الفصل التاسع

الهيدروجين كوقود للنقل
HYDROGEN AS A TRANSPORTATION FUEL

(٩,٠) خلفية تاريخية
Historical Perspective

بالرغم من أن الهيدروجين مستخدم منذ ما يزيد على قرن، فإنه كان مستخدماً في الغالب كلقيم كيميائي (chemical feedstock) وليس كمصدر للطاقة. ونظراً لخصائصه الحرارية فإن الهيدروجين يستعمل كوقود ذي درجة حرارة عالية لأغراض اللحام. كان الاستخدام الرئيس للهيدروجين كوقود للنقل موجوداً في برنامج غزو الفضاء في النصف الثاني من القرن العشرين. وقد كان الغرض من استخدام الهيدروجين كوقود نقل في الفضاء هو الحصول على الدفع العالي المطلوب لدفع مركبات الفضاء خارج مجال الجاذبية الأرضية، وقد أدى الهيدروجين دوره بشكل جيد في هذا المجال، وكان احتراق الهيدروجين السائل (LH_2) مع الأوكسجين السائل (LOx) يعطي قوة الدفع تلك ويحافظ على وزن الوقود منخفضاً في الوقت نفسه. وتسارعت عملية تطوير إجراءات إنتاج الهيدروجين (عملية تحوير بخار الماء والميثان بشكل رئيس) مع حاجة وكالة الفضاء الأمريكية لكميات كبيرة من الوقودين السائلين. وأدت الخبرة والدروس التي تم تعلمها في تلك الفترة إلى نشوء اهتمام أوسع بإمكانية استخدام وقود الهيدروجين في

أشكال أخرى من النقل: كالنقل الجوي، والبحري، والبري. وبحلول تسعينيات القرن العشرين بدأت برامج وطنية في هذا المجال في ألمانيا [1] واليابان [2]، كما بدأ برنامج وطني بشكل أبطأ في الولايات المتحدة [3]. وبنهاية القرن العشرين، أصبح هناك وعي شعبي بإمكانية استخدام مركبات تعمل بمحركات خلايا الوقود ويكون وقودها هو الهيدروجين، وذلك من خلال الوسائل الإعلامية ومن خلال الخطابات الرئاسية عن حالة الاتحاد وخطابات حاكمي الولايات.

(٩,٠,١) وقود الهيدروجين في مجال الطيران Hydrogen Fuel in Aviation

يُعد وقود الهيدروجين السائل (LH_2) منذ زمن طويل وقود طيران بديلاً للمحركات التوربينية [1,2]. وهناك العديد من المتطلبات التقنية التي يجب أن تتحقق لإثبات جدوى استخدام وقود الهيدروجين السائل كبديل لوقود الطيران الاعتيادي [٤]. إن العاملين الأساسيين في استخدامه في مجال الطيران هما: (١) إسهامه في زيادة الكفاءة الإيروديناميكية (aerodynamic efficiency) وفي زيادة نسبة قوة الحمل إلى قوة الجر (ratio of lift to drag forces) و(٢) إسهامه في تقليل وزن منظومة الوقود (الوقود وأجهزة التبريد لدرجات شديدة الانخفاض) ليكون هناك تقليل ملحوظ في استهلاك الوقود. ولكي يكون استخدام الهيدروجين كوقود أمراً وارداً في مجال الطيران فلا بد أن يستوفي متطلبات التكلفة، والتوفر، والتخزين، والكثافة الحجمية للطاقة والسلامة، وسهولة المناولة. تنتج مشكلة الوزن (توزيع الوزن) من الحاجة إلى استخدام وقود الهيدروجين في الحالة السائلة في منظومات التبريد لدرجات شديدة الانخفاض. بالرغم من أن الطاقة النوعية للهيدروجين عالية (حوالي ١٢٥ ميجاجول/كجم) (انظر الجدول رقم ٨,١) إلا أن الكثافة الحجمية له منخفضة جداً (حوالي ١٠ ميجاجول/م^3 عند الظروف القياسية). وحتى في الحالة السائلة فإن الطاقة الحجمية للهيدروجين أقل من تلك للبنزين (٨,٥ مقابل ٣٢ ميجاجول/لتر). لقد بدأت عدة دراسات لاستقصاء العوامل الهندسية لجدوى استخدام الهيدروجين في الطيران، إذ إن هناك شركتي

تصنيع طائرات على الأقل (إيرباص وبوينج) لديها برامج تهدف إلى عرض فكرة إمكانية طيران الطائرات باستخدام منظومات خلايا وقود الهيدروجين.

(٩,٠,٢) وقود الهيدروجين في المجال البحري

Hydrogen Fuel in Marine Technology

ظهر الاهتمام باستخدام وقود الهيدروجين في السفن البحرية على الرغم من تأخر التطوير في هذا المجال عن التطوير في مجال استخدامات خلايا وقود الهيدروجين في مجال الطيران والمركبات الأرضية. وتم الإعلان عن مشروعين على الأقل للبحث في استخدام خلايا وقود الهيدروجين في تزويد السفن البحرية بالقدرة الكهربائية وبالدفع. أحد هذه المشاريع هو المحاولة القائمة في آيسلندا [5] لإنشاء اقتصاد وطني قائم على وقود الهيدروجين ليحل محل اعتماد تلك الدولة على النفط المستورد. إن أحد الأهداف الرئيسة لهذا البرنامج هو التحول إلى أسطول صيد بحري يعمل بخلايا الوقود، حيث إن الصيد مهم في الاقتصاد الآيسلندي. أما المشروع الآخر فهو اتحاد مكون من عدة مؤسسات متخصصة في التقنية المتطورة (مجموعة تطوير تقنية الهيدروجين البحرية) (Maritime Hydrogen Technology Development Group) [6] ويأمل هذا الاتحاد في تشجيع استخدام خلايا وقود الهيدروجين لتحل محل محركات الاحتراق الداخلي في المركبات البحرية على اختلاف أحجامها. وقد كان أول مشروع درسته المجموعة هو تطوير عبّارة تعمل بالهيدروجين وتشغيلها من قبل شركة باسيفيك مارين (Pacific Marine) في هاواي. وكانت من الاستخدامات المحتملة الأخرى عرض عبارة مائية تعمل بخلية وقود هيدروجين وتتسع لثمانية عشر راكباً في عام ٢٠٠٣م في خليج سان فرانسيسكو [7] وقد كانت العبارة مزودة بمحرك يعمل على خلية وقود وعلى بطارية كهربائية معاً صنعته شركة أنوفو (Anuvu. Inc.). وهناك استخدامات بحرية تحت الدراسة من قبل مكتب الأبحاث البحرية (Office of Naval Research. ONR) [8] لتطوير منظومات دفع تستخدم تقنية خلايا الوقود لإنتاج القدرة الكهربائية بكفاءة (ولمرونة

أكبر في التصميم) للسفن في المستقبل. يمول مكتب الأبحاث البحرية تطوير طريقة لاستخلاص الهيدروجين عن طريق تحوير الديزل. من المتوقع أن تكون منظومة خلية الوقود قادرة على العمل بكفاءة تتراوح بين ٣٧ - ٥٢٪ مقارنة بالمحركات التوربينية الغازية الموجودة في السفن البحرية الأمريكية والتي تعمل عادة بكفاءة تتراوح بين ١٦ - ١٨٪ عند السرعات المنخفضة والمتوسطة المعتادة التي لا تتطلب استخدام المحركات عند قدرتها القصوى.

