مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (38) العدد (4) 2016
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (38) No. (4) 2016

الدراسة الاقتصادية لإنتاج و تخزين الهيدروجين من مصادر الطاقة المتجددة الريحية–الشمسية

الدكتور علي محمد علي *
ناظم خرفان ديب **

(تاريخ الإيداع 21 / 6 / 2016. قُبِل للنشر في 21/ 1 / 2016)

□ ملخّص □

إن التكامل بين مصادر الطاقة المتجددة المختلفة، بالإضافة إلى تحرير أسواق الطاقة الكهربائية من القيود المؤثرة على استقرار واستمرارية تأمين التغذية للمستهلكين يؤكد الحقائق القائمة في أنظمة الطاقة الكهربائية الحديثة. إن زيادة مشاركة مصادر الطاقة المتجددة ضمن نظم الطاقة يتعلق بتباين العرض والطلب. لذلك يعتبر تخزين الطاقة كأحد الحلول المستخدمة لتحقيق الاستقرار في إمدادات الطاقة الكهربائية للحفاظ على التوازن في توليد الطاقة المطلوبة وضمان عدم انقطاعها عن المستهلكين. وفي سياق التنمية المستدامة ونضوب موارد الطاقة التقليدية فإن مسألة نمو إنتاج الطاقة الكهربائية من الطاقة المتجددة مرتبط إلى حد كبير بالقدرة على اقتراح حلول جديدة لتخزين الطاقة وتكييفها. وتشير التطورات الاخيرة في تكنولوجيا الهيدروجين وتطبيقات الطاقة المتجددة إلى إن هذه التقنيات واعدة لتحول الاقتصاد إلى اقتصاد قائم على الهيدروجين، بالاعتماد على استخدام الهيدروجين لشبكات الطاقة الكهربائية العامة وفي قطاعات النقل، يناقش هذا البحث أهمية إنتاج الهيدروجين ودوره كحامل للطاقة، وعملية التحليل الكهربائي والقيمة الاقتصادية لإنتاج الهيدروجين وخاصة من تكنولوجيا الطاقات المتجددة الشمسية–الريحية.

إن الدراسات التقنية والاقتصادية وجهت لإيجاد نظام لتخزين الهيدروجين على المدى الطويل الأجل لاستخدامه في توليد الطاقة الكهربائية. ويزداد إنتاج الهيدروجين بفترات إنتاج متعلقة بارتفاع أو انخفاض الطلب على الطاقة، ويمكن أن يباع مباشرة إلى مشغلي الشبكة أو عن طريق خزانات (اسطوانات) مليئة بالهيدروجين. والتحقق من الاستخدام الآمن للتقنيات القائمة على استخدام الهيدروجين لتخزين وتوليد الكهرباء على المدى الطويل. وتشير النتائج إلى أن هناك مصادر كافية موجود لإنتاج الهيدروجين من الطاقة الشمسية والريحية. ومع ذلك تعتمد أسعار الهيدروجين اعتمادا كبيرا على اسعار الطاقة الكهربائية.

الكلمات المفتاحية: إنتاج الهيدروجين، نظم تخزين الهيدروجين، اقتصاديات الهيدروجين، الطاقة المتجددة، تقنيات إنتاج الهيدروجين، الهيدروجين الشمسي–الريحي.

*أستاذ – قسم هندسة تقانة الأغذية – كلية الهندسة التقنية – جامعة طرطوس – طرطوس – سورية .
**طالب دراسات عليا (دكتوراه) –قسم هندسة تقانات الطاقات المتجددة–كلية الهندسة التقنية– جامعة طرطوس – طرطوس –سورية .

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (38) العدد (4) 2016
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (38) No. (4) 2016

"The Economic Study of hydrogen production and Storage from renewable power sources -Wind/Solar"

Dr. Ali M. Ali *
Nazem Khorfan Deeb **

(Received 3 / 6 / 2016. Accepted 21 / 1 / 2016)

□ ABSTRACT □

The integration of various renewable energy sources as well as the liberalization of electricity markets are established facts in modern electrical power systems. The increased share of renewable sources within power systems intensifies the supply variability and intermittency. Therefore, energy storage is deemed as one of the solutions for stabilizing the supply of electricity to maintain generation-demand balance and to guarantee uninterrupted supply of energy to users. In the context of sustainable development and energy resources depletion, the question of the growth of renewable energy electricity production is highly linked to the ability to propose new and adapted energy storage solutions. Recent advancements in hydrogen technologies and renewable energy applications show promise for economical near to conversion to a hydrogen-based economy. As the use of hydrogen for the electric utility and transportation sectors. This paper briefly discusses provides a historical perspective for hydrogen production and the role of hydrogen as an energy carrier, discusses hydrogen economy, the process of electrolysis for hydrogen production (especially from solar and wind technologies).

A comprehensive techno/socio/economic study of long term hydrogen based storage systems in electrical networks is addressed. the excess produced hydrogen during high generation periods or low demand can be sold either directly to the grid owners or as filled hydrogen bottles. The affordable use of Hydrogen-based technologies for long term electricity storage is verified. The results indicate that ample resources exist to produce Hydrogen from wind and solar power. However, hydrogen prices are highly dependent on electricity prices.

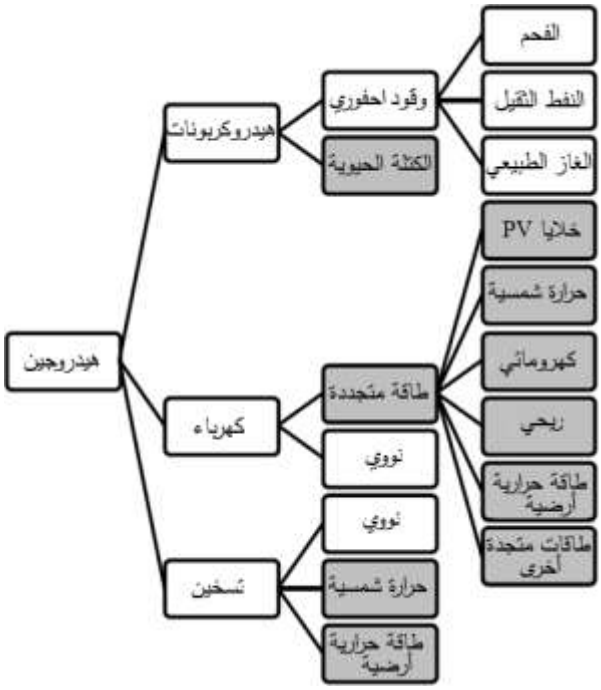
Keywords: Hydrogen production, Energy Storage Systems, Hydrogen Economic, Renewable Energy, Production technology of Hydrogen, Solar - Wind hydrogen.

***Professor Department Of Food Technical Engineering, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Tartous, Syria.**
****Postgraduate Student-Doctoral, Department of Technologies for Renewable Energies Engineering, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Tartous, Syria.**

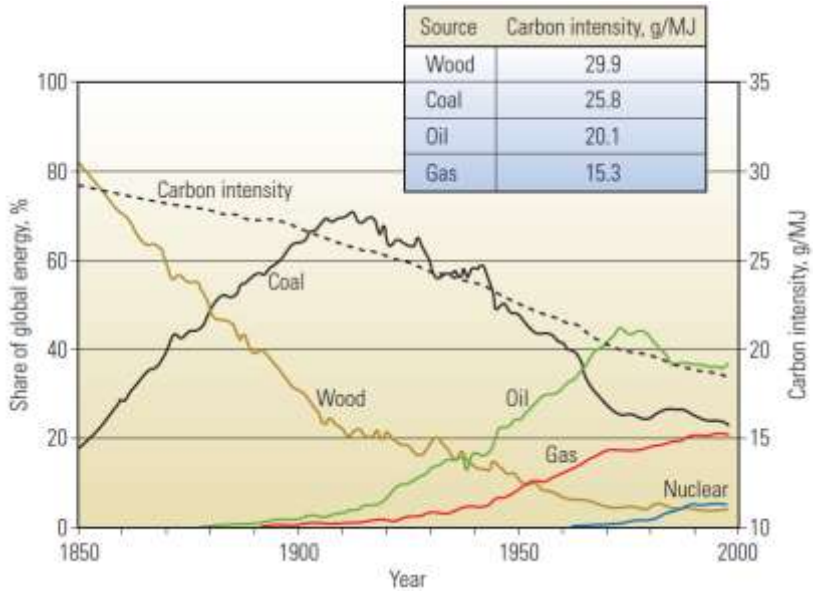
مقدمة:

نظرا لأثار انبعاثات الكربون في الغلاف الجوي و تغير المناخ العالمي، فنحن مقبلون على عالم مقيد (محكوم) بالكربون حيث أن مصادر الطاقة البديلة مطلوبة للتخفيف من الاعتماد على مصاد الطاقة التقليدية المعتمدة على الوقود الأحفوري. فالنفط والغاز الطبيعي متوفران لكن معداتهم وتجهيزاتهم محدودة وتكلفتها سترتفع بسبب الطلب المتزايد على الطاقة. سيستمر الفحم الحجري بتزويدنا بالطاقة الكهربائية لأغلب حاجتنا المطلوبة على المدى المنظور، والتقنيات اللازمة للحد من انبعاث الكربون هي في بداية نشأتها وفعاليتها محدودة. إن تقدم الطاقة النووية يمكن أن يستخدم لإنتاج الكهرباء ولكن المشاكل المتعلقة بكيفية التخلص من النفايات النووية وكذلك الخطر الناجم عن الاشعاعات النووية والتكنولوجيا العالية الدقة والتكلفة المرافقة للمحطات النووية كانت سبباً في تريث و ابتعاد الكثير من الدول عن استخدام الطاقة النووية في توليد الطاقة الكهربائية.

