

**T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# **YAKIT PİLİ İLE ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİMİ**

Fatih YILDIZBİLİR

Tez Yöneticisi  
Prof.Dr. Ata SELÇUK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

ELAZIĞ, 2006

**T.C.**  
**FIRAT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAKIT PİLİ İLE ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİMİ**

Fatih YILDIZBİLİR

Tez Yöneticisi  
Prof.Dr. Ata SELÇUK

Yüksek Lisans Tezi  
Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı

Bu tez, ...../...../..... tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oy birliği / çoğunluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Prof.Dr. Ata SELÇUK

Üye:

Üye:

Üye:

Üye:

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ...../...../..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

## **TEŐEKKÜR**

Bu tez çalışmasında değerli fikirleri ve tecrübeleriyle beni yönlendiren tez yöneticim, Prof. Dr. Ata Selçuk hocama göstermiő olduğu yakın ilgi ve yardımlarından dolayı teőekkür ederim.

Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakóltesi Elektrik Eğitim Bölümü'ndeki bütün öğretim üyesi hocalarıma destek ve yardımlarından dolayı teőekkür ederim.

Ayrıca lisans ve yüksek lisan eğitimim başta olmak üzere bu tez çalışması sırasında da, hiçbir desteği esirgemeyen aileme teőekkür eder, saygı ve sevgilerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>I</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ</b> .....	<b>III</b>
<b>TABLolar LİSTESİ</b> .....	<b>IV</b>
<b>SİMGELER</b> .....	<b>V</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>VI</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. FOSİL YAKITLAR VE ETKİLERİ .....	2
1.1.1. Küresel Isınma (Sera) Etkisi .....	2
1.1.2. Asit Yağmurları .....	3
1.1.3. Hava Kirliliği .....	3
1.2. DÜNYA VE TÜRKİYE’DEKİ HİDROJEN ENERJİSİNİN GELİŞİMİ .....	4
1.2.1. Dünyada Hidrojen Enerjisinin Gelişimi .....	4
1.2.2. Türkiye’de Hidrojen Enerjisinin Gelişimi .....	6
<b>2. HİDROJEN ENERJİSİ</b> .....	<b>8</b>
2.1. HİDROJENİN ÖZELLİKLERİ.....	9
2.2. HİDROJEN ÜRETİMİ .....	10
2.2.1. Buhar-Metan Yeniden Oluşturma Yöntemiyle Hidrojen Üretimi .....	11
2.2.2. Elektroliz Yöntemiyle Hidrojen Üretimi .....	11
2.2.3. Buhar Elektrolizi Yöntemiyle Hidrojen Üretimi .....	12
2.2.4. Hidrojen Sülfür’den Hidrojen Üretimi .....	12
2.2.5. Güneş Enerjisinden Hidrojen Üretimi .....	12
2.2.5.1. Fotokimyasal Sistemler .....	13
2.2.5.2. Güneş Pili Sistemleri.....	14

2.2.5.3. Foto Biyolojik Sistemler .....	14
2.3. HİDROJENİN TAŞINMASI.....	14
2.4. HİDROJENİN DEPOLANMASI .....	15
2.5. HİDROJEN KULLANIMINDA GÜVENLİK.....	17
<b>3. YAKIT PİLLERİ.....</b>	<b>19</b>
3.1. YAKIT PİLLERİNİN TARİHÇESİ.....	19
3.2. YAKIT PİLİNİN ÇALIŞMA PRENSİBİ.....	21
3.3. YAKIT PİLİ ÇEŞİTLERİ .....	23
3.3.1. Proton Değişim Zarlı Yakıt Pili (PEMFC).....	24
3.3.2. Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili (DMFC).....	27
3.3.3. Alkali Yakıt Pilleri (AFC) .....	28
3.3.4. Fosforik Asit Yakıt Pilleri (PAFC).....	30
3.3.5. Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri (MCFC) .....	31
3.3.6. Katı Oksit Yakıt Pilleri (SOFC).....	33
3.4. YAKIT PİLİNİN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI.....	34
3.5. YAKIT PİLİ UYGULAMA ALANLARI.....	35
3.5.1. Uzay Çalışmaları ve Askeri Alanlar .....	35
3.5.2. Ulaşım ve Taşıma .....	36
3.5.3. Sabit Güç Santralleri.....	38
3.5.4. Taşınabilir Uygulamalar .....	38
<b>4. DENEY SETİNİN ÇALIŞMASI VE ÖZELLİKLERİ .....</b>	<b>39</b>
<b>5. SONUÇLAR.....</b>	<b>41</b>
<b>6. KAYNAKLAR.....</b>	<b>42</b>
<b>7. ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>46</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

