة 40 جيجاوات لتزويد السوق الأوربية بـــ 3 مليون طن من الهيدروجين أو 118 تيراوات ساعة، بما يعادل 17% من احتياجات دول الاتحاد الأوربي سنة 2030. سيتم كذلك إنتاج الأمونيا للاستخدام المحلي بدول شمال افريقيا [13].

خارطة الطريق لإنتاج الهيدروجين الأخضر بدول التحاد الأوربي بسعة 40 جيجاوات حتى عام 2030 [13]

بلغ الطلب الأوروبي على الهيدروجين في عام 2015 حوالي 325 تيراوات ساعة، ويستخدم بشكل رئيسي في المصافي وفي الصناعات الكيماوية والزراعية لإنتاج الميثانول والأمونيا. يتم إنتاج معظم الهيدروجين المستخدم في هذه الصناعات حاليًا من الغاز الطبيعي من خلال إعادة تشكيل غاز الميثان بالبخار.

تلتزم صناعة الهيدروجين الأوروبية بتطوير صناعة وسوق أجهزة التحليل الكهربائي قوي ورائد عالميًا والالتزام بإنتاج الهيدروجين المتجدد بتكلفة متساوية وفي النهاية أقل تكلفة من الهيدروجين منخفض الكربون (الأزرق). والشرط الأساسي لذلك هو أن يتطور سوق أجهزة التحليل الكهربائي بإنشاء 80 جيجاوات من مولدات الهيدروجين في الاتحاد الأوروبي والدول المجاورة له (شمال إفريقيا وأوكرانيا) حتى عام 2030.

يوضح الجدول 1 خارطة طريق لتطوير قدرة أجهزة التحليل الكهربائي بسعة 40 جيجاوات في الاتحاد الأوروبي بحلول عام 2030.

جدول رقم 3: خارطة الطريق لبناء أجهزة تحليل كهربائية لتوليد الهيدروجين بسعة 40 جيجاوات في دول الاتحاد الأوروبي 2030 [13]

سعة جهاز التحليل	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	**الإجمالي 2030**
السوق المحلية [ميجاوات]												**6000**
الكيماويات	5	20	45	130	200	200	250	300	350	400	450	2350
المصافي	10	40	50	100	100	100	200	200	300	300	400	1800
الصلب			20	30	50	100	100	100	100	150	150	800
الزجاج والسيراميك		10	20	30	40	50	50	50	50	50	50	400
محطات وقود الهيدروجين	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	100	650
سوق الهيدروجين [ميجاوات]												**34000**
محطات مركزية [جيجاوات]			200	500	1000	2000	3000	4000	5500	7000	8500	
محطات لامركزية [10-100 ميجاوات]	10	20	40	70	110	160	220	290	370	460	550	2300
الإجمالي [ميجاوات]	10200	8460	6760	5020	3890	2670	1550	900	405	110	35	**40000**

خارطة الطريق لإنتاج الهيدروجين الأخضر بدول شمال افريقيا وأوكرانيا بسعة 40 جيجاوات حتى عام 2030 [13]

في شمال إفريقيا وأوكرانيا، سيكون إنتاج الهيدروجين قريبًا من مواقع إنتاج الكهرباء من محطات الطاقة المتجددة على نطاق واسع. والاستخدام المجدي للهيدروجين الأخضر في شمال إفريقيا وأوكرانيا سيكون لإنتاج الأمونيا / الأسمدة. المغرب على سبيل المثال، الذي ليس لديه موارد أحفوريه، يستورد حاليًا مليون طن من الأمونيا سنويًا، بتكلفة تزيد عن 400 مليون دولار [12]. في هذه الخارطة، تم اقتراح ان يتم تركيب أجهزة التحليل الكهربائي بقدرة 7.5 جيجاوات بالقرب من أماكن إنتاج الأمونيا / الأسمدة حتى عام 2030. وبهذه القدرة المركبة، في شمال إفريقيا، يمكن إنتاج حوالي 3 ملايين طن من "الأمونيا الخضراء" في مصر والجزائر والمغرب. في أوكرانيا من المتوقع إنتاج مليون طن من "الأمونيا الخضراء". سيتم تثبيت الجزء الآخر من 40 جيجاوات، وهو حوالي 32.5