الحل الوحيد الواعد لهذه المشكلة يكمن بالاستخدام المباشر للهيدروجين. يُعدّ الهيدروجين من أخف العناصر، ليس مصدر أولي للطاقة مثل البترول أو الفحم، ولكن بدلاً من ذلك فهو يُعد ناقلا للطاقة مثل الكهرباء، ويمكن أن يُصّنع أو يُنتزع من مواد غنية به، مثل الفحم، الغاز الطبيعي، الكتلة الحيوية و الماء، في وقتنا الحالي الوسائل الأساسية لتصنيع الهيدروجين من خلال استخراجه من الغاز الطبيعي (أغلبه من الميتان) عبر إعادة تشكيل بخار الميتان steam methane reforming (SMR). وكذلك، تقنيات إنتاج الهيدروجين من المصادر الغير أحفوريه مثل الكتلة الحيوية، طاقة الرياح والطاقة الشمسية أيضا متوفرة جميعها، يبين الشكل (1) مصادر الطاقة الرئيسية لإنتاج الهيدروجين. ومزايا إنتاج الهيدروجين من المصادر اللاأحفوريه التي تضمن حقيقة إن إنتاج الهيدروجين ودورة احتراقه ينتج عنها غازات دفيئة أقل من مما هو عليه في الوقود الأحفوري المنافس، وخلافاً للكهرباء فالهيدروجين يمكن أن يُخزن بسهولة تامة.



الشكل (1) مصادر الطاقة الرئيسية لإنتاج الهيدروجين، مع ابرز مصادر الطاقة المتجددة.



الشكل (2) كثافة الكربون الناتجة من النسبة المختلفة للاستخدامات العالمية للطاقات التقليدية خلال الزمن.

وبما أن الطاقة هي المحرك الرئيسي والمساهم الاساسي في نمو الاقتصاد، وهي من الأمور الحيوية للحفاظ على التنمية الاقتصادية والاجتماعية الحديثة. بالتالي إن الزيادة في الطلب على الطاقة ومشاكل تغير المناخ وازدياد كثافة الكربون في الغلاف الجوي الناتج عن استخدام الطاقات التقليدية عالميا، الشكل (2)، هما اثنان من القضايا العالمية الهامة والحاسمة في قتنا الحالي. الطاقة المتجددة، وكفاءتها تقدم حلولا ملموسة لتقليل انبعاث الغازات الدفيئة، وتوفر بشكل متزامن الطاقة المطلوبة للعديد من المستهلكين في إطار التنمية الاقتصادية والاجتماعية على المدى الطويل. إن اسعار النفط في محطات الطاقة التقليدية غير ثابتة وتتزايد بشكل كبير. ولذلك فإن تقلب الأسعار له انعكاسات على أمن واستمرارية الطاقة وعلى الميزان التجاري والتضخم والنمو الاقتصادي. وهكذا فإن تكنولوجيا الطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة تسمح بتوفير طاقة منخفضة الى معدومة الكربون، نظيفة وآمنة وموثوق بها، ومن الضروري أن تكون مستقلة عن اسعار الوقود [1,2].

تهدف جميع الدول على زيادة نسبة مساهمة الطاقة المتجددة من الطاقة الكهربائية المنتجة، ومع ذلك فإن استخدام وانتشار مصادر الطاقة المتجددة يعطي قضية تخزين الطاقة اهتماما بالغا لما لها من الأثار الحيوية الهائلة لطبيعتها المتقطعة ومساهمتها في استقرار شبكة الطاقة الكهربائية. هناك العديد من الحلول الممكنة عمليا لإنجاز هذا الأمر ولكنها لا تزال غير مرضية. لذلك يبدو أن تقنيات تخزين الطاقة القائمة على الهيدروجين من أحد أهم الخيارات التنافسية الحديثة. على الرغم من التقدم التكنولوجي فإن هذه الطريقة مع مزاياها هي الحل، وتطويرها لابد أن يأخذ بالاعتبار بعض الجوانب الاجتماعية والاقتصادية لإيجاد تكنولوجيا جديدة في مجال الطاقة. و أحد مكونات ظهور هذه التكنولوجيا، مع مراعاة المعايير التكنولوجية، هو دعم سياسات الطاقة وخاصة الاتجاه نحو استخدام الطاقات المتجددة وتكنولوجيا تخزينها وزيادة نسبة مشاركتها في الطاقة الكهربائية لتوفير استقرار الطاقة وديموميتها لما لذلك من الاثر الايجابي الكبير على النمو الاقتصادي وتقدم المجتمعات. وتتجه الانظار والفرضيات على التوقعات الاجتماعية والاقتصادية فيما يتعلق باستخدام الهيدروجين والمرتبط بدعم الجهات الحكومية لهذه التكنولوجيا الجديدة. وتبقى الرهانات في تخزين الطاقة الهيدروجينية لتشمل التوافق على تطوير حلول تساهم في تحديد الاختناقات والمشاكل الفنية والعلمية

أو الاقتصادية أو الاجتماعية لوضع نهج بحثي أكثر شمولا من الناحية التكنولوجية، لإنتاج وتخزين الطاقة الهيدروجينية لتعزيز نمو وتقدم المجتمعات وتحقق الأمن والاستقرار الطاقي.

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث إلى دراسة طرق إنتاج للهيدروجين ويناقش عملية التحليل الكهربائي لإنتاج الهيدروجين من مصادر طاقة متجددة مختلفة (وخاصة من تكنولوجيات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح) والقيمة والتكلفة الاقتصادية من إنتاج الهيدروجين، لما لطاقة الهيدروجين من أثر ايجابي كبير على استقرار شبكات توليد الطاقة الكهربائية والمساهمة في النمو الاقتصادي والمحافظة على التوازن بين العرض والطلب، ولما له من مزايا الكفاءة والموثوقية والسلامة وكذلك خفض انبعاثات الكربون بتكاليف معقولة.

طرائق البحث ومواده:

يقوم البحث على دراسة إنتاج الهيدروجين بالتحليل الكهربائي باستخدام مصادر الطاقة المتجددة، وكذلك الجدوى الاقتصادية لإنتاج الهيدروجين من خلال دراسة اقتصاديات التحليل الكهربائي و أنظمة وطرق تخزين الطاقة على أساس تكنولوجيا الهيدروجين.

1 - نظم الهيدروجين Hydrogen Systems:

تعتبر ذرة الهيدروجين العنصر الابسط والأكثر شيوعا والأخف وزنا في الكون. ومع ذلك، فهي تتواجد فقط في تركيبه مع العناصر الأخرى. أولاً مع الأكسجين في الماء ومع الكربون والنيتروجين والأكسجين في المواد الحية وأنواع الوقود الأحفوري. الهيدروجين ليس مصدرا رئيسيا للطاقة. ومع ذلك يصبح حامل جذابا ومهما للطاقة عندما ينفصل عن العناصر الأخرى باستخدام مصدرا للطاقة. ومن المفترض أن يكون الهيدروجين الوقود النظيف للطاقة مستقبلا وخاصة لأغراض التخزين ونقل الطاقة [3]. السعة التخزينية لطاقة الهيدروجين ممتازة لان الحسابات تبين أن كل كيلوغرام من الهيدروجين يحتوي تقريبيا 33 kWh من الطاقة [3]. إن المزايا الرئيسية لاستخدام الهيدروجين للتزويد بالطاقة، تتضمن:

1 - مصدر طاقة آمن لتخفيض واردات النفط، فمن الممكن استخدام الموارد المحلية لإنتاج الهيدروجين، مما يؤدي إلى الاستقلالية في مجال الطاقة.

2 - الاستدامة من خلال الاستفادة من مصادر الطاقة المتجددة RE، حيث يمكن انتاج الهدروجين من مصادر الطاقة النظيفة.

3 - أقل تلوثا ويحسن نوعية الهواء في المناطق السكنية من خلال إنتاج صفري للكربون تقريبا، وكذلك المواد الهيدروكربونية، وانبعاثات الغازات الدفينة وأكاسيد النيتروجين عند منطقة الاستخدام، حيث يمكن للهدروجين أن يحل محل الوقود الأحفوري لتوفير الطاقة الكهربائية و وقود النقل.

4 - الجدوى الاقتصادية للهيدروجين التي يحتمل أن يشكل أسواق للطاقة العالمية في المستقبل.

5 - يمكن تخزين وتوزيع الهدروجين بعدة طرق.

لذلك الهيدروجين هو الناقل للطاقة النظيفة المقبول في جميع أنحاء العالم كما هو مصدر مستقل ويحتوي على نسبة عالية من الطاقة في الكتلة بالمقارنة مع البترول كما هو موضح بالجدول (1) [4]. على الرغم من أن هناك

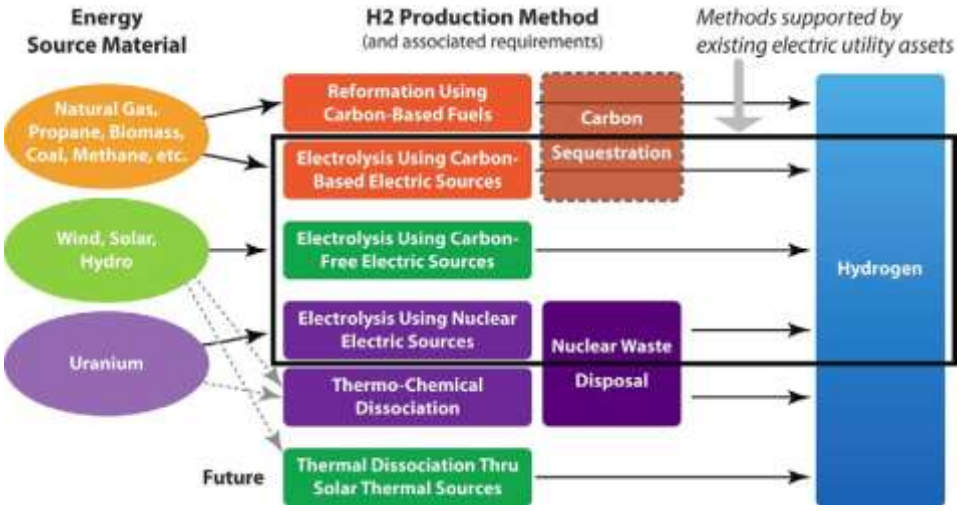
بعض أكاسيد النيتروجين التي تنتج أثناء الاحتراق بدرجة حرارة عالية، الملوثات البيئية يمكن إزالتها بالكامل من خلال استخدام درجات الحرارة المنخفضة، كما في خلايا الوقود. يمكن استخدام نظام الطاقة الكهرومائية والهيدروجينية (HHES) للحصول على الطاقة في المناطق النائية أو المعزولة مثل القرى الريفية والفنادق والمناطق الحدودية والجزر [4].

الجدول (1) مقارنة بين الهيدروجين وأنواع مختلفة من الوقود كمصدر للطاقة [4].