ŞEKİL 2.1 HİDROJEN ENERJİ SİSTEMİNİN ŞEMATİK GÖSTERİMİ.....	8
ŞEKİL 2.2 HİDROJENİN ÜRETİM VE DAĞITIM ZİNCİRİ.....	15
ŞEKİL 3.1 WILLIAM ROBERT GROVE TARAFINDAN GELİŞTİRİLEN YAKIT HÜCRESİ.....	19
ŞEKİL 3.2 MOND VE LANGER'İN TASARLADIĞI YAKIT PİLİ.....	20
ŞEKİL 3.3 GEMİNİ UZAY ARACINDA KULLANILAN PROTON DEĞİŞİM ZARLI YAKIT PİLİ	21
ŞEKİL 3.4 YAKIT PİLİNİN ÇALIŞMA PRENSİBİ.....	22
ŞEKİL 3.5 PROTON DEĞİŞİM ZARLI YAKIT PİLİ .....	25
ŞEKİL 3.6 DOĞRUDAN METANOL KULLANILAN YAKIT PİLİ.....	27
ŞEKİL 3.7 ALKALİ YAKIT PİLİ .....	29
ŞEKİL 3.8 FOSFORİK ASİT YAKIT PİLİ .....	30
ŞEKİL 3.9 ERİMİŞ KARBONAT YAKIT PİLİ (İÇ DÖNÜŞÜMLÜ).....	31
ŞEKİL 3.10 ERİMİŞ KARBONAT YAKIT PİLİ (DIŞ DÖNÜŞÜMLÜ) .....	32
ŞEKİL 3.11 KATI OKSİT YAKIT PİLİ.....	33
ŞEKİL 4.1 GÜNEŞ ENERJİLİ YAKIT PİLİ SİSTEMİ.....	39

## TABLULAR LİSTESİ

<b>Tablo 1.1</b> Hidrojen ve Yakıt Hücresi Sistemlerinin Geliştirilmesine Yönelik Yakın, Orta ve Uzun Dönem Hedefleri .....	5
<b>Tablo 2.1</b> Hidrojen, Benzin ve Metanın Yakıt Özellikleri .....	10
<b>Tablo 2.2</b> Değişik Enerji Sistemlerinde Açığa Çıkan Kirletici Miktarları Kg/Milyar Joule .....	13
<b>Tablo 2.3</b> Yakıtların Güvenilirliğinin Kıyaslanması .....	18
<b>Tablo 3.1</b> Yakıt Pili Çeşitleri ve Özellikleri .....	24

## SİMGELER

- PEMFC** : Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Proton Değişim Zarlı Yakıt Pilleri
- DMFC** : Direct Methanol Fuel Cells: Doğrudan Metanol Kullanan Yakıt Pilleri
- AFC** : Alkaline Fuel Cells: Alkali Yakıt Pilleri
- PAFC** : Phosphoric Acid Fuel Cells: Fosforik Asitli Yakıt Pilleri
- MCFC** : Molten Carbonate Fuel Cells: Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri
- SOFC** : Solid Oxide Fuel Cells: Katı Oksit Yakıt Pilleri