(٩,١) خلايا وقود الهيدروجين في النقل بالمركبات

Hydrogen Fuel Cells in Vehicle Transporation

تركز الاهتمام العالمي بتقنية خلايا الوقود على الهيدروجين كوقود للنقل في السيارات، وكان الهدف الرئيس هو إحلال وقود الهيدروجين الذي يحترق *بشكل نظيف* في خلايا الوقود مكان الوقود الأحفوري الذي يستخدم في محركات الاحتراق الداخلي (ICE). ويؤكد التركيز على عبارة "بشكل نظيف" حقيقة أن درجة حرارة شعلة الاحتراق للبنزين أو الهيدروجين في محرك الاحتراق الداخلي هي حوالي ٢٤٠٠ درجة مئوية طبقاً للتفاعل

$$2H_2 + Air(N_2, O_2, Ar, ...) \Rightarrow 2H_2O + 2NO + ... \qquad (٩,١)$$

ودرجة حرارة الاحتراق هذه أعلى بكثير من درجة الحرارة البالغة ١٥٠٠ درجة مئوية تقريباً في التفاعل

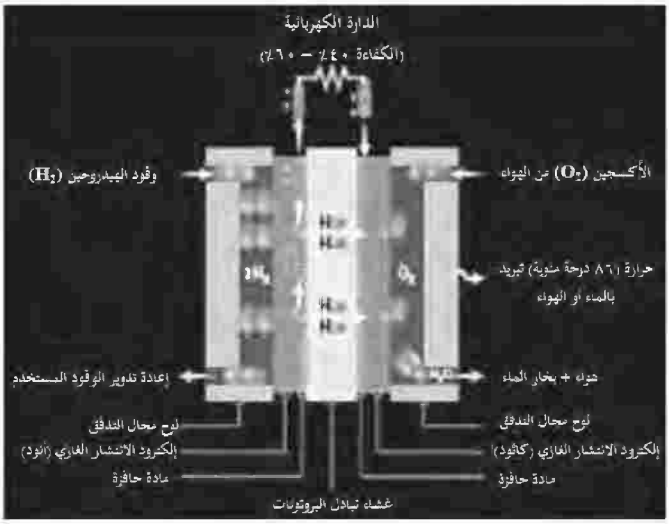
$$N_2 + O_2 \Rightarrow 2NO \qquad (٩,٢)$$

بينما في خلية الوقود يندمج الهيدروجين والأوكسجين عند درجة حرارة تبلغ حوالي ٨٠ درجة مئوية وهي منخفضة لحد لا يسمح بإنتاج أكاسيد النيتروجين.

(٩,١,١) ما هي خلية الوقود بالضبط؟ Just What is a Fuel Cell?

الوصف الموجود لخلية الوقود في عدد لا يحصى من الكتب والبحوث المنشورة هو أن "خلية الوقود، في أبسط أشكالها، هي منظومة كهروكيميائية أجزاؤها جامدة وتقوم بدمج الهيدورجين والأوكسجين لإنتاج الماء والكهرباء." هناك العديد من المصادر المطبوعة والإلكترونية الممتازة التي تستعرض مبادئ خلايا الوقود. من الأمثلة على ذلك الكتاب الأولي الذي نشره معمل لوس آلاموس الوطني [10] كمقرر مناسب لطلاب مراحل التعليم العام. وكعمل مكمل للاستعراض الكامل الذي قام به دوتا (والمشار إليه في مراجع القسم ٨,٢,١) للطرق المتقدمة لإنتاج الهيدروجين بالتحليل الكهربائي للماء، فإن الاستعراض الذي قام به كانون [10] يورد خمسة أنواع من خلايا الوقود ويوضح أبرز سماتها واستخداماتها وكفاءاتها حتى عام ١٩٩٥م تقريباً. والأنواع الخمسة هي: غشاء تبادل البروتونات (proton exchange membrane. PEM)، والحمض الفوسفوري، وخلايا الوقود القاعدية، والكربونات المذابة، والأكسيد الجامد. ويشير المسح الموجود في الدراسة إلى أن خلايا الوقود ذات غشاء تبادل البروتونات هي النوع الواعد في مجال النقل بالمركبات. وهناك العديد من المواقع على الإنترنت التي تستعرض الوضع الحالي لتقنية خلايا الوقود، حيث يصل عدد نتائج البحث عن كلمتي "خلايا الوقود" إلى ١,٦ مليون نتيجة.

يحتوي الشكل رقم (٩,١) على "لقطة" من خلية وقود واحدة يمكن رؤيتها وهي "تعمل" في الموقع الإلكتروني www.ballard.com. وفي المكان الذي يفترض أن يظهر فيه "مصباح كهربائي" ليعبر عن الحمل الكهربائي، تمت الإشارة إلى الكفاءة الإجمالية للخلية. وفي مركبة تعمل بخلايا الوقود (FCV)، تحل خلية الوقود محل البطارية الكهربائية التي توجد في المركبات الكهربائية (EV) والتي تزود المحرك الكهربائي بالتيار اللازم لإدارة الإطارات.



الشكل رقم (٩,١). رسم توضيحي لخلية وقود واحدة عاملة. المصدر: شركة بالارد لمنظومات القدرة.

أما بالنسبة للجزء المعنون "بغشاء تبادل البروتونات" في الشكل رقم (٩,١) في خلية الوقود فإنه جزء يسمح للبروتونات الناتجة من تأين الهيدروجين عند الأنود المسامي

$$H_2 \Rightarrow 2H^+ + 2e^- \qquad (٩,٣)$$

بالنفاذ إلى الكاثود المسامي ليتكون الماء من جراء التفاعل

$$2H^+ + \tfrac{1}{2}O_2 + 2e^- \Rightarrow 2H_2O \qquad (٩,٤)$$

إحدى المشكلات الهامة في خلايا الوقود ذات غشاء تبادل البروتونات هي ضرورة وجود محفز من البلاتين عند الأنود لتفاعل التأين وكذلك عند الكاثود لتفاعل إعادة الدمج لزيادة معدل التفاعل في كلتا الخطوتين بهدف تحقيق الجدوى التجارية.

