

# YAKIT PİLLERİ

Kimya Müh. Merve ÇETİNKAYA - Doç. Dr. Filiz KARAOSMANOĞLU

Dünya enerji tüketimi, nüfus artışına, sanayileşmeye ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak hızla artmaktadır. Artan enerji talebinin yanı sıra fosil enerji kaynaklarının rezervleri de hızla azalmaktadır. Fosil yakıtların yakılması ile meydana gelen karbon dioksit, karbon monoksit, azot oksitler, metan, kükürt dioksit gibi gazların sürekli salınmasından dolayı meydana gelen küresel ısınma, iklim değişikliği ve sera etkisi gibi çevre sorunları oluşmaktadır. Günümüzde rezervleri azalan, çevreyi kirleten fosil enerji kaynaklarının yerine doğa ile dost, yenilenebilir kaynakların kullanımı gündeme gelmiştir. Bu kaynaklar sırasıyla; güneş, rüzgar, su gücü (hidrolik enerji, jeotermal enerji, dalga enerjisi, gelgit enerjisi, sıcaklık gradyent enerjisi ve akıntı enerjisi), biyokütle ve hidrojen enerji kaynaklarıdır. Bu kaynaklar ile ilgili, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde araştırma, geliştirme, uygulama ve teknolojik çalışmalar hızlı bir şekilde devam etmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarını gündeme taşıyan çevre sorunlarının başında sera etkisi gelmektedir. Sera etkisine neden olan gazlar başta CO<sub>2</sub> olmak üzere; N<sub>2</sub>O, HFC, PFC ve SF<sub>6</sub> olarak sıralanabilir. 1997 yılında imzalanan Kyoto Protokolü gereği protokole dahil olan ülkelerde 2008- 2012 dönemine kadar toplam sera gazı emisyonlarında 1990 yılı değerlerine ulaşılması hedeflenmektedir. 1990- 2000 yılları arasında AB ülkelerinde sera gazları emisyonlarında sağlanan azalma % 5.4'tür. 2000 yılı ilk yarısında, AB'de CO<sub>2</sub> emisyon değerleri 1990 değerlerinin % 0.6 aşagısında olup, ikinci yarısında değerler sabitlenmiştir. Sera gazı emisyon kaynağı olarak gösterilen enerji üretimi, tarım, sanayi, atık yönetimi ve konut sektörlerinde azalmalar gerçekleştirilmesine ve 1995- 2000 yılları arasında otomobillerde üretilen CO<sub>2</sub> emisyon miktarları % 7.5 azaltılmasına rağmen ulaşım sektöründe kullanılan araç sayısındaki hızlı artış nedeniyle emisyonlarda %18'e varan bir artış gerçekleşmiştir. İleriye dönük projeksiyonlar sonucunda teknolojideki gelişme ve taşıt sayısındaki artışa paralel olarak 2010 yılında bu artışın % 28 olacağı düşünülmektedir. Otomobillerden kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonlarının 1995- 2008 döneminde % 25 azaltılması ACEA (Assoc. des Constructeurs Europeens D'Automobiles), JAMA (Japan Automobile Manufacturers Association) ve KAMA (Korea Automobile Manufacturers Association) tarafından onaylanmıştır. Avrupa'da hedeflenen CO<sub>2</sub> emisyon oranı ortalama 140 g-CO<sub>2</sub>/km'dir.

Sera gazlarının etkisinin azaltılması için birtakım önlemler alınmaktadır. Bunlar sırasıyla; fosil yakıtların tüketiminin azaltılması, bu yakıtların yüksek verimle yanmalarının sağlanması, yanma sırasında oluşan CO<sub>2</sub>'in absorpsiyon gibi yöntemlerle tutulması ve karbon sayısı düşük veya hiç karbon içermeyen yakıtların kullanılmasıdır. Günümüzde ulaşım sektöründe emisyonların azaltılması için yakıt tüketiminin azaltılması, alternatif yakıtların kullanılması, ulaşım planlaması, trafik düzenlenmesi gibi önlemler alınmaktadır.

Tablo 1. Yıllara göre atmosferik CO<sub>2</sub> derişimi Sanayileşme süreci öncesinde (1000 – 1750) ~ 280 ppm 2000 yılı ~ 368 ppm 2100 yılı ~ 540 – 970 ppm

Tablo 2. Yıllara göre ortalama CO<sub>2</sub> emisyonu (trafiğe yeni çıkan taşıtlar) 1996 184 [g/km] 1997 182 1998 179 1999 174 2000 170 2001 166 2008 140 ACAE hedefi

Kısa vade önlemleri içinde, yanma veriminin artırılması üzerinde çalışmalar son hızla devam etmektedir. Ayrıca, kojenerasyon, taşıtlarda tasarım değişiklikleri (yeni enjeksiyon sistemlerinin kullanımı, yanmanın elektronik kontrolü vb.), alternatif yakıtların kullanımı (elektrikli taşıtlar, alkoller, eterler, biyodizel vb.) ve hibrid sistemler gibi teknikler üzerinde

çalışmalar devam etmektedir. Orta ve uzun vadede etkili olacak çözüm olarak ise, yakıt olarak hidrojen veya kolaylıkla hidrojene dönüşebilen yakıtların kullanımı ve bu yakıtların yüksek verimde kullanılmasına olanak tanıyacak yakıt pili gibi sistemlerin devreye sokulması öngörülmektedir.

Bu çalışmada, yakıt pilinin tanıtımı yapılarak, pillerin enerji teknolojisindeki konumunun temel hatları ile sunulması hedeflenmiştir. Çalışma başlıkları:

- Yakıt pili nedir?
- Yakıt pili tarihi
- Yakıt pilinde kullanılan yakıtlar
- Yakıt pilinin yapısı
- Yakıt pili çeşitleri ve sınıflandırılması
- Yakıt pili uygulama alanları
- Yakıt pilinin avantajları
- Yakıt pilinin dezavantajları
- Günümüzde yakıt pili pazarı
- Sonuç ve değerlendirme şeklindedir.

### YAKIT PİLİ NEDİR?

Yakıt pili sisteme dışarıdan sağlanan yakıt ve elektrokimyasal reaksiyonun gerçekleşmesi için gerekli olan oksitleyicinin kimyasal enerjisini doğrudan elektrik ve ısı formunda kullanılabilir enerjiye çeviren güç üretim elemanıdır.