## KISALTMALAR

- IHEA** : Uluslar Arası Hidrojen Enerjisi Birliği  
**ICHET** : Uluslar Arası Hidrojen Teknolojileri Merkezi  
**UNIDO** : Birleşmiş Milletler Sanayi Kalkınma Örgütü  
**BOREN** : Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü  
**AR-GE** : Araştırma Geliştirme birimine verilen addır

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### YAKIT PİLİ İLE ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİMİ

**Fatih YILDIZBİLİR**

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı

2006, Sayfa: 46

Fosil yakıtların kullanımı çevre üzerinde oldukça fazla sorun oluşturmaktadır ve ömürleri sınırlıdır. Bu nedenle son zamanlarda alternatif yakıt ve alternatif enerji sistemleri üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Yakıt pili ile elektrik üretimi, 20. yüzyılın son çeyreğinde ve 21. yüzyılda bilim adamlarının üzerinde en çok çalıştığı, fikirler yürüttüğü ve yeni yöntemler bulunduğu bir konudur. Yakıt pilleri temiz ve verimli enerji dönüştürücülerdir.

Bu tez çalışmasında, günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik üretim yöntemlerinden biri olan, yakıt pili ile elektrik enerjisi üretimi anlatılmıştır. Bu amaçla önce, günümüzde enerjinin büyük bir kısmının üretildiği fosil yakıtlar ve zararları incelenerek neden yakıt piline ihtiyaç olduğu vurgulanmıştır. Daha sonra yakıt pillerinden elektrik üretmek için yakıt olarak kullanılan ve yenilenebilir bir enerji olan hidrojenin özellikleri konusunda bilgi verilmiştir. Son olarak da yakıt pillinin çalışma prensibi ve yakıt pili türleri hakkında bilgiler verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yakıt Pili, Hidrojen, Yenilenebilir Enerji.

## **ABSTRACT**

Master Thesis

### **GENERATING ELECTRICITY FROM FUEL CELL**

**Fatih YILDIZBİLİR**

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Education

2006, Page: 46

The use of fossil fuels pose many risks an environmet and their life spans are limited. Therefore, some researches have recently been carried out an alternative fuel and alternative energy systems. Generating electricity from fuel cell is a new ideas and found new methods at the turn of the twentieth century and at the beginning of twenty-oneth century. Fuel cells are clean and effective energy transformers.

In this thesis study, generating electricity from fuel cell is sated which is one of the methods of generating electricity from renewable energy sources. First, the reason why fuel cell is needed is emphasized studying the fossil fuels from which much of the energy is generated and its harm. Second, the features of hydrogen are stated, which is used as fuel to generate electricity from fuel cells, and which is a renewable energy. Last, information about running principle of fuel cells and the kind of fuel cells is placed in this study.

**Key words:** Fuel Cell, Hydrogen, Renewable Energy.

## 1. GİRİŞ

Enerji, insana yönelik tüm faaliyetlerin ve üretim basamaklarının gerçekleşmesi için gerekli temel kaynaktır. Sürdürülebilir kalkınmanın ekonomik, sosyal ve çevresel boyutlarının tartışılmasında önemli bir faktördür. İnsanlığın gelişimi ile birlikte enerji ihtiyacı da sürekli olarak artmaktadır. Günümüzde gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin en önemli gereksinimi enerjidir. Her ne kadar tam bir ölçüt olmasa da ülkelerin gelişmişlik düzeyleri, üretim tükettikleri enerji ile ölçülür.

Endüstrileşme ile baş gösteren buhar gücü gereksinimi, dolayısıyla kömür kullanımı büyük bir hızla artmıştır. Daha sonraları elektrik enerjisinin kullanılmaya başlanması ve içten yanmalı motorların kullanım alanının genişlemesi ile elektrik üretiminde kömür ve petrol kullanımı çok büyük bir hızla artmıştır. Sonunda endüstri ve çağdaş yaşam için en önemli ham madde, fosil yakıtlar (kömür, doğal gaz, petrol vb.) olmuştur.