خلال فترة تطوير مركبات خلايا الوقود كانت المحركات الكهربائية الهجينة متوفرة لتقليل استهلاك البنزين (باستخدام بطاريات كهربائية) من خلال مزيج من إنتاج القدرة في المركبة نفسها وتقنية تخزين الطاقة الكهربائية. وينتج حالياً العديد من السيارات الهجينة التي تستخدم محركات احتراق داخلي مع بطاريات كهربائية (مثل تويوتا بريوس). وقد بدأ تطوير سيارات هجينة تجمع بين خلايا الوقود والبطاريات الكهربائية لتحقيق الهدف نفسه وهو زيادة كفاءة الوقود.

(٩,١,٢) مقدمة بسيطة في الديناميكا الحرارية (الثيرموديناميكا)

A Wee-Bit of Thermodynamics

من المناسب هنا دراسة الفرق الأساسي في الطاقة بين محرك الاحتراق الداخلي وبين خلية الوقود. محرك الاحتراق الداخلي عبارة عن *آلة حرارة*، بينما خلية الوقود ليست كذلك. يكمن الفرق بين الجهازين في قانوني الديناميكا الحرارية (الثيرموديناميكا) اللذين يتطرقان إلى استخدام الطاقة للحصول على شغل *مفيد* من موارد الطاقة.

المحركات الحرارية: المحركات الحرارية هي آلات تحول الطاقة الحرارية إلى طاقة حركية مثل المحركات البخارية في القطارات ومحركات البنزين في السيارات. تخضع المحركات الحرارية للقانون الأول للديناميكا الحرارية الذي يقضي بأن:

"الطاقة يمكن أن تتحول من شكل إلى آخر ولكنها لا يمكن أن تستحدث أو تفنى".

معنى ذلك أن الطاقة الإجمالية لنظام مغلق ثابتة. وبناءً على هذا القانون فقد حاول الكثيرون التوصل إلى صنع آلة مثالية *دائمة الحركة* بحيث تعمل إلى الأبد دون الحاجة إلى إدخال الطاقة لها. إلا أنه مع الأسف يوجد قانون ثانٍ للديناميكا الحرارية يقضي بأن:

"العمليات المتعلقة بالطاقة تقلل من كمية الطاقة المفيدة التي يمكن استخدامها في العمليات التي تليها".

ومعنى ذلك أنه بالإضافة إلى أن الطاقة لها كمية فإن لها جودة. تتفاوت جودة الطاقة من الأنواع *عالية الجودة* مثل الكهرباء والتي يسهل تحويلها إلى أشكال أخرى إلى أنواع أقل جودة مثل الحرارة *المهدرة* والتي يصعب تحويلها إلى أي شكل مفيد.

يتم التعبير عن مدى جودة الطاقة من خلال *كفاءة* العملية الثيرموديناميكية. وهناك حد نظري أقصى لكفاءة المحركات الحرارية، كما استنتج سادي كارنو عام ١٨٢٤م عندما قال (بشكل تقريبي):

"الكفاءة الحرارية النظرية (η) لأكثر المحركات الحرارية كفاءة محكومة بالفرق في درجة الحرارة المطلقة بين مصادر الحرارة ذات درجة الحرارة المرتفعة وذات درجة الحرارة المنخفضة التي يتعامل معها المحرك".

ويعبر عن ذلك بالكفاءة النظرية القصوى لدورة كارنو باستخدام المعادلة الآتية:

$$\eta = (T_2 - T_1)/T_2 \qquad (٩,٥)$$

حيث إن:

T_2 = درجة الحرارة المطلقة لمصدر الحرارة ذي درجة الحرارة المرتفعة (درجة كيلفن)

T_1 = درجة الحرارة المطلقة لمصدر الحرارة ذي درجة الحرارة المنخفضة (درجة كيلفن)

تتحول الطاقة الكيميائية في أي محطة قدرة تعمل بالوقود الأحفوري إلى طاقة حرارية لإنتاج بخار الماء، وذلك بغليه لكي يحرك توربيناً ومولداً كهربائياً بشكل ميكانيكي مما يؤدي إلى إنتاج الكهرباء. في هذا النوع من المحطات، يُعد مصدر الحرارة ذو درجة الحرارة المرتفعة هو بخار الماء الناتج من المرجل [عند ٥٤٧ درجة مئوية (٨٢٠ درجة كيلفن) مثلاً]، بينما مصدر الحرارة ذو درجة الحرارة المنخفضة هو ماء المكثف [عند ٢٧ درجة مئوية (٣٠٠ درجة كيلفن) مثلاً] بعد مروره من خلال التوربين. بالنسبة لمحطة قدرة كهذه فإن الكفاءة الحرارية القصوى لدورة كارنو ستكون:

$$\eta = (820 - 300)/820 = 0.63\ (63\%) \qquad (٩,٦)$$

من الناحية العملية، فإن الكفاءة الفعلية أقل بكثير من هذه القيمة بسبب قلة الكفاءة الحرارية في الفاقد الناتج من انتقال الحرارة من المنظومة (المرجل، أنابيب بخار الماء، الصماما، ...إلخ). يؤدي ذلك إلى خفض الكفاءة الإجمالية لعملية تحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة حرارية *مفيدة* إلى حوالي ٣٥ - ٤٠٪.

خلايا الوقود: تتبع خلية الوقود، كجهاز كهروكيميائي، قانوني الديناميكا الحرارية، ولكنها تتجاوز القيود الخاصة بدورة كارنو عن طريق تحويل الطاقة الكيميائية مباشرة إلى طاقة كهربائية، ملغية بذلك عملية التحويل الوسيطة من طاقة كيميائية إلى طاقة حرارية. يعطي الجدول رقم (٩,١) مقارنة بين عمليتي التحويل المذكورتين. إن مصادر الهدر الرئيسة في كفاءة التحويل لخلية الوقود هي الفاقد من عملية التحوير والفاقد من تشغيل خلية الوقود عند ٨٠ درجة مئوية، والفاقد في عملية تحويل التيار الكهربائي من ثابت إلى متردد.

الجدول رقم (٩,١). مقارنة المحركات الحرارية بخلايا الوقود.