الوقود	المحتوى الطاقي (MJ/kg)	الوقود	المحتوى الطاقي (MJ/kg)
هيدروجين	120	إيثانول	29.6
الغاز الطبيعي المسال	54.4	ميثانول	19.7
بروبان	49.6	فحم الكوك	27
بنزين السيارات	46.4	خشب جاف	16.2
مازوت السيارات	45.6	تفل	9.6

1-1- نظام إنتاج الهيدروجين Hydrogen Production System:

يمكن إنتاج الهيدروجين من مجموعة متنوعة من المصادر. كما هو مبين في الشكل (3) الذي يظهر عدة مسارات متنوعة لإنتاج الهيدروجين، ويسلط الضوء على الطرق المدعومة من قبل توليد الطاقة الكهربائية. أهمية هذه المسارات في إنتاج الوقود هي أنها يمكن أن تنتج محليا دون الاعتماد على مصادر خارجية.



الشكل (3) مسارات إنتاج الهيدروجين.

إن الإنتاج العالمي للهيدروجين كبير ومتزايد وعلى الصعيد العالمي أكثر من 50 مليون طن [5]، وقد بلغ إنتاج الهيدروجين من التحليل الكهربائي أكثر من 255.3 بليون متر مكعب عام 2013 ومن المتوقع أن يصل إلى 324.8 بليون متر مكعب عام 2020 [6]. الطرق الرئيسية لإنتاج الهيدروجين حاليا تتم من خلال معالجة الغاز الطبيعي وعزل الهيدروكربونات، ويتم إنتاج كميات أصغر عن طريق عملية التحليل الكهربائي. تعتبر معالجة الغاز الطبيعي هي طريقة فعالة من حيث التكلفة، و إن نسبة 48% من الهيدروجين المنتج بالعالم يتم استخراجه من الغاز الطبيعي [7]، وذلك من خلال إجراء تفاعلات كيميائية بين الغاز الطبيعي وبخار الماء وتعريضه لعوامل أخرى محفزة،

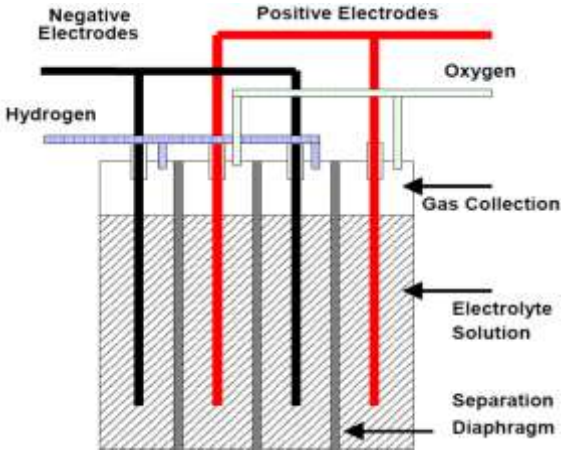
حيث يتم في النهاية فصل ذرات الهيدروجين عن ثاني أكسيد الكربون الذي يلعب دورا أساسيا في ارتفاع درجة حرارة الأرض أو ما يسمى بظاهرة الاحتباس الحراري.

تعتبر طريقة غشاء الفصل الهيدروجيني (Separation Membrane Reactor) SMR حاليا الأقل تكلفة لإنتاج كميات كبيرة من الهيدروجين ($ 1.00–5.00$/كيلوغرام من الهيدروجين). فالميزة السيئة الرئيسية لاستخدام SMR بأنها تعتمد على مصدر وقود احفوري غير المتجدد. وسعر المواد الخام اللازمة لها في تقلب مستمر. ومن نتائج عملية SMR أيضاً إنتاج ثاني أكسيد الكربون (الذي يشكل خطرا على البيئة، حيث يتجه العالم إلى اقتصاد عالمي خالي أو بأقل ما يمكن من الكربون)، والغاز المنتج للهيدروجين يحتوي على مستويات عالية من الشوائب.

يستخدم التحليل الكهربائي (المحللة) التيار المستمر (DC) لفصل الماء إلى عناصره الأساسية من الهيدروجين والأوكسجين. ويتم إنتاج الهيدروجين من خلال التحليل الكهربائي بتمرير التيار الكهربائي من خلال قطبين كهربائيين في الماء. ينقسم جزيء الماء إلى وينتج غاز الاكسجين عند المصعد وغاز الهيدروجين عند المهبط، وفق التفاعل التالي: $2H_2O \longrightarrow 2H_2+O_2$ وفق (Cox and Wiliamson, 1977). وبما أن هذه العملية تستخدم الماء فقط كمصدر، يمكن أن تنتج بما يصل إلى % 99.9995 هيدروجين و أكسجين نقي. واكتشفت المحللة عام 1800 من قبل وليام نيكلسن والسيد كارلايل أنتوني بعد فترة قليلة من اختراع أليساندرو فولتا البطارية الكهربائية.

تطورت صناعة المحللات بشكل كبير خلال عشرينات وثلاثينات القرن العشرين. وشملت هذه المنتجات من شركات Oerlikon، Norsk Hydro و Cominco بأحجام مختلفة [8–9]. ومعظم هذه المنشآت بالقرب من محطات الطاقة الكهرومائية التي تزود بمصدر طاقة كهربائي رخيص. وهناك حاجة للمزيد من الهيدروجين للاستخدام في الصناعات، وتعتبر طريقة SMR الأكثر تدرجا بالاستخدام لإنتاج الهيدروجين لكونها الأقل تكلفة.

لاتزال المحللات الكهربائية تستخدم في الأماكن التي تتوفر فيها الكهرباء بأسعار منخفضة أو التي لها متطلبات هيدروجين عالي النقاوة. حيث أنه كلما ازداد سعر الغاز الطبيعي، يصبح التحليل الكهربائي خيارا فعال للمنافسة في سوق الهيدروجين. وكذلك شبكات الكهرباء في وضع جيد لتوفير الكهرباء للتحليل الكهربائي لإنتاج الهيدروجين. وفي اقتصاد الهيدروجين المستقبلي، هناك ميزة إضافية لإنتاج الهيدروجين كهربائيا هي دعم صناعة الطاقة بشكل كامل تقريبا في الدول المهتمة بقطاع الطاقة. مما يوفر مستقبل طاقة أكثر استقرارا وآمنا من النفط أو الغاز الطبيعي المسال المستورد.

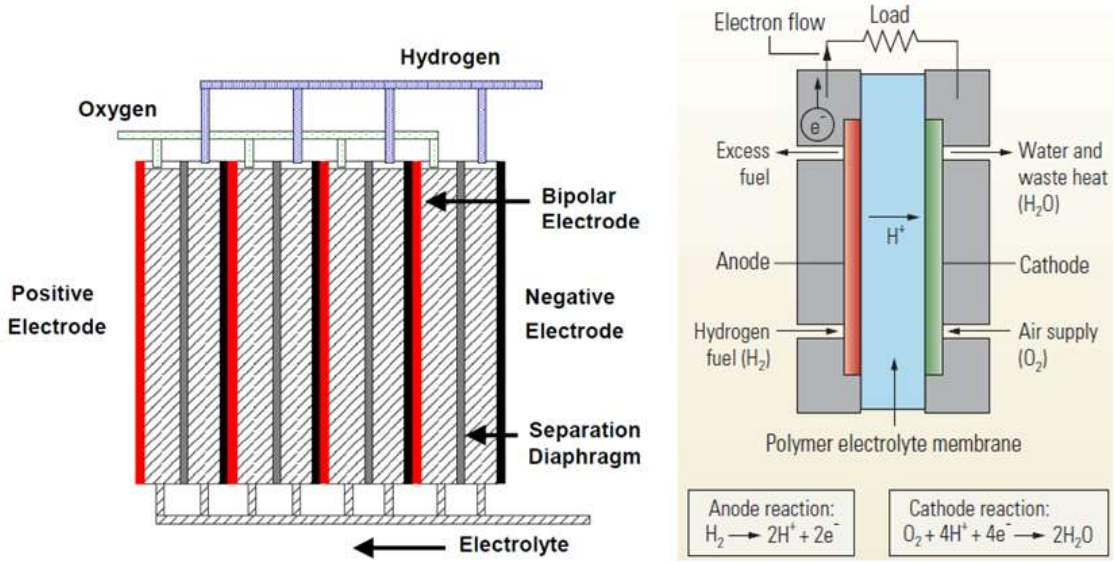


الشكل (4) التصميم الأحادي القطب.

لإنتاج 1Kg من الهيدروجين مثالياً نحتاج 39 KW من الطاقة الكهربائية و 8.9 Liters من الماء وذلك عند الدرجة°25C و 1 ضغط جوي. كفاءة نظام التحليل الكهربائي النموذجي 56%–73% وهي تقابل 70.1 kWh/kg– 53.4 [10]. هناك نوعان اساسيان من المحللات التي يتم تصنيعها حالياً والتي تعمل عند درجات حرارة منخفضة تتبادلان غشاء بروتوني و قلوي.

محللات المياه الأولى استعملت تصميم خزان بمحلول كهربائي قلوي [9]. هذه المحللات يمكن أن تتكون بتصاميم أحادية القطب (خزان) أو بقطبين (مرشح ضاغط). في التصميم الأحادي القطب كما في الشكل (4)، الكترودات (الأقطاب الكهربائية)، مصعد ومهبط تركب بالتعاقب في خزان ملئ بنسبة 20%– 30% محلول كهربائي (هيدروكسيد البوتاسيوم في الماء النقي). في هذا التصميم، يتم وصل كل خلية على التوازي وتعمل عند جهد مستمر 1.9–2.5V.

ميزة هذا التصميم هو أنه بسيط للغاية في التصنيع والإصلاح، وسيئته أنه يعمل عادة عند كثافة تيار ودرجة حرارة أقل [9]. التصاميم أحادية القطب الأكثر حداثة تعمل عند مخرجات ضغط الهيدروجين العالية (تصل إلى 41368.542× 10^3 MPa).



الشكل (5) التصميم ثنائي القطب (filter–press).

التصميم الثنائي القطب المبين في الشكل (5)، الذي غالبا ما يدعى ضاغط–مرشح، يتكون من طبقات متناوبة من الأقطاب الكهربائية وأغشية الفصل (العزل) المثبتة معاً. تُربط الخلايا على التسلسل وبالنتيجة الجهد الكلي يساوي مجموع الجهود. وتكون الخلايا رقيقة نسبياً، يمكن أن يكون تصميمها العام أصغر بكثير من التصميم الأحادي القطب. مزايا التصميم ذو القطبين هي تخفيض تأثيرات حزمة الأقطاب، كثافة التيار أعلى، وقدرتها على إنتاج غاز بضغط عالي. مساوئها أنه لا يمكن اصلاحها بدون إجراء صيانة كامل للحزمة (الكتلة) [9]. ولكنها لحسن الحظ نادرا ما تحتاج إلى الصيانة. سابقاً كان يستخدم الاسبستوس باعتباره الغشاء الفاصل، لكن المنتجين يخططون لاستبداله بمواد بوليميرية جديدة مثل Ryton.