Uzun zamandan beri enerji üretimi uygulamalarında yaygın olarak kullanılan doğal gaz, kömür, petrol ve petrol ürünleri gibi fosil kökenli yakıtlar, bütün dünyayı etkileyen kararsızlığa ve huzursuzluğa neden olmaktadır. Bu problemin artması gelecekte muhtemelen çok daha büyük sorunları beraberinde getirecektir. Gelecekte dünya barışının hidrojen ile ilişkili olması ve hidrojenin kullanılmasıyla dünya çapında kararlılığın sağlanması yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı yeni teknolojilerin araştırılması ve geliştirilmesi önemli olacaktır. Bilindiği gibi hidrojen bir enerji kaynağı değil mükemmel bir enerji taşıyıcısıdır. Bu mükemmel enerji taşıyıcısı hidrojenin su, güneş enerjisi, biyokütle vb. gibi fosil kökenli olmayan kaynaklardan, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretilmesi mümkündür (Cowender, Nahon ve Rosen 2001).

Hidrojenin, gelecekte dikkate alınması gereken en önemli ve kayda değer bir enerji taşıyıcısı olmasının nedeni; kullanıldığı teknolojilerde verimi yükseltmesi ve düşük kirletici etkisinin olmasıdır. Hatta hidrojen yandığında egzoz emisyonlarında su ve ısı vermesi, hiçbir kirletici madde bulunmaması, hidrojenin diğer yakıtlara göre çevre dostu olduğunu gösterir. Fosil kökenli olmayan kaynaklarla üretilen hidrojen, yakıt pillerinde, elektrik motorlarında, taksi, otobüs, denizaltı gibi taşıtların çalıştırılmasında ve diğer cihazlarda kolaylıkla ve verimli bir şekilde kullanılabilir (Midilli, Ay ve Dinçer, 2004). Bununla birlikte, hidrojenin depolanabilmesi ve ihtiyaç duyulduğunda istenilen yerde tekrar enerjiye dönüştürülebilmesi bu yakıtın diğer bir avantajıdır.

Bu şartlar altında, dünyanın giderek artan enerji ihtiyacını çevreyi kirletmeden ve sürdürülebilir olarak sağlayabilecek en uygun enerji kaynağı hidrojen enerjisi olduğu, tüm dünya tarafından kabul edilmektedir.

## 1.1. Fosil Yakıtlar ve Etkileri

Fosil yakıtlar, çürüyen bitki ve hayvan artıklarında, güneş enerjisinin milyonlarca yıllık depolanmasıyla oluşmuş, yenilenemeyen kaynaklardır. Bu yakıtlar yeraltında ısı ve basınçla oluşmaktadır. Bu kadar uzun süreçte oluşan kaynaklar halen uygulanan enerji dönüşüm sistemleriyle oluşumundan çok daha kısa sürede tüketilmektedir. Bu sebeple fosil yakıtlar kısa süreçte yenilenemeyen olarak düşünülürler, yani kullandığımızdan daha az bir bölümü yeniden oluşmaktadır. Özellikle de artan nüfus, şehirleşme ve endüstrileşme pek çok yıldır bu yakıtlarla karşılanan enerji gereksiniminin daha da fazlaşmasına neden olmaktadır (Bockirs, Veziroğlu ve Smith, 2002).

Günümüzde fosil yakıtların kullanımı çözümü çok zor olan iki temel sorunu karşımıza çıkarmaktadır. Bu sorunların ilki fosil yakıtların azalan rezervlerin yeniden oluşturulamamasıdır. Çünkü fosil yakıtlar milyonlarca yılda oluşurlar ve yapay olarak yapılması mümkün değildir. Bu yakıtların tükenmesi ve fiyatlarının devamlı artmasının yanı sıra, yanmaları sonucu çevreye verdikleri zararlar ve insan sağlığı üzerindeki etkileri de büyüktür. Şu an enerji elde etmek için kullandığımız fosil yakıtların hepsi karbon içermektedir.