### YAKIT PİLİ TARİHİ

Yakıt pili, tarihi çok eski tarihlere dayanmasına rağmen ilk kullanımı 1958 yılında NASA'nın uzay programında Apollo, Gemini, ve Space Shuttle uzay gemilerinde yakıt olarak kullanılmasına dayanmaktadır.

1838 – İlk yakıt pili çalışmaları Sir William Grove tarafından H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> pili üzerinde yapılmıştır. Yaptığı çalışmalar sırasında suyun elektrolizinin ters reaksiyonu sonucunda sabit akım ve gücün üretildiğini fark eden Grove, böylece tesadüfen çok büyük bir buluş gerçekleştirmiştir. 1893 - Friedrich Wilhelm Ostwald, yakıt pili içindeki her elemanın yakıt pili çalışmasındaki görevini ve etkisini araştırmıştır.

1896 - William W. Jacques, eriyik elektrolitli yakıt pillerinin temelini atmıştır. Kömürün elektrokimyasal enerjisinden doğrudan elektrik üretmeyi amaçlamıştır.

1937 – Emil Baur, 1900 yılında, ünlü bilim adamı Nerst'in başlattığı katı oksit elektrolit ile çalışan yakıt hücresi projesinin başarıya ulaşmasını sağlamıştır.

1939 – Belki de yakıt pilinin günümüzdeki yere gelmesini sağlayan en önemli çalışma Thomas Bacon tarafından alkalın yakıt pilleri üzerinde yapılan çalışmalar olmuştur. Bu çalışmanın önemini anlayan Pratt&Whitney şirketi bu projeye lisans vererek NASA programlarında kullanılmasını sağlamıştır.

1950- Uzay çalışmaları yarışı ile yakıt pillerine ilgi arttı.

1958-NASA H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> pilini uzay araçlarında kullanmaya başladı.

1980- Petrol krizleri sonrası hidrojen ve hidrojenli yakıt pilleri önem kazandı.

2000'li yıllar- Kullanım seçeneklerinin arttırılması, maliyetlerin düşürülmesi, yaygın kullanıma geçilmesi, teknoloji geliştirme çalışmaları yoğun olarak sürüyor.

### YAKIT PİLİNDE KULLANILAN YAKITLAR

Yakıt pillerinde çok çeşitli yakıtlar kullanılabilir; ancak yakıtın fiyatı, kullanılabilirliği, enerji içeriği, çevresel etkileri, depolama-taşıma-kullanım kolaylığı göz önüne alınarak seçimin yapılması gerekmektedir. Yakıt pillerinde yakıt beslemesi doğrudan ve dolaylı olarak gerçekleştirilmektedir. Hidrojen, metan, doğal gaz, hava gazı, LPG, hidrazin yakıt piline

doğrudan beslenerek kullanılabilir. Yakıtın dolaylı olarak beslenmesinde, bir ön işlem uygulanmaktadır. Yakıtın dolaylı beslenmesine örnek olarak, kömür, metanol, etanol, amonyak ve hidrokarbonlar kullanan yakıt pilleri verilebilir. Ön işlemler;

- Reformlama
- Katalitik reformlama
- Isıl kraking,
- Kısmi oksidasyon olarak sıralanabilir.

Bu işlemlerden en verimli, maliyeti az olanı reformlama yöntemidir. Metanol, amonyak ve çeşitli hidrürlerden değişik ön işlemlerle hidrojen elde edilerek kullanılmaktadır. Günümüzde, yakıt pillerinin temelini oluşturan hidrojen ve ileride uygulamalarda önemli bir yere sahip olacak metanol üzerinde araştırma, geliştirme ve uygulama çalışmaları yoğun olarak sürmektedir.

## Hidrojen

Yıldız ve gezegenlerde serbest halde en çok bulunan element olan hidrojen, Dünya'da da fazla miktarda bulunmasına rağmen, serbest halde bulunmamaktadır. Hidrojen kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtlardan, güneş enerjisi ve nükleer enerjiden, su gibi sonsuz bir kaynaktan elde edilebilir. Sınırsız kaynağa sahip olan ve havayı kirletmesi açısından içten yanmalı motorlarda kullanılan diğer alternatif yakıtlara göre pek çok avantaja sahip hidrojenin, içten yanmalı motorlarda kullanım çalışmalarına 1900'lü yılların başında başlanmıştır ve günümüzde de çalışmalar çok yoğun bir şekilde devam etmektedir. Gaz haldeki hidrojen renksiz, kokusuz ve tatsız bir gazdır. Hafif olan kütlesi nedeniyle çok yüksek yayılma özelliğine sahiptir. Gaz haldeki hidrojen aynı hacimdeki havadan 15 kat daha hafiftir. Gaz haldeki hidrojenin özellikleri Tablo 3'te verilmiştir. Kullanım alanları incelendiğinde hidrojenin, fosil yakıtlara göre oldukça fazla alanda kullanılabileceği ortaya çıkmaktadır; kullanım alanları Tablo 4'te sıralanmaktadır.

Hidrojen araçlarda sıvı veya gaz formda depolanabilmektedir. Depolamada seçilecek yol, aracın kullanım alanı, araçtan beklenen performansa bağlıdır. Günümüzde, hidrojenli yakıtlarda hidrojen sıvı ve yüksek basınç altında gaz halde depolanmaktadır. Tablo 5'ten de görüleceği gibi, metal hidrür kullanımı ağırlık sorununa neden olmakta, sıvılaştırmada harcanan enerji kaybı da dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, hidrojenin difüzyon katsayısının yüksek oluşu depolama teknolojilerinin geliştirilmesinde önemli sorunlara neden olmaktadır.

Araçlarda hidrojenin kullanımı için aşırı soğutulmuş sıvı olarak depolanması en uygun depolama yöntemi olarak belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda;

- Aşırı soğutulmuş sıvı ile  $\approx$  1 kg sıvı hidrojen ile 43- 46 km
- Sıkıştırılmış gaz ile  $\approx$  1 kg gaz hidrojen ile 35 km
- Hidrürler ile  $\approx$  1 kg hidrojen ile ortalama 43 km mesafeye ulaşılabilmiştir.