تكنولوجيا المحللة الثانية (التصميم الثنائي القطب) التجارية لها غشاء تبادلي بوليميري رقيق PEM (Polymer Exchange Membrane) يقع بين القطب الموجب anode والقطب السالب cathode. يسمح الغشاء بالمحلول الكهربائي بتوصيل أيونات H^+ من القطب الموجب إلى القطب السالب. و يفصل أيضا الهيدروجين والأكسجين، ينتج الأكسجين من جانب المصعد ويتم إنتاج الهيدروجين على جانب المهبط. إن مادة الغشاء الأكثر شيوعاً هي Nafion من DuPont. محللات PEM بتصميم ثنائي القطب يمكن أن تصنع للعمل في فرق الضغط (ضغط تفاضلي) العالي عبر الغشاء. وهذه المحللات صغيرة بالحجم نظرا للكثافة العالية للتيار ($1-2A/cm^2$) بالمقارنة مع المحللات القلوية، ولها كفاءة طاقة بحدود 50−90 %. و زمن استجابة قصير (بدء/ايقاف) التشغيل وليس هناك إعادة توزيع المحلول ولديها انخفاض في الكتلة. محللات PEM يمكن أيضا أن تعمل في الضغوط العالية، مما يقلل من الحاجة إلى ضغط إضافي. هذه الفوائد والميزات لمحللات PEM على المحللات القلوية تجعلها مناسبة تماما للأنظمة المستقلة [11]. عند العمل بدرجات الحرارة المنخفضة تكون الطاقة اللازمة والمطلوبة للحصول على واحد كيلوغرام من الهيدروجين تساوي 33.3kWh/kg H2. وتعطى العلاقة بين معدل الإنتاج في الساعة، وعدد الخلايا الكهربائية وتيار المحللة التراكمي I_{ELS} كما يلي [12]:

$$H_2\left(\frac{kg}{h}\right) = 7.5816\frac{\eta_C\, I_{ELS}}{ZF} \qquad (1)$$

حيث: Z: عدد إلكترونات المنقولة لكل مول ($Z=2e^-$) من H_2O.

F: ثابت فاراداي (F= 96485 C/mol). η_C: يشير إلى عدد الخلايا في السلسلة.

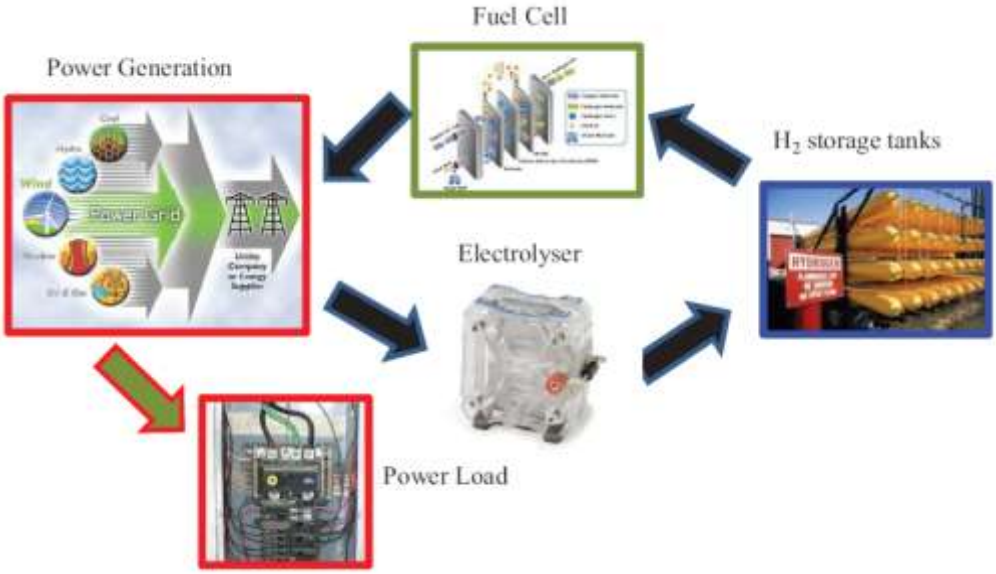
I_{ELS}: تيار المحللة التراكمي I_{ELS} (A) = i (A/cm²)* A_{ELS} (cm²) حيث A_{ELS} هي منطقة الأقطاب النشطة وقيمتها بالنسبة لمحللة PEM النموذجية حوالي 100 cm².

هناك عدة عوامل تؤثر على أداء المحللات. عادة ما تنطوي هذه الفروقات بين جهد التشغيل، ومعدل إنتاج الهيدروجين، والتكلفة الكبيرة. إن تحقيق الأمثلية لهذه البارامترات هي فريدة من نوعها لكل مصنّع.

إن الزيادة الإجمالية في الكفاءة يمكن أن تتحقق من خلال العمل في درجات حرارة أعلى. ولكن هذا يمكن أن يزيد معدلات تآكل الأقطاب والأغشية الفاصلة [9]. ويمكن أن تتطلب زيادة درجات الحرارة أيضاً أن يتم استخدام مواد أخرى في بقية أجزاء المحطة.

هناك أيضاً مزايا لتشغيل المحللة في الضغوط العالية. تتضمن تخفيضات في الاستهلاك المحدد الطاقة، وتقليص الحاجة لضواغط الغاز، وتكون خلايا المحللة أصغر [13].

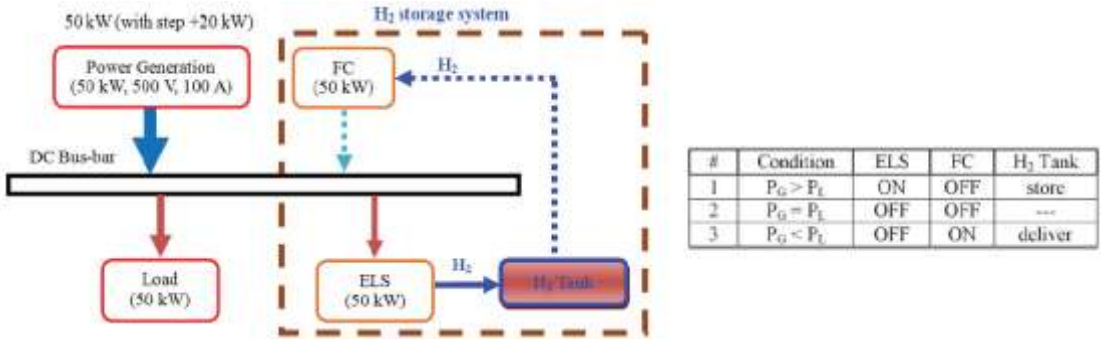
يبين الشكل (6) نظام مكون من جزأين رئيسيين: شبكة توليد الطاقة (توليد الهيدروجين عبر المحللة والتوليد المعاكس للطاقة من خلال الهيدروجين) والطلب على الطاقة، ونظام المحللة وخلية الوقود ELS/FC. يمكن لمحطات توليد الطاقة أن تكون إما تقليدية أو نظام متعدد المصادر مع محطات توليد متجددة (ريحية، شمسية، هجينة) (WE, PV, etc).



الشكل (6) نظام توليد واستهلاك طاقة الهيدروجين.

تستخدم خلية الوقود المبينة في الشكل (7) كمحول طاقة كهروكيميائي الذي يحول الطاقة الكيميائية في الوقود مباشرة إلى جهد كهربائي مستمر على ناقل DC. على العكس من ذلك لم تكن هذه هي الحالة من العمليات التقليدية لتوليد الكهرباء التي تحول الوقود التقليدي من خلال عدة خطوات تحويلية للطاقة بما في ذلك بشكل عام الطاقات الميكانيكية والحرارية. وتوجد عدة أنواع من خلايا الوقود: خلية الوقود ذات الغشاء التبادلي البوليميري FC (PEMFC)، خلية وقود قلوية، خلية وقود فوسفورية، خلية الكربونات المذابة (المنصهرة)، خلية الاوكسيد الصلبة، و هي في مراحل مختلفة من التطوير. في درجة 400K، تنخفض قيمة تسخين الهيدروجين بـ 242.847 kJ/mol، مع كفاءة 37%، فإن نظام خلية وقود 50 kW بحاجة إلى نحو 0.55 mol أو 1.1 g من غاز الهيدروجين التي يمكن استخدامه بالثانية الواحدة. هذا يتوافق مع ما يقارب 2000 mol أو 4 kg من الهيدروجين المستفاد منه بالساعة [14]. و أبعادها من أجل طاقة 205 kW هي حوالي 2.5 m عرض، و1.6 m عمق، 1.33 m ارتفاع [15].

تستخدم محللة خلية ELS/FC كجزء لتفريغ الحمل. إذا كان هناك توليد فائض في الطاقة، تعمل المحللة على



الشكل (7) منهجية إدارة الطاقة توليد/تخزين الهيدروجين H_2.

إنتاج غاز الهيدروجين، والتي يتم تسليمها إلى خزانات الهيدروجين. وعندما تصبح خزانات H_2 ممتلئة، فإن الطاقة الفائضة سيتم تحويلها لتفرغ في حمولة أخرى. في حال وجود عجز في توليد الطاقة، تبدأ خلية الوقود بالعمل لإنتاج الطاقة الكهربائية للحمل باستخدام الهيدروجين المخزن في خزانات H_2، وتتحقق منهجية إدارة الطاقة لتخزين وتوليد الهيدروجين المبينة في سابقاً.

2 - اقتصاد الهدروجين The Hydrogen Economy:

إن فكرة استخدام الهيدروجين باعتباره حامل للطاقة ليست بجديدة. وهي واحدة من أقدم المفاهيم المعتمدة على اقتصادية الهيدروجين في كتابات جول فيرون في عام 1874. بين عامي 1900 و 1960، أقترح بعض الباحثين عدة طرق لإنتاج واستخدام الهيدروجين في العديد من التطبيقات، ولكن الاسعار المنخفضة للوقود الأحفوري في ذلك الوقت جعلت هذه الفرص غير اقتصادية. إن الحظر النفطي عام 1973 أجبر الولايات المتحدة وبلدان أخرى لإعادة النظر في بدائل اقتصادية عن الوقود الأحفوري. وقد أدخل مصطلح اقتصاد الهيدروجين لأول مرة في أوائل السبعينات [16] لوصف عملية استخدام الهيدروجين ليحل محل الوقود الأحفوري وكبديل اقتصادي لكل من الكهرباء والوقود النووي.