Hidrojen enerjisinin yararlarını daha iyi anlayabilmek için, halen yoğun bir şekilde kullanılmakta olan fosil yakıtların çevreye yaptığı etki incelenmelidir. Bilindiği gibi kömür, petrol, doğalgaz gibi yakıtların yanmasıyla atmosfere salınan değişik gazlarla birlikte bazı toz parçacıkları atmaktadır. Atılan bu gaz karışımı parçacıklar arasında karbonoksitler ( $CO_x$ ), azotoksitler ( $NO_x$ ) ve kükürtoksit ( $SO_x$ ) gibi gazlar birincil kirleticilerdir. Bu kirleticiler, atmosferde güneş ışığı, su veya diğer atmosferik bileşiklerle kimyasal reaksiyona girip ozon, aerosol ve çeşitli asitler gibi ikincil kirleticileri meydana getirebilirler (Ar, 1998).

### 1.1.1. Küresel Isınma (Sera) Etkisi

Karbondioksit esas itibarıyla tabiatta karbon çevriminde karbonun aldığı formlardan birisidir. Fosil yakıt olarak tabir edilen yakıtların yakılması neticesinde yanma ürünü olarak açığa çıkar. Bunun yanı sıra bazı kimyasal, elektrokimyasal ve biyokimyasal süreçler neticesinde de karbondioksit oluşur. Bu süreçlerden en önemlisi doğadaki karbon çevrimi içerisinde  $CO_2$  dönüşümünün olduğu denizlerde meydana gelen süreçtir. Bu süreç içerisinde açığa çıkan  $CO_2$  atmosfere yükselir daha sonra tekrar toprağa ve suya döner. Bu çevrim doğal hayatın devamlılığındaki temel döngülerdendir. Bu döngü sayesinde dünyanın ısı ve sıcaklık dengesi korunur (ETKB, 2005).

Ancak fosil yakıtların aşırı ve kontrolsüz kullanımı sonucu ile birlikte atmosferdeki karbondioksit oranı artmıştır. Atmosferde biriken bu karbondioksit güneşten gelip yeryüzünden yansıyan güneş ışınlarının tekrar atmosfer dışına çıkmasını engelleyerek sera etkisi

oluşturmaktadır. Sera etkisini oluşturan bileşenlerden karbondioksit de, oldukça uzun zaman dilimi olan 10.000 yılda olabilecek bu değişime son 100 yılda ulaşılmıştır.

Sera etkisiyle meydana gelen küresel ısınma, çok duyarlı ve kararlı bir dengede bulunması gereken dünya ortalama sıcaklığının, 1860 yılından bu yana 0.7 °C'lik artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu artışın 2025 yılında 1.25 °C, 2050 yılında 2.2 °C, 2075 yılında 3.5 °C ve 2100 yılında 5.4 °C olacağı tahmin edilmektedir. İlk bakışta küçük gibi görünen bu sıcaklık artışlarının olası etkileri ne yazık ki küçük olmayıp, dünyadaki yaşamı alt üst edebilecek kadar büyüktür. Çünkü her bir derecelik artış, kuzey ve güney yarım kürede iklim kuşaklarına 160 km'lik yer değiştirtebilecek, 5 derecelik artış ise kutuplardaki buz erimeleri sonucu denizlerin 1 metreden daha çok yükselmesine, göllerin kurumasına, tarımsal kuraklığa ve toprak erozyonuna neden olabilecektir (Ar, 1998). Ayrıca yer yüzeyine yakın yerlerde ısınma ve hava kürenin yukarı kısımlarında oluşturacağı soğuma nedeniyle yüksek basınç sistemlerinin etkileneceği, buna bağlı olarak aşırı soğuk ve aşırı sıcaklıklar görülecek şekilde iklim değişiklikleri meydana geleceği tahmin edilmektedir (DPT, 2000).