جيجاوات من أجهزة التحليل الكهربائي لإنتاج الهيدروجين على نطاق واسع، وفي النهاية يتم إدخاله في خط أنابيب الهيدروجين للتصدير. سيتم إنتاج ما يقرب من 3 ملايين طن (118 تيراوات ساعة) لتصدير الهيدروجين إلى الاتحاد الأوروبي في عام 2030، وهو ما يمثل 17 ٪ من إجمالي طلب الاتحاد الأوروبي على الهيدروجين في عام 2030م، كما هو موضح في خارطة طريق الهيدروجين بالجدول رقم 3.

جدول رقم 3: خارطة الطريق لبناء أجهزة تحليل كهربائية لتوليد الهيدروجين بسعة 40 جيجاوات في شمال افريقيا واوكرانيا 2030 [13]

سعة جهاز التحليل	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	**الإجمالي 2030**
السوق المحلية [ميجاوات]									**7500**
الأمونيا بشمال افريقيا	75	125	250	500	750	1000	1250	1500	5450
الأمونيا بأوكرانيا		50	100	200	250	300	400	500	1800
الزجاج والصلب والمصافي				10	20	30	40	50	150
محطات وقود الهيدروجين					10	20	30	40	100
سوق تصدير الهيدروجين [ميجاوات]									**32500**
محطات انتاج الهيدروجين بشمال افريقيا [ميجاوات]		500	1000	2000	3000	4000	6000	8000	24500
محطات انتاج الهيدروجين بأوكرانيا [ميجاوات]			500	700	1000	1400	1900	2500	8000
الإجمالي [ميجاوات]	75	675	1850	3410	5030	6750	9620	12590	**40000**

نتيجة لهذه المبادرة، سيتم تكوين اقتصاد هيدروجين متجدد سيخلق فرص عمل ونمو اقتصادي ورفاهية لأوروبا وشمال إفريقيا وأوكرانيا وغيرها من المناطق المجاورة. وفي الوقت نفسه، ستساهم في جعل أوروبا وأفريقيا أكثر نظافة وخالية من الكربون، وما هو أبعد من ذلك.

VI. المراجع

[1] – د. أكسل مايكلوهوفا، وسونجا بوتزنجيجر، التطورات في تقنيات الهيدروجين حتى 2030، الفرص المتاحة والمخاطر أمام دول الخليج، وتداعيات السياسات الدولية، سبتمبر 2019.

[2] - The Future of Hydrogen, seizing today's opportunities, Report prepared by the International Energy Agency, IEA for the G20, Japan, June 2019.

[3]- **https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/QANDA_20_1257**

[4]- IEA publications 2020.

[5]- Renewable Power-To-Hydrogen: Innovation Landscape Brief, IRENA 2019, ISBN 978-92-9260-145-4.

[6]- Dr. Andrea Lovato, MENA Hydrogen Alliance, presentation in 3rd Meeting of the MENA Hydrogen Alliance

[7]- Neom Hydrogen & Green Fuels (Presentation), 3rd Meeting of the MENA Hydrogen Alliance, May 2020.

[8]- Ad van Wijk, Frank Wouters, Samir Rachidi, Badr Ikken, A North Africa - Europe Hydrogen Manifesto, Dii publications, 2020.

[9]- Mr. Mohamed Ghazali, Ministry of Energy, Mines and the Environment, 3rdMeeting of the MENA Hydrogen Alliance

[10]- Varadi, Wouters, & Hoffmann. (2018). The Sun is Rising in Africa and the Middle East - On the Road to a Solar Energy Future. Singapore: Pan Stanford Publishing Co ISBN-10: 9814774898.

[11]- https://www.greencarcongress.com/2020/07/20200709-eu.html

[12]- Powering a climate-neutral economy: An EU Strategy for Energy System Integration, Brussels, 8.7.2020 /COM (2020) 299 final.

[13]- Dr. Ad van Wijk, Jorgo Chatzimarkakis, Green Hydrogen for a European Green Deal A 2x40 GW Initiative, 2020.