Hidrojen boru hatları ile taşınabilmesinin yanında depolanabilmesi de hidrojeni elektrik enerjisine göre daha avantajlı kılmaktadır. Hidrojenin boru hatları ile iletiminin maliyeti elektrik dağıtım hatlarının maliyetinin sadece 1/4'ü kadardır.

## Tablo 3. Hidrojenin özellikleri ÖZELLİKLER HİDROJEN

Formül H<sub>2</sub>

C/H oranı 0

Mol Ağırlığı, (g/molg) 2.02

Özgül Kütle:

Sıvı: (kg /l) 0.07

Gaz: (kg /l) 0.84 . 10<sup>-4</sup>

Isıl Değer:

Alt: (MJ/kg) 119.93  
Üst: (MJ/kg) 141.86  
Stokiyometrik Karışım İçin:  
Hava/Yakıt: (kütleli) (kJ/l) 34.32  
Hava/Yakıt: (hacimsel) (kJ/l) 2.38  
3.20  
Buharlaşma Isısı (MJ/kg) 0.447  
Tutuşma Sınırları:  
Hacim %'si 4.1-74  
1 0.15-4.35  
Laminar Alev Hızı (m/s) 2.91  
Adyabatik Alev Sıcaklığı (°C) 2110  
Difüzyon Katsayısı (m<sup>2</sup>/s) 0.61  
Kaynama Noktası (°C) -252.35  
Donma Noktası (°C) -259  
Kendi Kendine Tutuşma Sıcaklığı (°C) 574- 591  
Araştırma Oktan sayısı 130

Tablo 4. Hidrojen kullanım alanları  
Dönüştürme Prosesi Hidrojen Fosil Yakıtlar  
Alevli Yanma Evet Evet  
Doğrudan Buhar Üretimi Evet Hayır  
Katalitik Yanma Evet Hayır  
Kimyasal Dönüştürme Evet Hayır  
Elektrokimyasal Dönüştürme Evet Hayır

Tablo 5. Hidrojen depolama yöntemlerinin karşılaştırması  
Depolama Tankı Ağırlık (kg) Hacim (litre) Basınç (bar)  
Metal Hidrür 320 170 50  
Kriyojenik Sıvı 20 140 4  
Yüksek Basınçlı Gaz 120 250 300

Yakıt özellikleri incelendiğinde, hidrojenin motorlarda yakıt olarak kullanılması durumunda petrol kökenli motor yakıtlara oranla birçok avantaja sahip olduğu görülmektedir. Hidrojenin yakıt olarak kullanılmasında, yanma ürünü olarak su buharı açığa çıkarmasının çevreye hiçbir zararı yoktur. Yüksek alev hızı ve tutuşma yeteneği, düşük ateşleme enerjisi gerektirmesi, geniş tutuşturma ve yanma sınırları, yüksek ısıl değer ve termik verim, kirletici egzoz gazı emisyonlarının azlığı ve sahip olduğu yüksek oktan sayısı nedeni ile vurutuya karşı dirençli olması hidrojeni çekici kılmaktadır. Ayrıca benzin ve motorinle çeşitli karışım oranlarında çift yakıtlı motor olarak (hibrit sistemler) çalışabilme olanağına sahip olması, geçiş döneminde mevcut motorlarda önemli değişiklikler yapılmadan hidrojen kullanımını olanaklı kılacaktır. Geleceğin yakıtı hidrojen için en uygun sistem hidrojenli yakıt pili teknolojisidir.

#### Metanol

Metanol; kömür, odun ve doğal gazdan üretilmektedir. Son yıllarda biyoteknolojik olarak biyometanol araştırmaları da yapılmaktadır. Metanolün özellikleri Tablo 6'da verilmektedir. Metanol içten yanmalı motorlarda doğrudan ve/veya benzin veya dizel yakıtına katkı yapılarak alternatif yakıt olarak değerlendirilmektedir. Metanol için yakıt pillerinde kullanım diğer bir değerlendirme alanıdır.

## YAKIT PİLİNİN YAPISI

Yakıt pili üç ana bölümden oluşmaktadır:

### Yakıt İşleme Ünitesi

Yakıt beslemesinin olduğu, dolaylı beslemede ön işlemin gerçekleştirildiği ünedir.

### Güç Üretim Sistemi

Bir yakıt pili, anot (negatif, hidrojen elektrot), katot (pozitif, oksijen elektrot) ve elektrolit çözeltisinden oluşur. Hava katot yüzeyi üzerinden geçerken, hidrojen veya hidrojen zengin gaz da anot yüzeyinden geçer. Elektronlar katoda doğru bir dış devre yoluyla taşınırlarken, hidrojen iyonları da elektrolit yoluyla oksijen elektroda göç ederler. Katotta oksijen ve hidrojen iyonları ile elektronların reaksiyona girmesiyle su elde edilir. Elektronların dış devre yoluyla akışı elektrik üretir. Yakıt kullanımındaki yüksek verim nedeniyle, bu elektrokimyasal işlemde çıkan yan ürün sadece su ve ısıdır. Yakıt pili sistemi bir yanma reaksiyonu vermediği için çok daha fazla elektrik üretmektedir. Bu sistemi, pilden ayıran en büyük özellik, güç üretimi için şarja gereksinim olmaması ve yakıt sağlandıkça güç üretiminin devam edecek olmasıdır.

Tüm yakıt pillerinde su, pil çalışma sıcaklığına göre sıvı veya buhar şeklinde ürün olarak açığa çıkar. Oksitleyici olarak oksijen kullanılıyorsa su, hava kullanılıyorsa azot ve su, bileşimde karbon bulunan yakıt kullanılması durumunda ise karbon dioksit oluşur. Su pili terk eder ve böylece pil kendini soğutmuş olur. Ancak çok yüksek sıcaklıkta çalışan pillerde soğutma ekipmanı kullanılması gerekir.

Yakıt pili temel bileşenlerinin seçiminde kısıtlamalara neden olan en önemli nokta, seçilen malzemenin sisteme uyumluluğudur. Seçilmiş malzeme çok uzun süre stabil kalacak şekilde olmalıdır. Performans belirleyici polarizasyon grafikleri yardımıyla yakıt pillerindeki enerji kaybının malzeme seçimiyle ilişkisi belirlenir. Yapılan çalışmalar sonucunda, pratikte bir yakıt pilinin polarizasyonlardan kaynaklanan enerji kayıpları sonucunda ürettiği doğru akım, 0.5 – 0.9 V kadar olduğu belirlenmiştir. Performans, pilin sıcaklığı ve maddelerin kısmi basınçlarının artırılmasıyla gerçekleştirilir.