### **1.1.2. Asit Yağmurları**

Fosil yakıtların tümünün bileşiminde az veya çok miktarda kükürt bulunur. Yanma sonucu bu kükürt, kükürtdioksit (SO<sub>2</sub>) ve kükürttrioksit (SO<sub>3</sub>) biçimine, kısaca bunların toplamını ifade eden kükürtoksit (SO<sub>x</sub>) emisyonuna dönüşür. Özellikle, Kükürtoksit ve azotoksit, atmosferdeki mutlak nem ile birleşerek sülfüroz veya sülfürik asit biçimine dönüşerek, yağmurla birlikte asit yağmuru olarak yeryüzüne döner. Asit yağmurları kültür alanlarında, ormanlarda, doğal bitki örtüsü üzerinde, tarımsal alanlarda, binalarda ve insanlarda büyük tahribat yapar. Asit yağmurları nedeniyle birçok doğal eko sistemler tamamen ölmüş, doğadaki gıda ve madde zinciri ile ağır metaller insan vücuduna besinlerle girmeye başlamıştır.

### **1.1.3. Hava Kirliliği**

Çevre kirlenmesinin önemli türlerinden biri olan hava kirlenmesine esas itibariyle sanayide, ulaşımda, elektrik santrallerinde kullanılan fosil yakıtlar yol açmaktadır. Özellikle son yıllarda üzerinde önemle durulan ve önlemler alınmaya çalışılan hava kirliliği olayı modern yaşamın bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Havadaki katı, sıvı ve gaz şeklindeki yabancı maddelerin insan sağlığına, canlı hayata ve ekolojik dengeye zararlı olabilecek yoğunluk ve sürede olması, hava kirliliği olarak tanımlanır. Fosil yakıtların yakılması sonucu ortama atılan zararlı gazların canlı yaşamı üzerinde büyük etkileri vardır. Kükürtoksit gazının havada yüksek yoğunlukta olması, insanlarda solunum güçlüğüne sebebiyet vermekte ve boğucu bir hisse yol açmaktadır. Hava kirliliğinden dolayı dünyanın büyük şehirlerinde solunum hastalıkları artmakta ve ortalama hayat süreleri kısalmaktadır (Veziroğlu, 2004).

## 1.2. Dünya ve Türkiye'deki Hidrojen Enerjisinin Gelişimi

### 1.2.1. Dünyada Hidrojen Enerjisinin Gelişimi

Nüfusu 6 milyar civarında olan dünya her 35 yılda iki katına çıkmaktadır. Enerji talebi ise daha hızlı artmaktadır. Bunun sebebi, insanların hayat standartlarını yükseltme çabalarıdır. Hayat standardı doğrudan doğruya tüketilen enerjiyle orantılı olduğundan daha fazla enerji tüketen ülkeler daha iyi yaşama standardına sahiptirler. Bundan dolayı dünyanın enerji tüketimi, nüfus artışına göre çok daha hızlı olmaktadır ve her 12 yılda iki katına çıkmaktadır (Veziroğlu, 2004). Artan enerji talebini karşılamak için kullanılan yöntemler birçok sorunu beraberinde getirmektedir.

Ozon tabakasının delinmesi, canlıların yaşam kaynağı olan havanın kirlenmesi, dünya ısısının hangi nedenle olursa olsun artması ve bu artmanın sürekli olarak devam etmesi, dünyadaki petrol rezervlerinin azalması bilim adamlarını hidrojen enerjisi yönde görüş beyan etmeye ve bu görüşler doğrultusunda seri çalışmalar başlatmaya yöneltmiştir (Haktanır, 2003).

İdeal bir yakıt konumunda olan hidrojenin, üretimi, uygulama ve ekonomik açıdan karşılaşılan sorunların çözülmesiyle yaygın bir şekilde kullanılacağı açıkça görülmektedir. Bu alanda dünyada özellikle Almanya, Amerika ve Japonya başta olmak üzere, birçok ülkede araştırmalar sürmektedir. Avrupa Birliği bütçesinden, gerekli AR-GE çalışmalarında kullanılmak üzere ilk beş yıl için 5 Milyar Euro ayırmıştır (Karaosmanoğlu, 2004).