تحويل الطاقة	فاقد الكفاءة في المحرك الحراري (٪)	فاقد الكفاءة في خلية الوقود (٪)
من كيميائية إلى حرارية	٦٠-٧٠	-
من حرارية إلى ميكانيكية	١-٢	-
من ميكانيكية إلى كهربائية	١-٢	-
من كيميائية إلى كهربائية	-	٤٠-٦٠

وتحدد الكفاءة النظرية لخلايا الوقود بناءً على طاقة الاحتراق للوقود (فرق الإنثالبي للوقود، ΔH) وعلى الطاقة التي يمكن استخلاصها بشكل غير الطاقة الحرارية

(التغير في الإنتروبي عند درجة حرارة العملية، TΔS)، ، كما في المعادلة رقم (٨,٢١). إذا نظرنا في التفاعل الكهروكيميائي الإجمالي

$$H_2(g) + \tfrac{1}{2} O_2(g) \Rightarrow H_2O(l) \qquad (٩,٧)$$

فإن فرق الإنثالبي ΔH هو −٢٨٥,٨ كيلوجول/مول (أي أن هناك إطلاقاً للطاقة)، بينما الفرق في طاقة جيبز الحرة هو ΔG = −٢٣٧,١ كيلوجول/مول. الكفاءة النظرية القصوى (كنسبة مئوية) هي :

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} \times 100 = 83\% \qquad (٩,٨)$$

يحدد فرق الجهد الذي يتم الوصول إليه في خلية الوقود من خلال طاقة جيبز الحرة غير الحرارية والخاصة بنصف التفاعل الذي يحدث عند الأنود

$$H_2 \Rightarrow 2H^+ + 2e^- \qquad (٩,٩)$$

ويمكن التعبير عنه من خلال المعادلة الخاصة بطاقة جيبز الحرة (بوحدة كيلوجول/مول) :

$$-\Delta G = n F E_o \qquad (٩,١٠)$$

حيث إن :

n = عدد مولات الهيدروجين (= ٢)

F = ثابت فاراداي = ٩٦٤٨٥ كولوم/مول

E_o = فرق جهد الخلية (بوحدة فولت)

وعليه فإن فرق جهد الخلية المثالي هو $E_o = -DG/nF = (-237.1 \times 1000)/(2 \times 96485) = 1.23$ V.

بالنسبة لتشغيل خلية الوقود عند ٨٠ درجة مئوية (٣٥٣ درجة كيلفن) فإن التغير في الجزء الحراري (TΔS) الناتج عن تغير درجة الحرارة من درجة حرارة الغرفة (أي ٢٥ درجة مئوية أو ٢٩٨ درجة كيلفن) هو ٥٥ درجة كيلفن، مما يقلل فرق الجهد الأقصى للخلية إلى ١,١٨ فولت. هناك تأثيرات أخرى في الخلية تؤدي إلى انخفاض فرق الجهد الأقصى إلى حوالي ١,١٦ فولت، ومن أمثلة هذه التأثيرات استخدام الهواء بدلاً من الأوكسجين ورطوبة الغازات. إن فرق الجهد الفعلي عند تشغيل خلية وقود ذات غشاء تبادل بروتونات هو حوالي ٠,٧ فولت، وذلك يمثل ٦٠٪ من فرق الجهد الأقصى المثالي.

(٩,١,٣) الجوانب المتعلقة باستخدام الهيدروجين كوقود للنقل

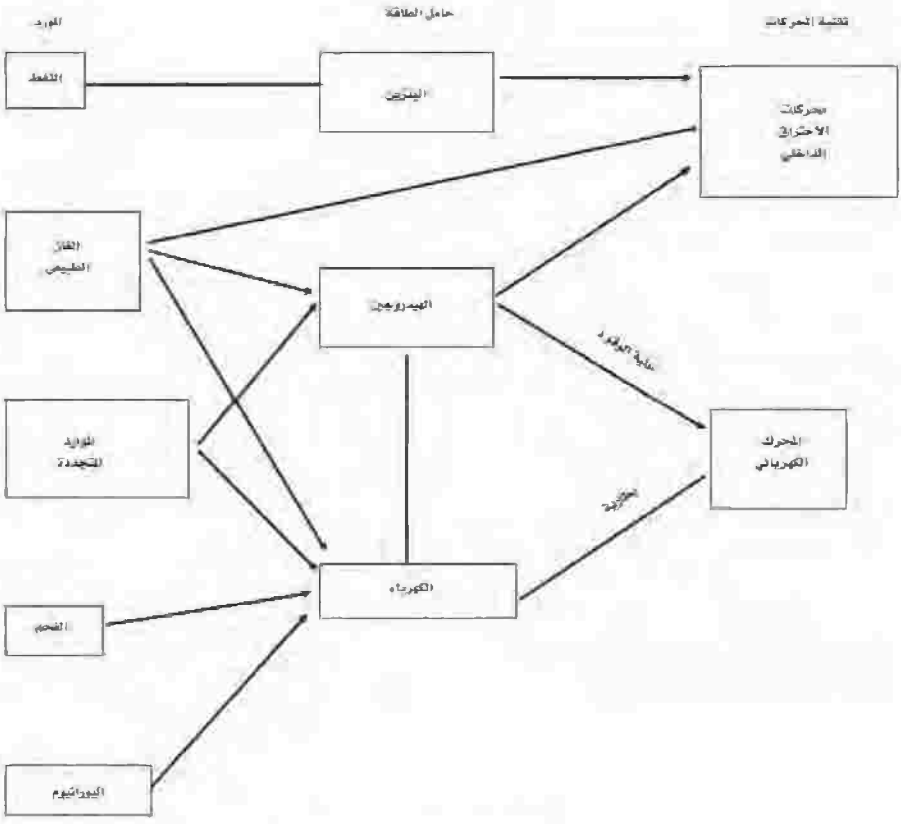
Aspects of Hydrogen as a Transportation Fuel

عند اختيار وقود للنقل هناك ثلاث مجموعات من المعايير ينبغي أن تؤخذ في الاعتبار، إذ لا بد أن يتحقق في أي منها ما يأتي:

- أن يتم اختيار حامل أمثل للطاقة من ضمن موارد الطاقة الأولية.
- أن تكون مميزات المركبة مقبولة من قبل حامل الطاقة.
- البنية التحتية المناسبة لتوزيع الوقود.

موارد الطاقة الأولية للهيدروجين: تم التطرق إلى موارد الطاقة الأولية لإنتاج الهيدروجين في الفصول السابقة من الكتاب. وقد أعد كانون [10] ملخصاً لها، كما يظهر في الشكل رقم (٩,٢).

من الواضح أنه بالنسبة لمحركات الاحتراق الداخلي فإن خيار الراحة والسهولة سيظل هو البنزين (والديزل) طالما أن الإمدادات متوفرة أو أنه سيكون الغاز الطبيعي السائل إذا أنتج بكميات كبيرة. وقد تمت الإشارة إلى أن أنواع الوقود الأخرى المرشحة في فئات الوقود الأحفوري والنووي تتضمن الهيدروكربونات الأعلى، مثل: الميثانول، والإيثانول. والبروبان، والوقود النووي الحراري (النظائر الأثقل للهيدروجين). من ضمن الجوانب التي تؤثر على الاختيار الجدوى التقنية والسلامة والأثر البيئي، وبالطبع الاعتبارات الاقتصادية.



الشكل رقم (٩,٢). موارد الطاقة الأولية لإنتاج وقود النقل [10].

تشتمل مميزات المركبة المحدِّدة لاستخدام وقود ما على الجوانب التقنية الآتية :

١- وزن منظومة تخزين الطاقة على متن المركبة (الوقود نفسه وأجهزة منظومة الوقود).

٢- كفاءة الدفع (مثل متوسط المسافة التي تقطعها المسافة قبل الحاجة إلى إعادة تزويدها بالوقود.