Yakıt pillerinde:

- Fosforik asitli
- Ergimiş karbonatlı
- Katı oksitli
- Proton geçiren zarlı (PEM) elektrolitler kullanılabilir.

Elektrolitler pil çalışma sıcaklığı, basıncı, reaktanların cinsi ve safsızlıkların niteliğine göre seçilir.

Yakıt pillerinde gözenekli, gözeneksiz ve hidrofob elektrotlar kullanılabilir. Kıymetli katalizörlerle aktifleştirilmiş karbon yapılı elektrotlar ekonomik olup, az yer kaplarlar. Tek bir hücre gerilimi 1 volttan daha az olduğundan, gerekli elektrik enerjisini üretmek için birden fazla yakıt pilini seri ve paralel bağlayarak kullanmak gereklidir. Bütün bir yakıt pili güç üretim sistemi, bir yakıt kaynağı, bir hava kaynağı, bir soğutma ünitesi ve bir de kontrol ünitesi içeren bir otomobil motoruna benzetilebilir.

### Güç Dönüştürücü

Hücrede üretilen doğru akımı ticari kullanım için alternatif akıma çeviren ünedir. Şekil 1’de yakıt pili yapısı gösterilmektedir.

HİDROJEN-OKSİJEN yakıt pili tepkimeleri asidik ve bazik elektrolitler için aşağıda açıklanmıştır:

### Asidik Elektrolit

1. Anot Reaksiyonu (Hidrojen):

$H_2 \rightleftharpoons 2H^+ + 2e^-$  (Hidrojenin indirgenme reaksiyonu)

2. Katot Reaksiyonu (Oksijen):

$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons H_2O$  (Oksijenin indirgenme reaksiyonu)

3. Toplam Reaksiyonu:

$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightleftharpoons H_2O$

Bazik Elektrolit

1. Anot Reaksiyonu (Hidrojen):

$H_2 + 2OH^- \rightleftharpoons 2H_2O + 2e^-$  (Hidrojenin indirgenme reaksiyonu)

2. Katot Reaksiyonu (Oksijen):

$\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightleftharpoons H_2O + 2OH^-$  (Oksijenin indirgenme reaksiyonu)

3. Toplam Reaksiyonu:

$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightleftharpoons H_2O$

## YAKIT PİLİ ÇEŞİTLERİ VE SINIFLANDIRILMASI

Yakıt pilleri, yakıt ve oksitleyicinin bileşimine, yakıtın dolaylı veya doğrudan beslenmesine, kullanılan elektrot ve elektrolit cinsine, operasyon sıcaklığına bağlı olarak çeşitli kombinasyonlarda oluşturulabilir.

Tablo 5'te yakıt pillerinin içerdikleri elektrolit ve çalışma sıcaklıklarına göre sınıflandırılması verilmiştir. Tablo 6'da ise elektrolit ve çalışma sıcaklıklarına göre sınıflandırılan yakıt pillerinin sahip oldukları güç ve uygulama alanlarına göre sınıflandırılması verilmiştir.

Alkali Yakıt Pili (AFC):

Bu tip yakıt pilleri ilk olarak uzay gemilerinde kullanılmıştır. ZETEC isimli bir firma tarafından ticarileştirilmeye çalışılmaktadır. Üretim ve kullanımlarında birtakım güçlükler bulunmaktadır. Bu güçlükler;

- KOH elektrolit sirkülasyonu ve CO<sub>2</sub> absorpsiyonu nedeniyle mobil uygulamalarda pratik değildir.
- Anot olarak Ni ve katot olarak Ag kullanılmakta olup, bu katalizörler ile güç üretimi düşüktür.

Proton Değişim Membranlı Yakıt Pili (PEM):

1950'li yıllarda General Electric tarafından bulunan PEM teknolojisi, o yıllarda ilk defa NASA tarafından Gemini uzay aracında güç ünitesi olarak kullanılmıştır. Günümüzde PEM yakıt pilleri otomotiv sektöründe içten yanmalı motorlara alternatif olarak geliştirilmekte ve kullanılmaktadır.

Polimer elektrolit membranlı, katı polimer elektrolit, ve polimer elektrolit yakıt pilleri olarak da adlandırılan PEM yakıt pillerinin temel yapısı Şekil 2'de belirtilmektedir. PEM yakıt pillerinde, elektrotlar karbon yapılı olup, kullanılan elektrolit ise ince bir polimer membrandır. Bu membran, poli[perflorosulfonik] asit veya Nafion™'dur. Bu ince polimer tabakadan protonlar kolayca diğer tarafa geçebilirken, elektronların geçişi mümkün değildir. Hidrojen anot üzerine akarken, elektrot yüzeyinde hidrojen iyonlarına (proton) ve elektronlarına ayrılır. Oluşan hidrojen iyonları ince membrandan katoda doğru ilerlerken, geçişi engellenen elektrotlar dış devreden geçerek güç oluştururlar. Havadan sağlanan oksijen katot üzerinde hidrojen iyonları ve dış devreden gelen elektronlar ile birleşerek suyun oluşmasını sağlar.

PEM yakıt pili elektrotları üzerinde gerçekleşen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir;

Anot :  $2H_2 \rightleftharpoons 4H^+ + 4e^-$

Katot :  $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightleftharpoons 2H_2O$

Toplam :  $2H_2 + O_2 \rightleftharpoons 2H_2O + ENERJİ$

PEM yakıt pilleri 80 °C sıcaklıkta çalıştılarından ve bu sıcaklık, gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar için düşük olduğundan elektrotlar ince platin tabakaları ile desteklenmektedirler.

PEM yakıt pillerinin otomotiv sektöründe kullanımını sağlayan önemli avantajları vardır. Bu

avantajlar; küçük boyutta uygulanabilirlikleri, düşük sıcaklıklarda çalışmalarına rağmen bu sıcaklıklardan kolayca yüksek güç üretimine geçebilmeleridir. Bunların yanında, yüksek verimde çalışmaları, % 40-50 seviyesinde maksimum teorik voltaj üretebilmeleri ve güç ihtiyacındaki değişikliklere hızlı cevap verebilmeleri de PEM yakıt pillerini tercih edilir konuma getirmektedir.