إن كل الاقتصاديات الكهربائية المقترحة خلال السبعينيات، ومع ظهور الكهرباء النووية المنخفضة التكلفة [16]، التي لها بعض السلبيات الكبيرة والهامة من حيث صعوبة وتكلفة تخزينها الكهرباء، بالتالي تم التوجه لتخزين ضخ المياه واستخدام ميزات الجغرافية الأرضية لمواقع محددة. حيث أن تكنولوجيا البطاريات اليوم لا يمكن أن تحقق تخزين اقتصادي على المدى الطويل أو تلبية التكلفة المطلوبة لتنقل المركبات. النموذج المخبري لجميع المركبات الكهربائية مثل EV1 لجنرال موتورز لا توفر مجال قيادة كبير (مئات الأميال) التي يطمح إليها الناس في السيارات. والقضية الرئيسية الأخرى في قطاع النقل هي أن زمن الشحن لتطبيقات العربة يمكن أن يأخذ 4 ساعات تعتمد على حالة الشحن، بينما في تطبيقات الوقود السائل أو الغازي يمكن أن تأخذ وقت أقل من 5 دقائق.

كما تناولت شركات توليد الطاقة الكهربائية الفوائد المحتملة المشتركة لاقتصاد الهيدروجين والاقتصاد الكهربائي، وقد طورت فكرة اقتصاد الهيدروجين الكهربائي لوصف إمكانية الجمع بين الإنتاج والنقل، ومبيعات كل من شركات الطاقة. هذه الفكرة تدمج بين الإنتاج والتخزين، وقد استخدمت لتحقيق أقصى قدر من كفاءة النظام.

2-1- إمكانيات استخدام مصادر الطاقة المتجددة -الريحية الشمسية

Potential from Renewable Energy Sources—Wind and Solar

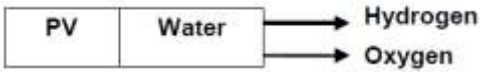
ولدت فكرة استخدام الطاقة المتجددة لتوليد الكهرباء المستخدمة في التحليل الكهربائي في أوائل 1900. وفي عام 1923، اقترح جون هالدين إنتاج الهيدروجين والأكسجين عن طريق التحليل الكهربائي من الكهرباء المولدة من العنفات الريحية. حيث يمكن تخزين الهيدروجين والأكسجين واستخدامها في وقت لاحق لتوليد الكهرباء عن طريق ICEs أو خلاليا الوقود عند الحاجة للطاقة الكهربائية أو للأغراض الصناعية، النقل، أو تطبيقات التدفئة [17].

تم الحديث في ثلاثينيات القرن الماضي عن استخدام عنفة ريحية بمجال ميجاوات لإنتاج الكهرباء لاستخدامها من أجل انتاج الهيدروجين [18]. واقترح استخدام العنفات الريحية البحرية بمجال ميجاوات لتحليل مياه البحر.

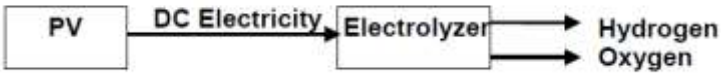
مع ظهور تقنيات جديدة للطاقة الشمسية في الستينات والسبعينات، أقترح التحليل الكهربائي عبر الطاقة الشمسية وتم دراستها من قبل العديد من المهتمين والباحثين [19]. ومنذ ذلك الوقت هناك عدة تجارب حول استخدام الطاقة الشمسية و نظم الخلايا الضوئية (PV) لتوليد الكهرباء المستخدمة لإنتاج الهيدروجين [20]. وكذلك هناك الكثير

من الابحاث حول استخدام طاقة الرياح لإنتاج الكهرباء لأجل التحليل الكهربائي [21]. وتناقش هذه الابحاث التحليل الكهربائي الريحي وتشمل تقنيات تحقيق الأمثلية في كفاءة المحللة عن طريق استخدام كامل طاقة العنفة والمحللة والتكامل مع الكترونيات القدرة المستخدمة في تبديل وقيادة نظام الطاقة الريحي.

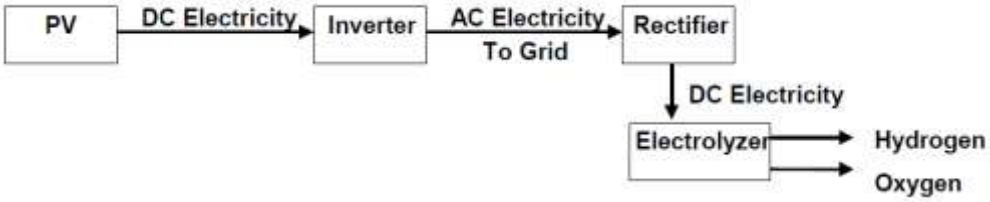
يبين الشكل (8–a–e) عدة طرق لاستخدام الطاقة المتجددة (الكهربائية) من الخلايا الشمسية PV و طاقة الرياح لإنتاج الهيدروجين. الشكل (8–a) يبين التحويل المباشر للماء إلى هيدروجين وأكسجين عبر التحليل الكهروكيميائي المباشر (PEC). يظهر في هذه الحالة أكثر الطرق مباشرة وفعالية لإنتاج الهيدروجين من الماء، ولكن لا يزال في مراحل البحث. الشكل (8–b) يستخدم الخلايا الكهروضوئية لإنتاج طاقة كهربائية مستمرة وتوصل مباشرة إلى مكدس (حزمة) المحللة. الشكل (8–c) تقدم الطاقة للشبكة من خلايا الجهد PV عبر المبدل Inverter، التي تستخدم بعد ذلك لإنتاج الهيدروجين عن طريق التحليل الكهربائي. هذه الطريقة تسمح بإنتاج الكهرباء من الطاقة الشمسية ليكون بشكل منفصل عن إنتاج الهيدروجين. ويبين الشكلين (8–d,e) مسارين للهدروجين الريحي ويتم إنتاج الكهرباء في موقع الريح، ونقله لنقطة توليد الهيدروجين عن طريق الشبكة، وكذلك تستخدم الرياح للاشتراك بإنتاج الهيدروجين وكهرباء الشبكة في موقع الرياح. ففي الشكل (8–d) المقوم مستخدم لإنتاج الطاقة الكهربائية المستمرة لمكدس المحللة. في الشكل (8–e) التيار الكهربائي المستمر يؤخذ من المقوم داخل العنفة الريحية ويوصل مباشرة إلى المحللة.



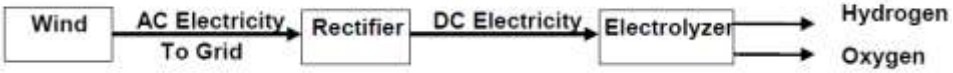
الشكل a التحليل المباشر للماء باستخدام ألواح PV.



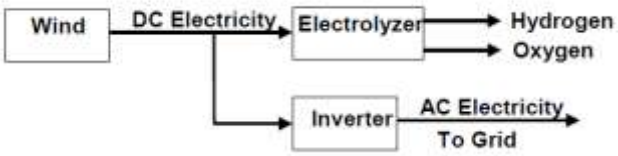
الشكل b وصل مباشر لألواح PV للمحللة.



الشكل c التحليل الكهربائي بتوصل ألواح PV للشبكة.



الشكل d.



الشكل e الوصل المباشر لجهد العنفة المستمر مع المحللة عبر وصل اختياري مع الشبكة.

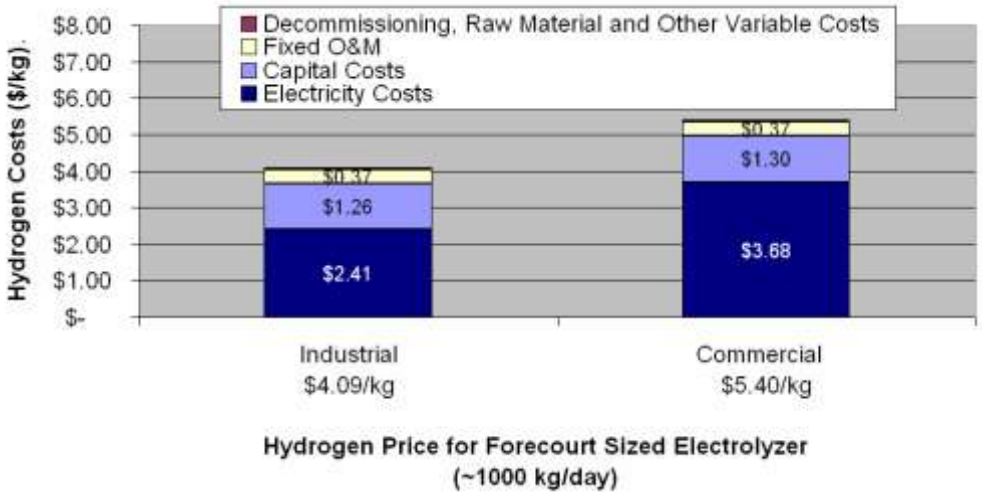
الشكل (8) تكوين نظام التحليل الكهربائي الريحي الشمسي.

تناولت إحدى الدراسات [22] إمكانية إنتاج الهيدروجين من مصادر الطاقة المتجددة بما في ذلك الطاقة الشمسية وطاقة الرياح. وتبين هذه الدراسة أن الولايات المتحدة مثلا لديها موارد الطاقة الشمسية وطاقة الرياح الكافية لتلبية احتياجات الوقود للنقل والمواصلات. ومع ذلك تواجه أنظمة الطاقة المتجددة التحديات للحد من تكلفة الطاقة الكهربائية وتلبية احتياجات الطاقة من محطات الوقود الموزعة.

في الماضي كانت العوائق الكبرى لاستخدام طاقة الرياح وتقنيات الطاقة الشمسية هي التكاليف المالية الباهظة لتلك التقنيات والطبيعة المتغيرة للموارد. وعلى مدى 30 سنة الماضية، انخفضت تكاليف الطاقة الشمسية والريحية بشكل ملحوظ.