٣- توزيع المساحة (بين الأجهزة والركاب والأمتعة).

٤- سرعة عملية تعبئة الوقود (والتي تقاس مقارنة بالوقت اللازم حالياً لتعبئة البنزين).

أما الجوانب الأخرى للاختيار فما زالت قيد الدراسة. وأحد الجوانب الهامة التي تمت مناقشتها هي اختيار طريقة تخزين الهيدروجين وإيصاله للمستفيدين. بالرغم من أن الاختيار الأرجح في الوقت الحاضر هو غاز الهيدروجين المضغوط، إلا أنه من غير الواضح ما إذا كان حدوث تقدم بحثي كبير في مجال هيدريدات الفلزات الجامدة أو في مجال عوامل الربط الجامدة (أو السائلة) سيجعل تخزين الهيدروجين أكثر جاذبية وأكثر اقتصادية كما هو مأمول. أما اعتبارات السلامة فستكون دائماً في المقدمة. وقد بدأ إعداد التشريعات والمعايير على نطاق دولي لتفادي وجود مقاييس وطنية تعارض بعضها بعضاً، مما يعيق التجارة العالمية.

وقد بدأ كذلك تحليل الأثر البيئي لدورة وقود الهيدروجين (بناءً على تحليل مقارن *عادل* يأخذ في الاعتبار جميع مراحل الدورة بدءاً "بالآبار"). ويقصد بمصطلح الآبار هنا موارد النفط والغاز الطبيعي. وبالرغم من أن هنالك اتفاقاً على أن خلايا وقود الهيدروجين لا تنتج إلا بخار الماء من أنبوب العادم، إلا أن التحليل *العادل* لدورة الوقود يعتمد بشكل كبير على الطاقة الأولية المختارة لإنتاج الهيدروجين. وهنا تظهر بسرعة الانقسامات بين "الخضر" (الذين يقولون إن فرصتنا في البقاء هي باستخدام الطاقة المتجددة فقط)، وبين أنصار النفط (الذين يقولون إنه لن يكون هناك نقص في المستقبل المنظور في الوقود الأحفوري وهو وقود سيصبح أنظف مع الوقت)، وبين أنصار الطاقة النووية (الذين يقولون إنه الوقود الوحيد الذي يمكن أن يلبي الطلب واسع النطاق وسريع النمو على الكهرباء والنقل). سيكون هناك المزيد من النقاش حول هذه القضية في الفصل العاشر.

(٩,١,٤) تصنيف مركبات وقود الهيدروجين وفقاً لنوع الاستخدام

Hydrogen Fuel Vehicles by Application Type

إحدى المشكلات في التقدم إلى مرحلة التطوير النهائية لمحركات خلايا الوقود ذات غشاء تبادل البروتونات هي العدد الكبير من أنواع المركبات التي تنتج حالياً، بدءاً من الدراجات الرِجْلية الصغيرة (scooters) وانتهاءً بالشاحنات الكبيرة. يحتاج كل نوع إلى قدرة معينة للحصول على الأداء الأمثل. لذا لا بد أن تصمم محركات خلايا الوقود لكل نوع من المركبات التي ستُنْتَج خلال الفترة الانتقالية. ومن المشكلات الأخرى سهولة إنتاج مركبات خلايا وقود جديدة بناءً على الاستخدام، في الوقت الذي تنمو فيه البنية التحتية لتوزيع وقود الهيدروجين. لهذا الغرض فإنه من المناسب النظر إلى المركبات التي تعمل بمحركات من خلال أربعة استخدامات تختلف حسب الوزن:

- السيارات: مركبات خفيفة الوزن تستخدم لقضاء حاجة الأفراد. ومن الأمثلة على هذا النوع السيارات الخاصة، وسيارات الأجرة، والدراجات النارية، والسيارات المستأجرة.
- سيارات النقل (van): مركبات خفيفة الوزن تستخدم في توصيل الأشخاص والمعدات والبضائع في نطاق محلي. ومن الأمثلة على هذا النوع ليموزين المطارات، وسيارات الإسعاف، وسيارات توصيل البريد والطرود، والسيارات التي تحمل قطع الغيار.
- الحافلات: مركبات ثقيلة الوزن تستخدم في نقل الأشخاص. مون الأمثلة على هذا النوع حافلات المدارس، وحافلات المدن، وحافلات النقل بين المدن والمقطورات والبيوت المتنقلة.
- الشاحنات: مركبات ثقيلة الوزن تستخدم للبضائع والمواد الثقيلة. ومن الأمثلة على هذا النوع الشاحنات الكبيرة، وشاحنات النقل المتوسط، وخلاطات الإسمنت، وسيارات نقل الأثاث، والمركبات المستخدمة في تشييد الطرق.

في مرحلة نمو البنية التحتية لتوصيل وقود الهيدروجين وتوزيعه، سيعتمد الترتيب الزمني لتصنيع مركبات خلايا الوقود بكميات كبيرة بشكل أساسي على التركيز المبكر على الاختيار بين المنظومة المركزية والمنظومة الموزعة لتزويد المركبات بالوقود. ومن الواضح أن بداية الطلب على أعداد كبيرة من المركبات سيكون على تلك المركبات التي ستستخدم للتنقل المحلي خلال فترات عمل يومي ثابتة، مع إمكانية تعبئتها بالوقود ليلاً في محطات موجودة في أماكن مناسبة. وقد كان هذا جزءاً من الأساس الذي بنيت عليه مشاريع النقل العام التجريبية في حوالي ١٥ مدينة في العالم. بالرغم من وجود وحدات تحليل كهربائي منفردة لتعبئة الوقود في مرائب المنازل في الوقت الحاضر، إلا أن تقييد استخدام هذه المركبات في مجال التنقل المحلي فقط يجعل عملية التسويق المبدئي لسيارات الركاب التي تعمل بخلايا الوقود أمراً غير جذاب للمشترين.