Günümüzde 50 kW'lık güç üreten PEM yakıt pilleri piyasada satılmakta olup, 250 kW'a kadar güç üretimi yapan yakıt pilleri üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Bu teknolojinin geniş bir kullanım alanına sahip olabilmesi için, birkaç engelleyici özelliği üzerinde çalışmalar da sürmektedir. Bu özelliklerin başında katalizör ve membran malzemelerinin pahalılığından dolayı meydana gelen yüksek fiyata ve düşük sıcaklıklarda çalışmalarından dolayı CO ve diğer safsızlıkların etkisiyle zehirleyici özelliği bulunan saf hidrojen kullanımını zorunlu kılmasıdır. Bu önemli iki problem üzerinde çalışmalar son hızıyla devam etmektedir.

Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili (DMFC):

Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili (DMFC), PEM yakıt pillerinin bir çeşidi olmakla beraber, bir ön reformlamaya ihtiyaç duyulmadan metanolün doğrudan kullanımına imkan tanıyan bir yapıya sahiptir. Metanol, anotda CO<sub>2</sub> ve hidrojen iyonlarına dönüştürülür. Bu aşamadan sonra hidrojen iyonları standart PEM yakıt pillerinde izledikleri yoldan oksijen ile reaksiyona girer. Şekil 3'de DMFC tipi yakıt pilinin çalışma prensibi verilmektedir. DMFC tipi yakıt pillerinde anot ve katotda gerçekleşen reaksiyonlar aşağıda verilmiştir;

Anot : CH<sub>3</sub>OH + H<sub>2</sub>O  $\rightarrow$  CO<sub>2</sub> + 6H<sup>+</sup> + 6e<sup>-</sup>

Katot : 3/2O<sub>2</sub> + 6H<sup>+</sup> + 6e<sup>-</sup>  $\rightarrow$  3H<sub>2</sub>O

Toplam : CH<sub>3</sub>OH + 3/2O<sub>2</sub>  $\rightarrow$  CO<sub>2</sub> + 2H<sub>2</sub>O

Bu hücreler, PEM yakıt pillerinden daha yüksek bir çalışma sıcaklığına sahip olup, 120 °C civarında çalışabilmektedirler. Verimleri ise % 40 civarındadır. Metanolün düşük sıcaklıkta CO<sub>2</sub> ve hidrojene dönüşümü, PEM yakıt pillerinden farklı olarak, daha yüksek miktarda platin katalizörüne ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır. Platin katalizörün miktarındaki artış, fiyatta artışa neden olmakta ve bu özellik DMFC için önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. Sıvı yakıt kullanımına imkan sağlaması ve reformlama ünitesi olmadan çalışabilir olması ise önemli avantajlarıdır.

Geliştirme aşamasında olan DMFC teknolojisi, gelecekte cep telefonu, diz üstü bilgisayarlar ve taşınabilir güç kaynakları için potansiyel bir güç kaynağı olarak görülmekte ve bu tip yakıt pilleri üzerindeki çalışmalar son hızıyla devam etmektedir. Fosforik Asit Yakıt Pili (PAFC): 1990'lı yıllarda oldukça ekonomik bir sistem olmakla beraber günümüzde güç santrali uygulamalarında kullanımı hedeflenmektedir. ONSI Corporation PC25 Şirketi 200 kW'lık üniteleri ticaretleştirmeyi hedeflemektedir. Şirket bu sistem ile eş zamanlı elektrik ve ısı temini ile absorpsiyonlu çiller ile soğutma sağlayabilmektedir. Tokyo Electric Power tarafından geliştirilmiş olan 11 MW'lık bir sistem söz konusu olup, fizibilite ve ucuzlatma çalışmaları devam etmektedir. 200 MW'lık hedefe günümüzde hala ulaşamamıştır.

Erimiş Karbonat Yakıt Pili (MCFC):

Proton Değiştiren Membranlı Yakıt Pili (PEM) ve Fosforik Asit Yakıt Pili (PAFC)'lerin sınırlı olan çalışma sıcaklıklarına alternatif olarak geliştirilmiş sistemlerdendir. Fuel Cell Inc. tarafından doğal gaz ile çalışan 1.93 MW'lık bir sistem üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Sistem 4100 saat % 44'e yakın bir verim ile çalıştırılmıştır. Harrison Mining Corporation ise kömür ile çalışan 250 kW'lık bir sistem üzerinde çalışmalar gerçekleştirmiştir.

Bu sistemlerde meydana gelen sorunların temelinde termal yalıtınlığa sahip olan malzemelerin yüksek sıcaklıkta bozunarak karbonlaşmaları ve yakıt pili yığınları arasında kısa devre oluşturmalarıdır.

### Katı Oksit Yakıt Pili (SOFC):

600- 800 °C'de çalışabilen Katı Oksit Yakıt Pili'nde yığın ve ısı eşanjör malzemeleri daha ucuz olabilir. En ince kalınlıkta elektrolit tabakalarının kullanılması gerekmektedir. İtrium-zirkonyum veya seryum-gadolinyum oksit karışımları ile yapılan çalışmalar olumlu sonuçlar vermektedir. Bu tip yakıt pillerinde karşılaşılan en büyük sorun, saf hidrojen dışında kullanılan yakıtlar ile birlikte oluşan kükürt kirliliğidir.