2-2-اقتصاديات التحليل الكهربائي Economics of Electrolysis:

يبين الشكل (9) تكلفة إنتاج الهيدروجين عالميا من نظام التحليل الكهربائي بشكل عام والذي يستخدم إما اسعار الكهربائية التجارية أو الصناعية [22]. وأجري هذا التحليل بأداة تحليل الهيدروجيني Hydrogen (H2A) Analysis، والتي طورت لتسمح للمحللين باستخدام طريقة ثابتة، ومنهجية قياسية، وفرضيات شفافة تبين تكاليف إنتاج الهيدروجين [23].



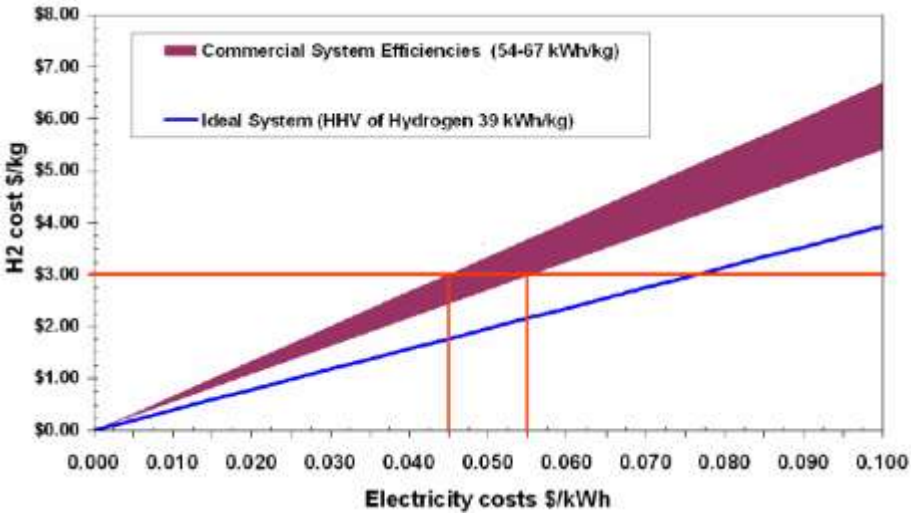
الشكل (9) عناصر تكاليف الهيدروجين

يستخدم في أداة تحليل الهيدروجين H2A واحدة قياسية $/Kg لسعر الهيدروجين لأن الكيلو غرام من الهيدروجين لديه تقريبا نفس محتوى الطاقة لـ 3.785412 ليتر من البنزين. فإذا كان الكيلوغرام من الهيدروجين و3.785412 ليتر من البنزين لهما نفس ثمن التكلفة و يحرقهم المحرك بنفس الكفاءة، بالتالي فإن النتيجة $/Km ستكون واحدة.

اعتمدت اسعار الكهرباء في هذه الدراسة على تقديرات H2A القياسية من 2005 حتى 2045. حيث الاسعار الصناعية $0.044-$0.050/KWh، مع تكلفة $0.045/KWh في 2005. وكانت الاسعار التجارية

$0.067/KWh –$0.077/KWh مع تكلفة $0.069/KWh في 2005. حيث أن تكاليف الكهرباء هي المساهم الأبرز في تكاليف إنتاج الهيدروجين عبر التحليل الكهربائي بمعدل 06% و68% من التكلفة الإجمالية عندما تستخدم أسعار الكهربائية الصناعية والتجارية، على التوالي. وتعتبر تكاليف المرتفعة للتجهيزات هي ثاني أكبر المساهمين في تكاليف الإنتاج.

حددت وزارة الطاقة الأمريكي (DOE) سعر تكلفة الهيدروجين بحوالي $3.00/kg–$2.00 لتخديم سوق النقل [24]. يبين الشكل (10) تكاليف الإنتاج وفق المنحنيات البيانية المبينة لتتضمن تكاليف الإنتاج فقط بدون التسليم (التوصيل). و لتحقيق هذا الهدف فإن تكلفة إنتاج الهيدروجين بواسطة التحليل الكهربائي باستخدام الكهرباء الصناعية تحتاج إلى تخفيض بنسبة لا تقل عن 1.00$، وعلى الارجح أكثر من 2.00$ (دولار في عام 2005) لتلاقي أهداف التكلفة الاقتصادية لإنتاج الهيدروجين.



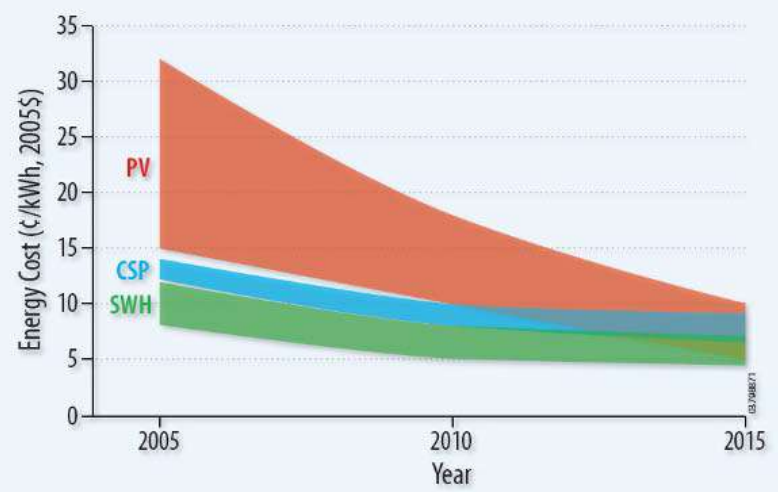
الشكل(10) تكاليف الهيدروجين مقابل الكهرباء بدون تكاليف التجهيزات.

هناك فرص وامكانيات لتخفيض تكاليف تشغيل المحللة، ولكن تعتبر أسعار الكهرباء هي العامل الرئيسي لتكلفة الهيدروجين. تكاليف الكهرباء مقابل الهيدروجين المبينة في الشكل السابق، تأخذ بالحسبان فقط تكلفة الكهرباء التي تُستخدم لتحليل (تفكيك) المياه إلى الهيدروجين والأوكسجين، تمثل هذه الارقام القيم الحدية لتكاليف الإنتاج بتقنية التحليل الكهربائي. إذا كان التحليل الكهربائي في المحللة حراً، أي بدون تكاليف تشغيل وصيانة أو أي تكاليف أخرى باستثناء تكاليف الكهرباء، ويتم العمل على عامل سعة 100% ولا يوجد تكاليف خدمة تسليم أو التوزيع. بهذه الحالة سيظهر لنا التكلفة التي يمكن أن ينتج بها الهيدروجين. وقد بينت النتائج عملياً أنه لتحقيق الأهداف الاقتصادية بالوصول إلى تكلفة إنتاج 3.00$/kg، وعمل المحللات بكفاءة نحتاج إلى طاقة كهربائية بأسعار أقل من 0.045–0.055kwh$. وعند العمل المثالي للنظام كما وضحنا سابقا نحتاج إلى طاقة كهربائية بأسعار أقل من 0.075/kwh$ والتي تمثل أعلى سعر للطاقة الكهربائية الذي يجعل محللات درجة الحرارة المنخفضة قابلة للاستخدام في إنتاج الهيدروجين عند تكلفة 3.00/kg$.

إن من أفضل الطرق الواعدة لتوفير طاقة نظيفة محلية خالية من الكربون لوحدات التحليل الكهربائي تكمن بإنتاج الطاقة الكهربائية من التقنيات الريحية والشمسية. على الرغم ما تواجه هذه التقنيات من تحديات باستخدام التحليل الكهربائي في مناطق تغير التكلفة وطاقة الإنتاج. حيث أن كلا من مصادر الطاقة الريحية والشمسية تولد الطاقة

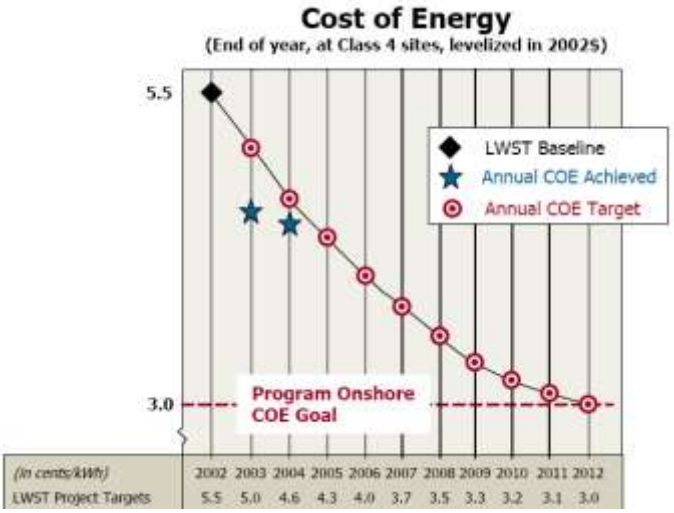
الكهربائية بشكل متفاوت ويختلف باختلاف المصدر الطبيعي الذي يسبب توليدها. ففي الولايات المتحدة مثلا فإن عوامل القدرة النموذجية بالنسبة للنظم الشمسي هي% 25 والنظم الريحية حوالي 35%. هذه القيم تتباين (تتفاوت) عبر أنحاء العالم بحسب جودة المصدر.

فالتقنيات الشمسية المتضمنة ألواح PV، والطاقة الشمسية المركزة Concentrating Solar Power (CSP)، وكذلك تسخين المياه بالطاقة الشمسية Solar Water Heating. قد شهدت هذه التقنيات انخفاض دراماتيكي بالأسعار منذ السبعينات. وتكاليف هذه التقنيات من عام (2005) وحتى عام (2015) مبينة بالشكل (11). وهذا يدل بأن تقنيات الطاقة الشمسية التي تحول الطاقة الشمسية (الضوئية) إلى تيار كهربائي متناوب (AC) ليست قادرة على تلبية مستويات $/kWh اللازمة لتلبية أهداف التكلفة الاقتصادية المطلوبة، والمحددة لإنتاج الهيدروجين في عام 2015. وهناك عدة طرق لتحسين أداء مصفوفة ألواح (PV) ومنها الوصل المباشر بالمحللات الكهربائية والتي يمكن أن تلبي أهداف التكلفة. حيث أن مصفوفة ألواح PV تنتج تيار كهربائي مستمر (DC) وعمل المحللة بأقطاب التحليل يحتاج تيار كهربائي مستمر (DC)، مما يجعلنا نستغني عن بعض إلكترونيات القدرة المستخدمة لتحويل خرج تقنيات مصفوفة PV إلى جهد متغير (AC) بالتالي يصبح نظام التحليل الكهربائي أكثر اقتصادية.