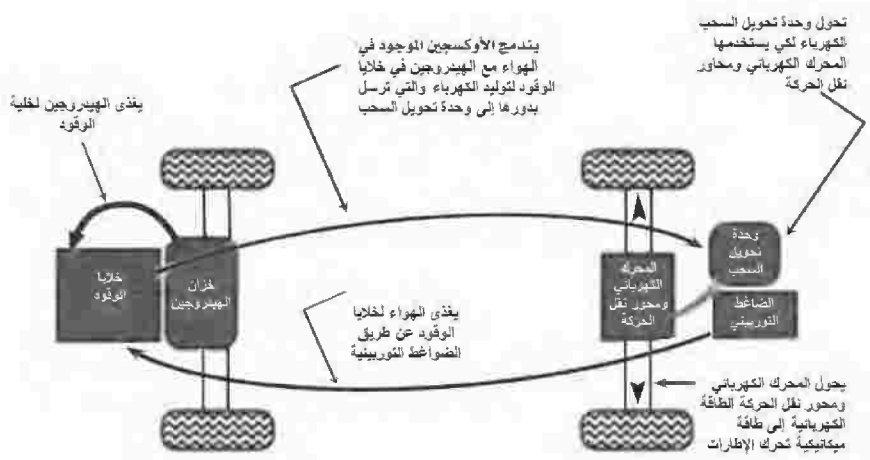
(٩,٢) مركبات خلايا وقود الهيدروجين
Hydrogen Fuel-Cell Vehicles

تصنع محركات خلايا الوقود على شكل *طبقات متراصة* من الخلايا، حيث تساهم كل خلية في إجمالي القدرة الكهربائية للمحرك المصمم لتحريك مركبة. إن صافي فرق الجهد (E) الذي تنتجه خلية وقود واحدة ذات غشاء تبادل بروتونات هو ٠,٧ فولت تقريباً، وهو فرق جهد صغير جداً بحيث لا يستطيع تحريك سيارة. يساوي فرق الجهد التشغيلي لمجموعة من خلايا الوقود لمركبة عدد الخلايا في المجموعة مضروباً في ٠,٧ فولت/خلية. تساوي كثافة التيار الكهربائي (I) المقابلة لـ ٠,٧ فولت حوالي ٠,٥ أمبير/سم^{٢}، بينما تساوي القدرة الناتجة (P = IE) ٠,٣٥ وات/سم^{٢} تقريباً. لذا فإن تزويد محرك يعمل بخلايا الوقود بقدرة مقدارها ٥٠ كيلووات يتطلب أن تكون مساحة غشاء التحليل الكهربائي البوليمري حوالي ١٤٠,٠٠٠ سم^{٢} (١٤ م^{٢}).

تعتمد الجدوى التجارية لمركبات خلايا وقود الهيدروجين على إنتاج محركات تعمل بخلايا الوقود قادرة على المنافسة بنجاح مع محركات الاحتراق الداخلي. وتتطلب الجدوى كذلك الهندسة الناجحة لكل الأجزاء الميكانيكية للسيارة مجتمعة. ولا بد لخلايا الوقود المتراصة والمدمجة في محرك خلايا الوقود الذي يتضمن منظومة التزويد بالوقود أن تتناسب مع حدود المساحة والوزن المسموح بها لنوع المركبة التي ستستخدم فيه. يوضح الشكل رقم (٩,٣) مقطعاً في مركبة تعمل بخلايا وقود الهيدروجين (مرسيدس بنز فئة A طراز F-Cell) [11]، وقدرة محركها ٦٥ كيلووات. توجد تحت مقاعد هذه السيارة طبقات خلايا الوقود المتراصة وخزانان لوقود الهيدروجين المضغوط إلى ٣٥٠ باراً.

الشكل رقم (٩,٣). رسم توضيحي لمركبة مرسيدس بنز فئة A طراز F-Cell التي تعمل بخلايا الوقود.

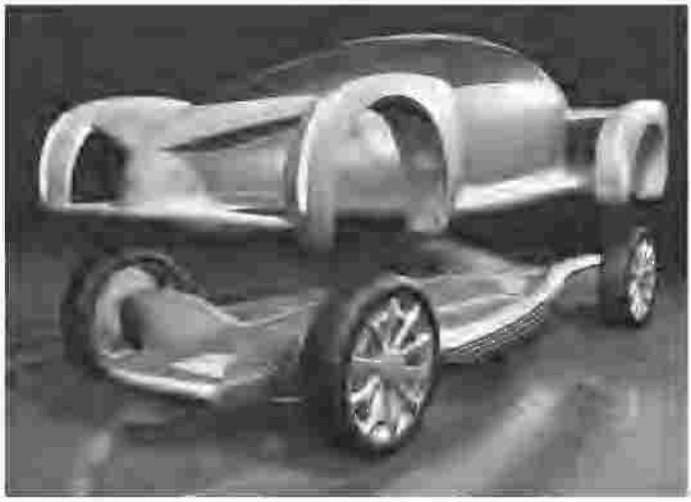
يبين الشكل رقم (٩,٤) رسماً توضيحياً للمنظومة الميكانيكية الكاملة لمركبة تعمل بخلايا وقود الهيدروجين (فورد P2000) [9]. توجد في هذه السيارة طبقات خلايا الوقود المتراصة إلى جانب خزان غاز الهيدروجين المضغوط، بينما يقوم المحرك الكهربائي بتحريك الإطارات.



الشكل رقم (٩,٤). رسم توضيحي لمنظومة إنتاج القدرة لمركبة فورد P2000 التي تعمل بخلايا وقود الهيدروجين.

أعلنت شركة جنرال موتورز عن مفهوم جديد لسيارات خلايا الوقود [12] "مركبة خلايا وقود الهيدروجين المستقلة ذاتياً" "AUTOnomy Hydrogen Fuel Cell Vehicle"، حيث توجد جميع أجزاء منظومة الدفع (وقود الهيدروجين وخلايا الوقود والمبادلات الحرارية والإلكترونيات والموتورات ومنظومة التعليق ومنظومة التوجيه والكوابح) في هيكل معدني (سمي مجازاً "لوح التزلج")، كما يوضح الشكل رقم (٩,٥). وسيباع من هذه المركبة عدة خيارات، منها سيارات الركاب (sedan)، والسيارات الرياضية، وسيارات الدفع الرباعي (SUV)، ...إلخ. الهدف من هذا المشروع هو تصميم وإثبات

فاعلية خلية وقود قادرة على منافسة محركات الاحتراق الداخلي الحالية في تحملها وأدائها وتكلفتها.



الشكل رقم (٩,٥). مركبة خلايا وقود الهيدروجين المسطلة ذاتياً المصممة من قبل شركة جنرال موتورز [12].

أما المركبة التي تعمل بخلايا الوقود وذات جدوى أكبر في الوقت الحالي فهي الحافلة، إذ إن الحافلة، كما ذكر آنفاً، لديها ميزة الخدمة المحلية، مع وجود محطات مركزية للتزويد بالوقود، كما أن لديها القدرة على حمل كمية كبيرة من وقود الهيدروجين للاستهلاك اليومي، وتوجد بها المساحة الكافية لوضع طبقات خلايا وقود كبيرة. يظهر الشكل رقم (٩,٦) حافلة تعمل بخلايا الوقود من صنع بالارد مستخدمة في العديد من مشاريع النقل العام التجريبية على الطرق. وقد بدأ العمل في حوالي ٤٠ شكلاً من حافلات خلايا الوقود متطورة التقنية في مشاريع تجريبية في أكثر من ١٥ مدينة في أمريكا الشمالية وأوروبا وأستراليا.

الشكل رقم (٩,٦). حافلة تعمل بمحرك خلايا وقود من صنع شركة بالارد وتستخدم كعطيـق عملـي للمنتج على الطرقات.