Küçük ve büyük ölçekte enerji üretimi için geliştirilen Katı Oksit Yakıt Pili ile ilgili BMW hidrojen/benzin yakıtı ile beslenen Katı Oksit Yakıt Pili aracı prototip olarak üretmiş olup, Ar-Ge çalışmaları devam etmektedir. Siemens Westinghouse tarafından 100 kW kapasiteli bir ünite 5 yıldan beri kullanılmaktadır. Bu sistemlerde ulaşılan verim %46 mertebesindedir. Günümüzde yeni tipte yakıt pilleri üzerinde çalışılmaktadır. Bunlara örnek olarak; Proton iletkenliğine sahip Seramik elektrolitli yakıt pilleri ve Çinko/Hava karışımının yakıt olarak kullanıldığı yakıt pilleri sayılabilir. Yakıt pili teknolojisinde yakıt pilinin güç yoğunluğunu, gazlardaki safsızlıklara karşı direncini ve ömrünü uzatmak ve optimize etmek amacıyla elektrot malzemesinin iyileştirilmesi; yığınlar oluşturarak 250 kW'a kadar elektrik üretiminin tek bir modülden sağlanması; katalizör olarak kullanılan değerli metallerin miktarında azaltmalar gerçekleştirilerek gerek veriminde artış gerekse maliyette düşüşün sağlanması; sistemin performansını, sağlamlığını, ömür ve maliyetini arttırıcı tasarımların geliştirilmesi; hidrojen depolama sistemlerinin geliştirilmesi; hidrojen dışında başka yakıtların kullanımına olanak tanıyacak dönüşüm sistemlerinin geliştirilmesi üzerinde çalışmalar devam etmektedir.

### YAKIT PİLİ UYGULAMA ALANLARI

- Uzay Çalışmaları/Askeri Uygulamalar
- Evsel Uygulamalar
- Sabit Güç Üretim Sistemi/Yüksek Güç Üretim Sistemi Uygulamaları
- Taşınabilir Güç Kaynağı Uygulamaları
- Atık/Atık Su Uygulamaları
- Taşıt Uygulamaları

#### Uzay Çalışmaları/Askeri Uygulamalar

Yakıt pillerinin ilk uygulanma alanı, uzay çalışmalarıdır. ABD'de NASA'nın çalışmaları kapsamında Apollo, Gemini, ve Space Shuttle uzay gemilerinde H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> yakıt pili birbirine bağlı 3 ünite olarak kullanılmıştır. Toplamda 93 adet olmak üzere her üniteye 31 adet yakıt pili kullanılmıştır. Toplam üretilen güç 1.4 kW ve voltaj 27-31 Volt'tur. Pillerin ağırlığı 111 kg'dır. 1995 saatlik uçuş süresince 450 kg su ve 325 kW/h'lik enerji üretilmiştir. Gemini gemisinde ise, farklı olarak PEM tipi yakıt pili kullanılmıştır. Her üniteye 32 adet pil bulunmakta ve 1 kW güç sağlanmaktadır. Bu üç gemide de 2 ünite ihtiyacı karşılamak için yapılırken, 3. ünite acil ve özel görev için hazırda tutulmuştur. Bugün uzay mekiği elektriği 12 kW'lık yakıt pilleri ile üretilmektedir. Amerikan UTC Fuel Cell firması NASA ihtiyacını karşılamaktadır.

Stratejik bir önemi olan enerji kaynakları, ülkelerin politikalarında önemli bir yer tutmaktadır. Yakıt çeşitliliği ve veriminden dolayı, askeri amaçla kullanılacak en iyi yakıtlardan biri yakıt pilidir. Gerek askeri araçlarda, gerek ısı ve elektrik ihtiyacı durumunda kolay kullanımıyla askeri yönden yakıt pilleri iyi bir alternatiftir.

#### Evsel Uygulamalar

Sessiz çalışan yakıt pilleri, evlerde veya apartmanlarda ısıtma ve elektrik ihtiyacını sağlamak için kullanılacak bir alternatiftir. Bu tipte kullanılacak yakıt pilleri, propan ve doğal gazdan üretimi sağlayarak elektrik üretmekte ve oluşan ısı geri kazanılarak ısıtma



sistemlerinde kullanılmaktadır. 3-5 kW'lık yakıt pilleri evsel tüketim için uygundur. Amerikan hükümeti hidrojenli yakıt pili uygulamaları için konutlarda 1000\$/kW vergi indirimi uygulamaktadır.

Sabit Güç Üretim Sistemi/Yüksek Güç Üretim Sistemi Uygulamaları Dünyada şu anda yüzlerce sabit güç kaynağı olarak kurulmuş yakıt pili istasyonu bulunmaktadır. Bu enerji üreteçleri; hastanelerde, otellerde, iş yerlerinde, okullarda, güç istasyonlarında, havaalanlarında gerek elektrik gerek ısıtma sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu sistemleri kullanan şirketlerin enerji harcamalarında %20- 40 arasında bir düşüş görülmektedir. Proton Değişim Membranlı Yakıt Pili (PEM) santrallerinde verim %55 civarındadır. Üretimde açığa çıkan karbon dioksit ve su buharı ek bir elektrik üretiminde değerlendirilirse, enerji verimi %80'e çıkmaktadır.

Yakıt pilli güç üretim sistemleri az yer kaplamaktadır. 2 MW'lık bir santral 20 m<sup>2</sup>'den az bir alanda kurulabilmektedir. Minibüs büyüklüğündeki bir santral ile 20 kW güç üretilmektedir. Bu santrallerin önemli uygulamalarına örnek olarak Amerikan ONSI firmasının Kaliforniya'daki 2 MW'lık, UTC Fuel Cell firmasının Alaska'daki 200 kW'lık, Westinghouse-Kanada'nın Hollanda'daki 100 kW'lık sistemleri verilebilir.

#### Taşınabilir Güç Kaynağı Uygulamaları

Telekomünikasyon alanında, bilgisayar dünyasında, görüntü teknolojisinde, alarm sistemlerinde yakıt pili taşınabilir güç kaynağı uygulamaları söz konusudur. Bu tip uygulamalar üzerinde çalışmalar sürmektedir. Minyatür yakıt pilleri pazara çıktıkları zaman, cep telefonu sahipleri cep telefonlarını bir ay şarj etmeden kullanabileceklerdir. Bu tip yakıt pilleri metanol ile çalışabilen, çok küçük boyutta üretilen pillerdir.

#### Atık/Atık Su Uygulamaları

Atık su ve atıkların işlenmesi sırasında yanma reaksiyonları sonucunda oluşan emisyonları azaltmak ve oluşan metan gazından güç elde etmek için yakıt pilleri kullanılmaktadır.