الشكل(11) تكلفة التقنيات الشمسية (2005–2015) [26]

وقد شهدت تقنيات العنفة الريحية أيضاً انخفاض هام وكبير في تكلفة الطاقة (COE) منذ السبعينات. العنفات الريحية يمكنها حالياً إنتاج الطاقة الكهربائية بتكلفة $0.055–0.045/kWh في المناطق الريحية كما في الفئة 4 للمناطق الريحية المتوفرة في جميع أنحاء الولايات المتحدة، وهذه التكلفة تعتمد على عدة عوامل بما في ذلك تكلفة تجهيزات المشروع. الشكل (12) يبين تكلفة وأهداف إنتاج الطاقة لتقنيات سرعة الرياح المنخفضة (بالسنت) للعنفات الريحية في مناطق الفئة 4 [25].

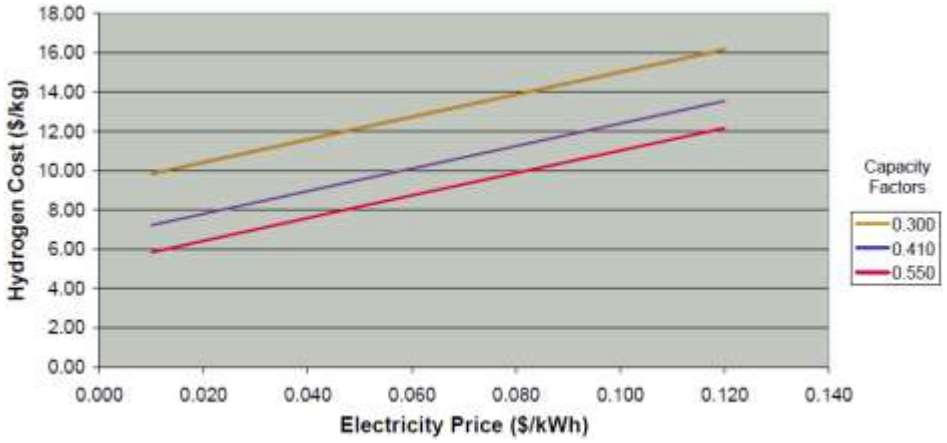


الشكل (12) تكلفة وأهداف إنتاج الطاقة لتقنيات سرعة الرياح المنخفضة (LWST) 2002–2012

إن سرعة ومناطق توزع الرياح مهمة لأنها تحدد عامل قدرة الرياح فكل من عامل القدرة وسعر الكهرباء المنتجة من مزارع الرياح هي معاملات حرجة في اقتصاديات الهيدروجين المنتج من الرياح.

يبين الشكل (13) كيفية تغير تكلفة إنتاج الهيدروجين بعوامل قدرة مختلفة وأسعار الكهرباء لتقنيات التحليل الكهربائي المتوفرة في عام (2005). ففي الوقت الراهن مزارع الرياح ليس لديها قدرة توليد كهربائية كافية لذلك يتم شراء جزء من الطاقة من الشبكة، حيث أن المحللات التي تعمل بهذه الطاقة تعمل بالحد الأعلى لقدرة مزرعة الرياح عند عامل القدرة من 30%،41% أو 50%.

إن تكلفة الطاقة المنتجة من مزرعة الرياح تختلف بالنسبة لكل عامل قدرة، مما يحدد تأثير تكاليف الكهرباء وعوامل القدرة على إنتاج الهيدروجين. وكلما ارتفعت تكاليف الكهرباء أدى ذلك إلى ارتفاع تكاليف تقنيات مزرعة العنفات الريحية، والعكس صحيح، وكلما كانت عوامل القدرة أعلى للمحطات الريحية كلما ارتفعت كفاءتها، وكلما انخفضت عوامل القدرة انخفضت كفاءتها.



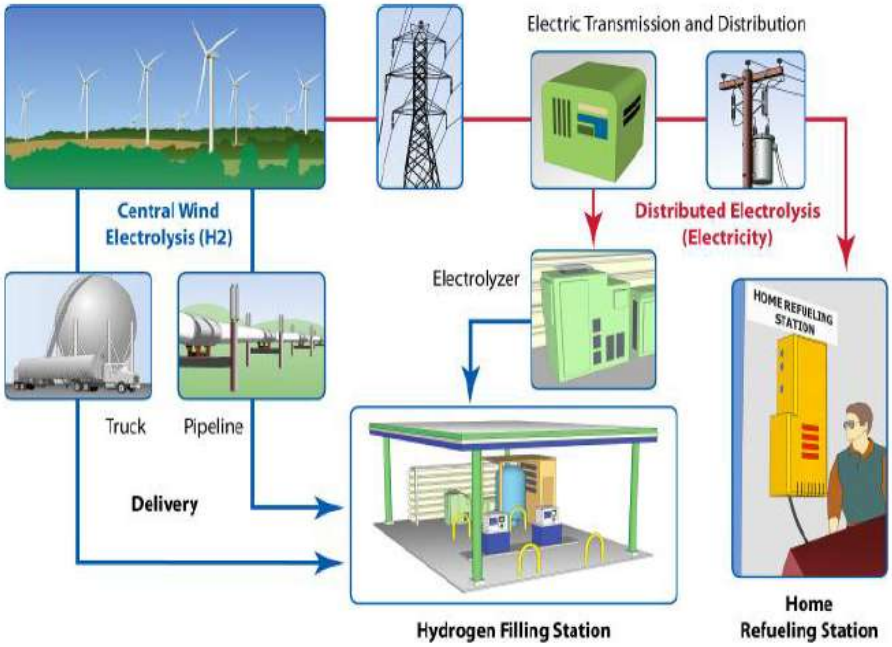
الشكل(13) نظام إنتاج الهيدروجين بطاقة الرياح عام (2005): تأثير عامل القدرة و سعر الكهرباء على تكاليف إنتاج الهيدروجين بـ $/kg.

تعتمد النظرة المستقبلية على اعداد افضل الخطط الصناعية أخذة بالاعتبار الفرضيات والاحتمالات الممكنة لتحقيق الأداء الأفضل والاقتصادية في الإنتاج. الشكل (14) يبين تغير تكلفة إنتاج الهيدروجين عند عوامل قدرة وتكاليف كهرباء مختلفة مستقبلا، حيث تكاليف المحللة تنخفض وتزداد كفاءتها، وكذلك تأخذ تكاليف التسليم والتوزيع بالانخفاض. حالات عامل القدرة الأعلى تسمح لمزارع الرياح التي لديها الإمكانية لشراء الكهرباء من الشبكة بعمل المحللة عند عامل قدرة تشغيلي أعظمي 97%. حيث عوامل القدرة وأسعار الكهرباء تعمل على تحديد الآثار المترتبة على إنتاج الهيدروجين من هذا النظام، و تمثل أسعار الكهرباء الأعلى تكاليف أعلى لتقنيات الرياح، وتكاليف أعلى للشبكة الكهربائية أو الاثنين معا. و إن كل تخفيض لعامل القدرة يمكن أن يمثل نظام بأقل توفير لطاقة الرياح أو نظام بأقل توفيرا للشبكة الكهربائية بأسعار الكهربائية المحددة.

نجد في الوقت الحالي إن عامل القدرة وأسعار الكهرباء تؤدي إلى زيادات أكبر في سعر الهيدروجين بالمقارنة مع التطور المستقبلي. سعر الكهرباء الكبير للأنظمة الحالية الأقل كفاءة تحتاج 53.4 kWh لإنتاج كيلو غرام من الهيدروجين، أما في الأنظمة المستقبلية نحتاج لـ 44.5kWh لإنتاجه. تؤدي تكلفة الطاقة العالية إلى ارتفاع سعر الهيدروجين في الأنظمة الحالية بسبب الزيادة المطلوبة في الكهرباء لإنتاج كيلو غرام من الهيدروجين. ويظهر هذا التحليل البسيط أهمية تحقيق حد أقصى لعوامل قدرة أنظمة إنتاج الهيدروجين من طاقة الرياح والتقليل من تكاليف الكهرباء المولدة من طاقة الرياح، أو مزيج نظام طاقة شبكة/ريحي.

الشكل(14) نظام إنتاج الهيدروجين بطاقة الرياح المستقبلي حتى (2030):
تأثير عامل القدرة و سعر الكهرباء على تكاليف إنتاج الهيدروجين وفق نموذج H2A بـ $/kg.

وهناك جانب آخر مهم من التكلفة النهائية للهيدروجين هو ما إذا كان يتم إنتاجه مركزياً أو إنتاجه بطريقة موزعة عند نقطة الاستخدام، كما في الشكل (15). وقد أظهرت الدراسات الحديثة أن إنتاج الهيدروجين في المستقبل من طاقة الرياح سيكون إما من مزارع الرياح أو عند نقطة الاستخدام ، مما يعطيه القدرة على تلبية أهداف التكلفة الاقتصادية المخطط لها ضمن 2.00–3.00$/ kg$، بما في ذلك الإنتاج والتسليم والتصريف [26].



الشكل(15) أمثلة على التحليلات الكهربائية الريحية المنتجة محلياً أو موزعة عند نقاط الاستخدام.

2-3- نظم تخزين الطاقة Energy Storage Systems:

إن تخزين الطاقة يعتبر من العناصر الاساسية في تحقيق أهداف الاستدامة في الطاقة التي تؤدي إلى توفيرها وتخفيض تكلفتها. ويعتبر مجال نقل الطاقة الكهربائية والمساهمة في نوعيتها وإدارتها هي المجالات المحتملة لاستخدام نظم تخزين الطاقة بالكامل Energy Storage Systems (ESSs). [27]. تعزز نظم تخزين الطاقة عمل محطة توليد الطاقة الكهربائية وفي الوقت نفسه تزيد في تحسين الكفاءة بتكلفة منخفضة [28]. وكذلك يمكن أن تكون بمثابة المنظم الذي يدير التقلبات في الاستخدام والطلب على موارد الطاقة المتجددة. وهناك عدة أنوع مختلفة لتخزين الطاقة يمكن استخدامها مثل: تخزين الطاقة من الهواء المضغوط (CAES)، تخزين الطاقة بدولاب الحدافة (FES)، تخزين الطاقة كهرومائياً (PHES)، تخزين الطاقة بالبطاريات (BES)، تخزين الطاقة ببطارية تدفق (FBES)، تخزين الطاقة المغناطيسية الفائقة الناقلية (SMES)، تخزين الطاقة بالمكثفات الفائقة السعة (SCES)، تخزين الطاقة الهيدروجينية، الوقود الاصطناعي، وتخزين الطاقة الحرارية (TES) [28]. ويمكن استخدام تقنيات نظم تخزين الطاقة ESS في تطبيقات مختلفة اعتمادا على خصائص متعددة وبارامترات معينة مثل: الطاقة، كثافة الطاقة، وزمن الاستجابة، ومقياس التكلفة الاقتصادية، العمر، ونظام ومعدات المراقبة والتحكم، والكفاءة وقيود التشغيل [28].