(٩,٢,١) مميزات الوقود البديل لخلايا الوقود

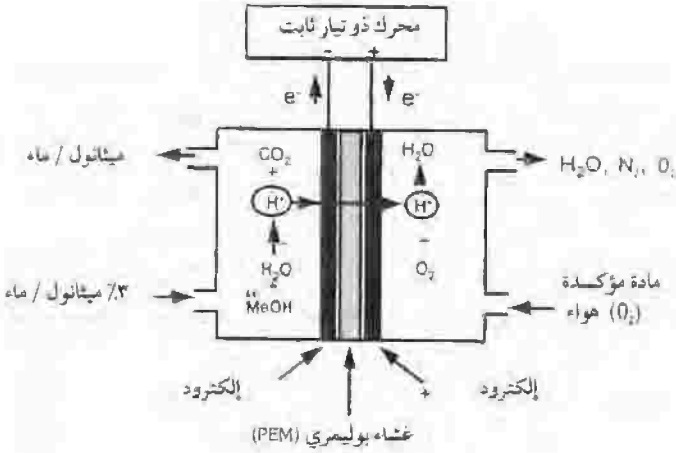
Characteristics of Alternative Fuels for Fuel Cells

بما أن البنية التحتية لإنتاج وقود الهيدروجين وتوزيعه قد لا تكون موجودة بحيث تتماشى مع النمو المحتمل في مجال استخدام خلايا الوقود، فقد تم النظر في ضرورة وجود فترة انتقالية تصنع فيها مركبات تستخدم أجهزة تحوير موجودة على متنها. ولإنتاج الهيدروجين على متن المركبات فسوف تتضمن منظومة الوقود أحد مكونات المعامل الكيميائية، وإن كان بشكل مصغر، لتحوير الوقود الأولي. تمت دراسة عدد من أنواع الوقود (الأحفوري) التي يمكن تحويرها. وقد وضع وصف لمميزات عدد من هذه الأنواع من الوقود بشكل مجدول في المرجع [9]. وبالإضافة إلى الهيدروجين فقد شملت هذه القائمة الغاز الطبيعي المضغوط (CNG)، والميثانول

(CH_3OH)، والإيثانول (C_2H_5OH)، والبنزين معاد الصياغة. وشملت المميزات جوانب الإنتاج والتخزين والتكلفة والسلامة والأثر البيئي. وقد تم التخلي عن هذه الفكرة بسبب التعقيد الناتج من وجود معمل كيميائي مصغر على متن المركبات.

(٩,٢,٢) الميثانول كوقود لخلايا الوقود Methanol as a Fuel for Fuel Cells

بدأت مشاريع في عدد من المعامل الوطنية [مثل معمل لوس ألاموس الوطني (LANL) [9]، ومعمل الدفع النفاث (JPL)] لدراسة جدوى استخدام الميثانول مباشرة في خلايا الوقود بدلاً من الهيدروجين، نظراً لسهولة التعامل معه كوقود سائل مقارنة بالهيدروجين. يمكن أن يستفاد من هذه الخلايا كمصادر طاقة صغيرة متنقلة (بديل للبطاريات) لاستخدامات تتراوح القدرة المطلوبة فيها بين ١ وات و١٠ وات، ويمكن أن تنتج طبقات خلايا الوقود المتراصة من هذا النوع ما يزيد على ١ كيلووات. يظهر في الشكل رقم (٩,٧) رسم لخلية وقود تعمل بالميثانول مباشرة (DMFC). إلا أنه يبدو أن استخدام هذا النوع كمحركات لسيارات خلايا الوقود لن يحدث إلا في المستقبل البعيد.



الشكل رقم (٩,٧). رسم توضيحي لخلية وقود الميثانول المباشرة. المصدر: معمل الدفع النفاث.

(٩,٢,٣) الغاز الطبيعي كوقود للنقل Natural Gas as a Transportation Fuel

يستخدم الغاز الطبيعي المضغوط (CNG) والغاز الطبيعي السائل (LNG) حالياً بكميات قليلة كوقود للنقل في العديد من الدول. وبسبب توزيع الغاز الطبيعي كوقود للتسخين في المنازل، ولكون طاقته النوعية عالية كسائل، فإن ذلك يسمح للغاز الطبيعي بأن ينافس الهيدروجين بشكل قوي. ومن خلال مقارنة الطاقة النوعية والحجمية للغاز الطبيعي والهيدروجين (في الجدول رقم ٤,٦)، فإن ميزة الطاقة الحجمية تميل بشكل واضح إلى كفة الغاز الطبيعي (٣,٣٨ كيلووات-ساعة/نيوتن-م^{٣} للغاز الطبيعي المضغوط مقارنة بـ ٠,٦٤ كيلووات-ساعة/نيوتن-م^{٣} للهيدروجين المضغوط). إلا أنه سبقت الإشارة في القسم (٤,٤) إلى أن تحوير الغاز الطبيعي لإنتاج الهيدروجين حسب المعادلة رقم (٤,٣) للاستخدام في مركبات خلايا الوقود يؤدي إلى استخدام ١٦ كجم من الميثان لإنتاج ٨ كجم من الهيدروجين. وبالنظر إلى حرارة الاحتراق الجزيئية البالغة ٢٢٢ كيلووات-ساعة من الطاقة الحرارية للميثان و٢٦٦ كيلووات-ساعة للهيدروجين، فقد طُرح التساؤل الآتي: لماذا نحوِّر ١٦ كجم من الميثان لننتج ٨ كجم من الهيدروجين لنحصل على زيادة مقدارها ٢٠٪ في طاقة النقل، بدلاً من أن نستخدم الميثان مباشرة كوقود للنقل؟ سيتم التطرق إلى هذا التساؤل مرة أخرى في الفصل العاشر من الكتاب. وقد يكون من المتوقع أنه خلال مرحلة تزايد إنتاج مركبات خلايا وقود الهيدروجين على مدى السنوات الخمسين القادمة (إذا ثبتت جدواها التجارية)، فإن الغاز الطبيعي السائل والغاز الطبيعي المضغوط قد يبقيان منافسين قويين للبنزين في محركات الاحتراق الداخلي.

(٩,٣) ماذا نحتاج أيضاً؟

What More is Needed?

لقد بدأ تطوير صناعة مركبات خلايا وقود الهيدروجين منذ ما يزيد على ٣٠ عاماً. وتم تدوين مراحل التقدم في هذه التقنية في العديد من محاضر المؤتمرات (مثل الاجتماعات نصف السنوية للجمعية الدولية لطاقة الهيدروجين [13]، والاجتماعات السنوية لجمعية الهيدروجين الوطنية [14])، وفي المجلات العلمية التي تركز على تقنية وقود الهيدروجين (مثل المجلة العالمية لطاقة الهيدروجين International Journal of Hydrogen Energy [15])، وفي النشرات الشهرية (مثل هوفمان [16])، وعلى الإنترنت (حيث يزداد حجم المعلومات بسرعة). وسبقت الإشارة في القسم (٨,٢,٣) إلى أن معضلة "الدجاجة" و"البيضة" لا تزال موجودة في إنشاء البنية التحتية لهذه الصناعة.