#### Taşıt Uygulamaları

Elektrikli taşıtlar 2000'li yılların yeni-temiz alternatif uygulamaları arasında ön sırada yer almaktadır. Elektrikli taşıtlar:

- Enerjiyi doğrudan hattan alarak (tren, trolleybüs, tramvay, metro gibi)
- Enerjiyi depolanmış bir sistemden kullanarak (akülü taşıtlar, ultra kapasiteli taşıtlar)
- Taşınabilir bir sistemden anında enerji üreterek (yakıt pilli taşıtlar, güneş pilli-fotovoltaik pilli taşıtlar)
- Hibrit elektrikli taşıtlar (benzin-yakıt pili, motorin-yakıt pili taşıtları) şeklinde uygulamadır. Bu uygulamalar içinde yakıt pilli elektrikli taşıtlar pek çok avantaj ile öndedir ve geleceğin otomotiv teknolojisi içinde hidrojen kullanan yakıt pilli elektrikli taşıt uygulaması çok büyük alan kaplayacaktır.

Yakıt pilleri otobüs, kamyon, otomobil ve her türlü taşıt için yakıt görevi yapabilecek özelliklere sahiptir. Yakıt pilli araçlar, benzin ve motorin ile çalışan araçlara göre daha temiz, ve enerji bakımından daha verimli bir uygulamadır. Günümüzde taşıt emisyonlarının çevre kirliliği üzerindeki etkileri düşünüldüğünde, yakıt pili ile çalışan araçlar çevre dostu ve karlı bir seçimdir. Elektrikli araçlar içten yanmalı motorlara göre daha yüksek verimlidir. Kullanılan yakıtın enerji içeriğine bağlı olarak yakıt pili ile çalışan araçlarda güç üretimi %40-70 arasındadır. Hareketli parçası olmayan yakıt pilleri kullanımında taşıtın gürültü kirliliği de görülür düzeyde azalmaktadır. Bir diğer avantaj ise, yakıt olarak hidrojen kullanıldığında araçlarda emisyon olarak sadece su oluşmasıdır.

DaimlerChrysler-Ballard-Ford konsorsiyumu (XCELLSIS) Kanada, Amerika ve Avrupa'da

2005 yılından itibaren PEM ile çalışan otobüsleri piyasaya süreceklerdir. Araçlarda saf hidrojen gazı kullanılması hedeflenirken, kısa ve orta vadede bu tercih incelenmelidir. Hidrojen gazının depolanması üzerinde çalışmalar son hızıyla devam etmekte olup, hidrojen depolanması yüksek basınçlı, hafif silindirler, kriyojenik sıvı sistemleri ve katı metal hidrit depolama gerektirmektedir. Basınçlı hidrojen en iyi sistem olmakla birlikte hafif araçlarda gerekli olan hacim ve ağırlık kriterlerini karşılamamaktadır. Günümüzde nanoteknolojilere olan ilginin artışı ile birlikte hidrojen depolamada kullanılması hedeflenen karbon nano-tüpler gelecek için umut vericidir. Bu sistemlerde hidrojen gazına alternatif olarak sıvı yakıt beslemesi önerilmektedir. Günümüzde bu tip uygulamalara örnek olarak lider otomotiv firmaları metanol kullanılan araçlar üretmişlerdir;

- Ford Motor Focus FC5
- General Motors Opel Zafira
- Honda Motor FCX- V2
- DaimlerChrysler NECAR 3 prototipi
- Mazda Motor Premacy FC- EV
- Nissan Motor R'nessa ve Xterra
- Toyota RAV4
- Volkswagen Capri modelleri

#### YAKIT PİLİNİN AVANTAJLARI

Yakıt pillerinin diğer enerji sistemlerine göre avantajları sırasıyla aşağıda sıralanmıştır:

- Yakıt pili termal enerji sistemlerine göre daha yüksek verimle çalışır. Termal sistemlerden elektrik üretiminde sistemin verimi "Carnot Çevrimi Kriterleri"nden etkilenirken, yakıt pili sistemlerinde bu etkileşim yoktur. Termal sistemlerde elektrik üretimindeki verim %35-40'ı geçemezken, yakıt pili sistemlerinde %70'e yakın verimle çalışılmaktadır.
- Yakıt pilinde meydana gelen emisyon miktarı, diğer yakıtlara göre ihmal edilecek kadar azdır. Yan ürün olarak bir tek su oluşmaktadır. Yakıt pillerinde CO, NOx, yanmamış hidrokarbonlar, ve kirletici diğer maddeler oluşmazken, oksitleyici olarak hava kullanıldığında ihmal edilecek kadar az miktarda azot oksitler, hidrokarbonlar kullanıldığında ise çok düşük miktarda CO2 oluşur. Günümüzde çevre kirliliği ve insan sağlığı için birçok yasal kısıtlamaların uygulandığı bu zamanda, diğer teknolojilerde maliyeti çok fazla arttırmaktayken, bu sistemin çevre dostu olması çok değerli bir alternatif yakıt olmasına neden olmaktadır.
- Hareketli aksamın bulunmadığı yakıt pillerinde sistem, gürültü kirliliği oluşturmamaktadır.
- Yakıt pillerinde kullanılacak yakıt sayısı çok fazla olduğundan, fosil ve alternatif yakıtların kullanımının kolaylığı nedeniyle çok farklı alanlarda kullanılabilir. • Yakıt pilleri istenilen büyüklükte ve kapasitede üretilebilir. Basit bir yapıya sahiptirler. Büyüklüklerine göre 10 W'tan 4.5 kW'a kadar olan bir güç yelpazesine sahiptirler. Boyutları bir el çantasında taşınabilecek kadar küçük veya buzdolabı kadar büyük olabilmektedir.
- Modülerdirler. Gerekli görülen her yerde kullanılabilir ve yerleştirilebilirler.
- Yakıt pili sistemlerinde yan ürün olarak oluşan atık ısı geri kazanılabilir.
- Yakıt pilleri dayanıklı ve güvenli sistemlerdir.

#### YAKIT PİLİNİN DEZAVANTAJLARI

- Yakıt pili kullanımı, çok fazla bilgi ve ileri teknoloji gerektiren bir sistemdir.
- Diğer sistemlerden daha pahalı bir sistemdir.
- Uygulamalarının tam verimle gerçekleşmesi için uzun zamana ve çok paraya ihtiyaç vardır.