ولكي يكون نظام تخزين الطاقة مناسب ينبغي أن يحقق عدة خصائص [29]:

1 -قابلية القياس الوزني والحجم والقدرة والكثافة الطاقية.

2 -سهولة التطوير والتكامل مع مصادر الطاقة المتجددة وشبكة الطاقة الموجودة.

3 -الكفاءة العالية للطاقة، والسلامة والأمان للعملية.

4 -الجدوى الاقتصادية في تخزين كمية كبيرة من الطاقة.

5 - إطالة عمر المنظومة والموثوقية والاعتماد على الانظمة والمكونات.

يبين الجدول (2) مقارنة موجزة بين أنواع مختلفة لنظم تخزين الطاقة، من الواضح إن نظم تخزين الطاقة يمن استخدامها إما للتطبيقات كطاقة مكثفة (طاقة لفترة قصيرة نسبيا مع الزمن) أو كقدرة مكثفة (قدرة لفترة طويلة نسبيا مع الزمن). تعتبر البطاريات من بين نظم تخزين الطاقة هي الخيار الاكثر شيوعا لتخزين الطاقة على المدى القصير. ولا يعتبر استخدامها مناسب لتخزين الطاقة على المدى الطويل نظرا لكثافة تخزينها المنخفضة للطاقة وكذلك عملية التفريغ الذاتي [2]. وبناء على ذلك فإنه من الواضح أن أنظمة تخزين الطاقة على أساس تكنولوجيا الهيدروجين هي واحدة من الخيارات الأكثر إثارة للاهتمام [2]. في أنظمة تخزين الهيدروجين، الطاقة الكهربائية الزائدة يمكن تحويلها إلى هيدروجين من خلال المحللات (EL) وتخزينها في خزانات الضغط. وفي وقت لاحق يمكن استخدام الهيدروجين المخزن لإنتاج الطاقة الكهربائية في خلايا الوقود (FC) كما أوضح كاو وآخرون، (2014) [29].

الجدول (2) مقارنة موجزة بين أنواع مختلفة لنظم تخزين الطاقة ESS.

Technology	Capital cost ($/kWh)	Durability (Year)	Power density (W kg^{-1})	Gravimetric energy density (Wh kg^{-1})	Energy Efficiency (%)
Li-ion battery	600-2500	5-20	100-5000	75-250	85-90
Super-capacitor	300-2000	20+	500-5000	0.05-30	97
Pumped-hydro	5-100	40-100	-	0.5-1.5	70-87
Hydrogen	2-20	30	-	400-1000	-
Flywheel	1000-5000	15-20	400-1600	5-130	80-99
Pressurized air	2-50	20-100	-	30-60	40-80

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

1 اثبتت الدراسات أن التحليل الكهربائي هو وسيلة فعالة من حيث التكلفة لإنتاج الهيدروجين من مصادر الطاقة النظيفة بما في ذلك مصادر الطاقة المتجددة الشمسية والريحية.

2 التحليل الكهربائي يمكن أن يلبي التكلفة الاقتصادية المقدرة $2.00–$3.00/kg للهيدروجين إذا توافرت طاقة كهربائية قليلة التكلفة.

3 هناك موارد طاقة شمسية وريحية كافية يمكن استخدامها لإنتاج الهيدروجين بالتالي توفير وقود نظيف خال من الكربون.

4 إن تحول قطاع النقل إلى الهيدروجين المنتج من مصادر الطاقة النظيفة يزيد الاستقلالية في مجال الطاقة وخفض مستويات الكربون والتلوث.

5 عملية التحليل الكهربائي بالاعتماد على الطاقة المتجددة تركيز على ثلاث جوانب: توافر مصادر الطاقة الشمسية والريحية– تحليل التكاليف– تحديد متطلبات الطاقة السنوية.

- التوصيات:

1 نوصي بتطبيق تقنية التحليل الكهربائي لإنتاج الهيدروجين الحامل للطاقة وكوقود نظيف بالاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة.

2 نوصي بالاعتماد على الهيدروجين في قطاع النقل والطاقة الكهربائية باعتباره حامل مستقبلي للطاقة لما يتمتع به من توافر تكنولوجيا الإنتاج والتخزين، ولما له من الاثار الإيجابية من الناحية الاقتصادية والبيئية.

3 العمل على الإنتاج المحلي للمحللات والبحث في زيادة كفاءتها من خلال دراسة تصاميم مختلفة والاعتماد على مصادر طاقة بأقل التكاليف.

المراجع:

[1] Montoya F. G., Aguilera M. J., Manzano-Agugliaro F. Renewable energy production in Spain: A review. Renew Sustain Energy Rev, 2014; 33, 509–53.

[2] Kumar A., Kumar K., Kaushik N., Sharma S., Mishra S. Renewable energy in India: current status and future potentials. Renew Sustain Energy Rev, 2010; 14(8), 2434-2442.

[3] Pudukudy M., Yaakob Z., Mohammad M., Narayanan B., Sopian K. Renewable hydrogen economy in Asia–Opportunities and challenges: an overview. Renew Sustain Energy Rev, 2014;30, 43–757.

[4] Cau G., Cocco D., Petrollese M., Knudsen S., Milan C. Energy management strategy based on short-term generation scheduling for a renewable microgrid using a hydrogen storage system. Energy Conversion and Management, 2014; 87, 820–831.

[5] WYLD GROUP PTY LTD. Hydrogen Technology Roadmap, Australian, 2008.

[6] Persistence Market Research "Hydrogen Market - Global Study on Hydrogen" New York City, 2014.

[7] N. Lymberopoulos, "Hydrogen Production from Renewables," Center for Renewable Energy Sources (C.R.E.S), Pikermi Attiki, Project Technical Assistant Framework Contract EESD Contract No: NNE5-PTA-2002-003/1, September 2005.

[8] D. H. Smith, "Industrial Water Electrolysis," in *Industrial Electrochemical Processes*, A. T. Kuhn, Ed.: Elsevier Publishing Company, 1971, pp. 127−157.

[9] A. Konopka and D. Gregory, "Hydrogen Production by Electrolysis: Present and Future," presented at 10th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, IEEE Cat. No. 75CHO 983-7 TAB, 1975.

[10] "Technology Brief: Analysis of Current-Day Commercial Electrolyzers," NREL, Golden, CO NREL/FS-560-36705, September 2004.

[11] Badwal S.P.S., Giddey S., Ciacchi F. T. Hydrogen and oxygen generation with polymer electrolyte membrane(PEM)-based electrolytic technology. Ionics, Springer,2006; 12, 7-12.

[12] Ulleberg. Modelling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach. 2003; IJHE, 28, 21-33.

[13] E. Chapman, "Production of Hydrogen by Electrolysis," *Chemical Process Engineering*, vol. 44, pp. 387−393, 1965.

[14] Brown L. F. A comparative study of fuels for on-board hydrogen production for fuel-cell-powered automobiles. IJHE, 2001; 26(4), 381-397.

[15] Larminie J., A. Dicks, "Fuel cell systems explained," John Wiley & Sons Ltd, England, 2003.

[16] D. Gregory, "A Hydrogen-Energy System," Report for American Gas Association, Cat. No. L21173, August 1972.

[17] J. B. S. Haldane, "DAEDALUS or Science and the Future." Cambridge, 1923.

[18] P. Hoffman, "Tomorrow's Energy - Hydrogen, Fuel Cells, and the Prospects for a Cleaner Planet," The MIT Press, 2001.

[19] J. Bockris, Energy The Solar-Hydrogen Alternative. New York: John Wiley & Sons, 1975.

[20] R. Foster, R. Tison, and W. Escher, "Solar/Hydrogen Systems for the 1985-2000 Time Frame," Final Report Jet Propulsion Laboratory, June 1980.

[21] E. Ben-Dov, P.S. Rudman, and Y. Naot, "Hydrogen Fuel Production by Wind Energy Conversion," Alternative Energy Sources, Vol. 8 Hydrogen Energy, pp.3563-3569, 1978.

[22] J. I. Levene, M. K. Mann, R. Margolis, and A. Milbrant, "Analysis of Hydrogen Production from Renewable Electricity Sources," NREL, Golden, CO Report No. CP-560-39702, 2005.

[23] "DOE Hydrogen Program: DOE H2A Analysis," Retrieved on June 29, 2006 from www.hydrogen.energy.gov/h2a_analysis.html.

[24] "Hydrogen Cost Targets." Retrieved on June 22, 2006 from www.hydrogen. energy.gov/news_cost_goal.html , 2005.

[25] "Wind Energy Multi Year Program Plan for Year 2005-2010," NREL Wind and Hydro Power Technologies Program, November 2004, www.nrel.gov/wind_meetings/ 2003, imp_meeting, pdfs, 15Nov2004.pdf.

[26] J. Levene, B. Kroposki, and G. Sverdrup, "Wind Energy and Production of Hydrogen and Electricity - Opportunities for Renewable Hydrogen," NREL Report No. CP-560-39534, 2006.

[27] Mahlia T.M.I., Saktisahdan T.J., Jannifar A., Hasan M.H., Matseelar H.S.C. A review of available methods and development on energy storage; technology update. Renew Sustain Energy Rev, 2014; 33, 532–545.

[28] Naish C., McCubbin I., Edberg O., Harfoot M. Outlook of energy storage technologies. Brussels: Policy department economic and scientific policy, 2007.

[29] Cau G., Cocco D., Petrollese M., Knudsen S., Milan C. Energy management strategy based on short-term generation scheduling for a renewable microgrid using a hydrogen storage system. Energy Conversion and Management, 2014; 87, 820–831.