بالإضافة إلى ذلك، هناك جوانب عديدة في التقنية تتطلب طرقاً مطورة (أو جديدة) وكفاءة أعلى وتكلفة أقل. نشر كانون [10] عام ١٩٩٥م عرضاً شاملاً في وقت مبكر للقضايا التقنية. ومنذ ذلك الحين تم إعداد عدد من خرائط الطريق، بناءً على الوضع الراهن للتقنية، كما تصف المصادر المنشورة التي أشير إليها أعلاه، وقد عنيت كلها بإيجاد حلول للمشكلات التقنية والبيئية والاقتصادية والمشكلات المتعلقة بالسلامة.

يقدم الجدول رقم (٩,٢) ملخصاً للمسائل التقنية حتى عام ١٩٩٥م، كما يصفها كانون [10]. وتبين هذه المعلومات الجهد العالمي المبذول منذ ذلك الحين للوصول إلى هذه الصناعة.

الجدول رقم (٩,٢). ملخص المسائل التقنية لمحركات خلايا وقود الهيدروجين*.

التحدي	الملاحظات
تقليل نسبة الوزن إلى القدرة	محركات الاحتراق الداخلي الحالية: ٢-٤ رطل/كيلووات
	خلايا الوقود الأولى: ١٥-٣٠ رطل/كيلووات
	تقنية ١٩٩٥: ~٤ رطل/كيلووات
	الهدف طويل المدى: ١-٢ رطل/كيلووات
تقليل تكلفة المادة المحفزة	البلاتين المستخدم في الأقطاب الكهربائية يمثل جزءاً كبيراً من تكلفة خلايا الوقود
	تكلفة ١٩٩٥: ~ ٥٠٠ دولار للمحرك
	البحث عن مواد محفزة فلزية خفيفة وشائعة الاستخدام
رفع مستوى تحمل المحركات	خلايا الوقود يتناقص أداؤها مع الزمن (مثل البطاريات القابلة للشحن)
	العمر الافتراضي لمحركات الاحتراق الداخلي: ≥ ٥٠٠٠ ساعة
	العمر الافتراضي لخلايا الوقود عام ١٩٩٥م: حوالي بضع آلاف الساعات
تقليل التلوث	محركات الاحتراق الداخلي: البقايا إما أن تحرق وإما أن تنتقل إلى الجو
	خلايا الوقود: يبطل مفعولها بأول أكسيد الكربون/ثاني أكسيد الكربون
درجة حرارة عمل خلايا الوقود	يتم الوصول لدرجة الحرارة المثلى لخلايا الوقود ذات غشاء تبادل البروتونات بسرعة وتبقى عند مستواها
التحكم في الماء	الماء يخفف المواد المتفاعلة
	تحتاج خلايا الوقود لأن تبقى رطبة
	هناك ضرورة لإبقاء محتوى الماء عند قيمة منخفضة مثلى
تحسين بداية تشغيل المحرك	من الضروري أن يعمل المحرك بمجرد تدوير المفتاح مع فترة إحماء صغيرة
المرونة في اختيار الوقود	الخيار بين الهيدروجين والهواء من جهة أو الهيدروجين والأوكسجين من جهة أخرى
	الخيار بين الهيدروجين النقي وبين الهيدروجين المحوَّر على متن المركبة
تقليل تكلفة القدرة	محركات الاحتراق الداخلي: ~٥٠ دولار/كيلووات
	خلايا الوقود عام ١٩٩٥م: ~ ١٥٠٠ دولار/كيلووات

* مقتبس من كانون (١٩٩٥م) [10].

(٩,٤) الخلاصة

Summary

تم في هذا الفصل دراسة استخدام الهيدروجين ليحل محل محركات السيارات الاعتيادية، وذلك باستخدام محركات تعمل بخلايا الوقود. وتم استعراض مبادئ الديناميكا الحرارية حتى يمكن المقارنة بين كفاءة هذين النوعين من المحركات بناءً على نوع الاستخدام. وتطرق هذا الفصل إلى بعض الجوانب المتعلقة بالهيدروجين في مركبات خلايا الوقود، كما تم استعراض تصميمات بعض المركبات التي تعمل بخلايا الوقود والتي يتم تطويرها تجارياً. وتم الاطلاع على بعض من أنواع الوقود البديلة لمحركات خلايا الوقود وأثار الفصل تساؤلاً حول الأمور التي لا زلنا نحتاجها لتنطلق صناعة مركبات خلايا الوقود.

References المراجع

[1] German Industrial Consortium, *Solar Hydrogen: Energy Carrier for the Future*, brochure, 1992.
[2] New Energy and Industrial Technology Development Organization, WE-NET: World Energy NETwork, brochure. Tokyo: NEDO, 1993.
[3] D. Morgan and F. Sissine, *Hydrogen: Technology and Policy*. CRS Report for Congress No. 95-540 SPR, April 28, 1995.
[4] R. O. Price, "Liquid Hydrogen-An Alternative Aviation Fuel." *Aerospace Engineering*, 11:21-25, 1991.
[5] B. Arnason and T. I. Sigfusson, "Iceland – A Future Hydrogen Economy." *International Journal of Hydrogen Energy* 25:389-394, 2000.
[6] R. W. Foster, "An Investigation of the Integration of Hydrogen Technology into Maritime Applications." Proceedings of the 2000 Hydrogen Program Review, NREL Report CP-570-28890, 2000.
[7] PRNewswire, "First Hydrogen Fuel Cell Water Taxi on San Francisco Bay Powered by Anuvu." Sacramento, CA: PRNewswire, October 16, 2003.
[8] Office of Naval Research, *Hybrids on the High Seas: Fuel Cells for Future Ships*. Washington, DC: ONR Media, February 26, 2004.
[9] S. Thomas and M. Zalbowitz, *Fuel Cells – Green Power*: Report LA-R-99-3231. Los Alamos, NM, 1999.
[10] J. S. Cannon, *Harnessing Hydrogen*. New York: INFORM, Inc., 1995.
[11] A. J. Appleby, "The Electrochemical Engine for Vehicles." *Scientific American* 281:74-79, 1999.
[12] *San Francisco Chronicle*, January 19, 2002.
[13] International Association for Hydrogen Energy, "Hydrogen Energy Progress." *Proceedings* of the World Hydrogen Energy Conferences, Vols. 1-14, biannually through 2004.
[14] National Hydrogen Association, "Annual U.S. Hydrogen Conference." *Proceedings*, Vols. 1-16, annually through 2005.
[15] T. Nejat Veziroglu, ed. In chief, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vols 1-30. Oxford, UK: Pergamon Press, through 2005.
[16] P. Hoffman, ed., *The Hydrogen & Fuel Cell Letter*, Vols. 1-20, (1986-2005).