#### GÜNÜMÜZDE YAKIT PİLİ PAZARI

Günümüzde yakıt pili pazarı 218 Milyon \$'dır. 2004 yılında 2.4 Milyar \$ olması

beklenmektedir. Bu rakamın 2009 yılında 7 Milyar \$'a ulaşacağı yapılan çalışmalarla belirlenmiştir. 2004 yılında hangi uygulamanın pazarda ne kadar paya sahip olacağı "Business Communications Company" tarafından araştırılmıştır. Sonuçlara göre;

- Elektrik güç jeneratörleri : 850 Milyon \$
- Motorlu araçlar : 750 Milyon \$
- Taşınabilir güç araçları : 200 Milyon \$
- Askeri/Uzay çalışmaları : 200 Milyon \$
- Diğerleri : 400 Milyon \$

#### SONUÇ ve DEĞERLENDİRME:

Yakıt pilleri gerek taşıt gerek güç istasyonları uygulamalarında gelecekte çok önemli kullanım alanına ve sektörde büyük bir paya sahip olacaktır. Dünyada önde gelen otomotiv şirketleri ve devletler, yakıt pillerinin geliştirilmesi ve araştırılması için çok yüksek miktarlarda para ve zaman harcamaktadır. Çevre faktörünün önem kazandığı bu zamanda çevre dostu olmasının yanında yüksek verime de sahip olan yakıt pilleri gelecekte uygun fiyat uygulamalarıyla öne çıkacak ve alternatif yakıtlar içinde ilk sırayı alacak yakıtlardan biri olacaktır. Türkiye dünyadaki bu eğilimin dışında kalmamalıdır. Ülkemizde yakıt pillerine verilen önem diğer alternatif yakıtlara olduğu gibi düşük düzeyde olup, enerji politikamızda geleceğe dair yatırımlar içinde yakıt pillerinin de yer alması ve dünya ile aynı seviyede araştırma ve geliştirme çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Ülkemizde yakıt pili üniversitelerimizde bilimsel düzeyde uzun zamandır devam etmektedir. İTÜ, ODTÜ ve YTÜ'nde değerli hocalarımız ve araştırma grupları yakıt pilleri üzerinde çalışmalarını sürdürmekte ve dünya çapında başarılarla imza atmaktadır. Yakıt pillerine ilk endüstriyel ilgi ELİMSAN Şirketler Grubu tarafından gösterilmiştir. Bir başka proje de Endüstri-Üniversite işbirliği olarak sonuçlandırılmıştır. EAE Elektrik A.Ş., konutlarda yakıt pilinin kullanımı ve Türkiye'de yakıt pili üretimi amacıyla, TÜBİTAK-TİDEB tarafından desteklenen bu proje sonlandırılmıştır. Bu projede 5 kW elektriksel güç üreten Proton Değişim Membranlı (PEM) bir yakıt pili prototipi geliştirilmiştir. Oluşturulan prototip, doğrudan hidrojenle çalışan veya bir yakıt işlemci (reformer) ilavesi ile, doğal gaz veya LPG ile de çalışabilecek bir yapıdadır. Söz konusu prototipin sayesinde konutlarda elektrik enerjisi ihtiyacını bağımsız şekilde ve çevre koşullarına uygun biçimde karşılamak mümkün olacaktır. Çok yakında "Temiz Enerji Yasası" düzenlenecektir. Bu yasa kapsamında EPDK çalışmaları içinde yakıt pillerinin yerini bulması ve üretilecek elektriğin konumunun belirlenmesi gerekmektedir.

#### KAYNAKLAR

1. Anderson, B., " Fuel Cells for Marine Applications", Hydrogen Today, p. 11-15, Vol 13, No. 1, 2002.
2. Çetinkaya, M., Karaosmanoğlu, F., "Yakıt Pillerinde Hidrojen Kullanımı", 1. Ulusal Hidrojen Kongresi, 16 Temmuz 2002, Ankara.
3. Çetinkaya, M., "The Use of Cyclic Voltammetry In Oxygen Reduction Reaction on Polycrystalline Pt Electrodes", İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya Bölümü Lisans Tezi, İstanbul, Haziran 2001.
4. Çetinkaya, M., Karaosmanoğlu, F., "Yakıt Pillerinde Hidrojen Kullanımı- 1", 3e Electrotech, Bileşim Yayıncılık A.Ş., 100, s. 90-94, İstanbul, Eylül, 2002.
5. Çetinkaya, M., Karaosmanoğlu, F., "Yakıt Pillerinde Hidrojen Kullanımı- 2", 3e Electrotech, Bileşim Yayıncılık A.Ş., 101, s. 79-82, İstanbul, Ekim, 2002.
6. Kadirgan, F., "Hidrojenli Yakıt Hücreleri Teknolojilerinde Son Gelişmeler", 3e Electrotech, s. 64-68, Bileşim Yayıncılık A.Ş., İstanbul, Ocak, 2003.
7. Kirk-Othmer, "Encyclopedia of Chemical Technology", 2nd Edition, John-Wiley & Sons Inc, USA, 1971.

8. Linden D., "Handbook of Batteries and Fuel Cells", McGraw Hill Publishing Company, 1984.
9. Kutlar, O. A., Çalık, A.T., Arslan, H., Özaktaş, T., Karaosmanoğlu, F., " Hydrogen Use in Vehicles", VI. Dünya Yenilenebilir Enerjiler Kongresi, Brighton-UK, Temmuz, 2000.
10. Soruşbay, C., "Karayolu Ulaşımından Kaynaklanan Sera Gazlarının Kontrolü", II. Türkiye Enerji Forumu, İstanbul, Aralık 2002.
11. Şen, Z., "Temiz Enerji ve Kaynakları", Su Vakfı Yayınları, İstanbul, Haziran 2002.
12. [http://www.nferc.uci.edu/fuelcellinfo\\_index.htm](http://www.nferc.uci.edu/fuelcellinfo_index.htm)
13. <http://www.h2fc.com>
14. <http://americanhistory.si.edu>
15. <http://www.HydrogenUS.com>
16. <http://www.internationalfuelcells.com>
17. <http://www.hfcletter.com>
18. <http://fuelcellworld.org>
19. <http://www.fuelcell-eur.nl>
20. <http://www.fuelcells.org>
21. <http://www.hidrojenforumu.com>
22. <http://www.miami.edu/veritas/dec99/frontpage.html>