Önceleri sadece uzay teknolojileri için kullanılan hidrojen enerjisi ile ilgili çalışmalar gizlilik içerisinde yürütülüyordu. 1974 yılında ABD'nin Florida eyaletinde, Miami Üniversitesi Temiz Enerji Enstitüsü tarafından düzenlenen "Hidrojen Ekonomisi Miami Enerji Konferansı", bu konuların yayılması ve hidrojen enerjisi kullanımına başlangıç oluşturmuştur. Bu toplantı ile Uluslararası Hidrojen Enerjisi Birliği (IHEA) kurulmuştur (TÜSİAD, 1998).

Dünyada çeşitli ülkelerde hidrojen enerjisi araştırmaları büyük bir hızla devam etmektedir. Japonya WE-NET (World Energy Network) programını, Almanya Suudi Arabistan ile ortak olarak Hysolar programını, Avrupa ve Kanada Euro-Quebec programını ve İzlanda'da hidrojen enerjisi üzerine programlarını devam ettirmektedirler. Bunlardan başka INTA solar hidrojen tesisi (İspanya), SAPHYS küçük ölçekli fotovoltaik-hidrojen enerji sistemi (İtalya, Almanya, Norveç) ve PHOEBUS gösterim tesisi (Almanya) gibi birçok program daha sürdürülmektedir (Ün, 2003a). Ayrıca Japonya 2006 yılında ilk ticari yakıt pilini piyasaya çıkarmayı planlamaktadır.

Bütün dünya ülkeleri tarafından kabul gören ve çalışmalar yapılan hidrojen ve yakıt hücresi sistemlerinin geliştirilmesine yönelik öneri olarak Avrupa ülkeleri de yakın, orta ve uzak hedefler olarak bir yol planı belirlemişlerdir. Bu hedefler Tablo 1.1'de gösterilmektedir.

**Tablo 1.1 Hidrojen ve Yakıt Hücresi Sistemlerinin Geliştirilmesine Yönelik Yakın, Orta ve Uzun Dönem Hedefleri**

<b>Hidrojen Üretimi</b>	<b>Yıl</b>	<b>Yakıt Hücresi ve Hidrojen Sistemlerinin Geliştirilmesi, Yaygınlaştırılması</b>
Hidrojenin, elektrolizle ve doğal gaz reforming yöntemiyle üretilmesi	2005	Düşük sıcaklıkta çalışan portatif ve sabit yakıt hücresi (PEM/AFC) sistemlerini uygun ticari uygulamaları (< 50 kW)
Bölgesel hidrojen dolun istasyonları, karayolu ile hidrojen taşınması ve yakıt ikmal istasyonlarında hidrojen üretimi (Reforming ve elektroliz)	2010	Yüksek sıcaklıkta çalışan sabit yakıt hücresi sistemlerinin geliştirilmesi (MCFC/SOFC) (<500 kW)
		Düşük sıcaklıkta çalışan sabit yakıt hücresi sistemlerinin geliştirilmesi (PEM/AFC) (<300 kW)
Bölgesel hidrojen dağıtım şebekeleri		Yakıt hücresi araçlarının seri üretimi ve diğer taşımacılık işlemlerine uygulanması
Çevre ile uyumlu hidrojen üretim yöntemlerinin geliştirilmesi	2020	Hidrojen araç filolarının kurulması
		SOFC sistemlerinin ticarileştirilmesi (<10 MW)
		Yolcu araçlarında yakıt hücrelerinin kullanımı
Bölgesel hidrojen dağıtım şebekeleri arasında bağlantı kurulması. Hidrojen üretiminin önemli ölçüde yenilenebilir enerji kaynaklarından üretimi	2030	Düşük maliyette, yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt hücresi sistemleri
		Yakıt hücrelerinin yaygınlaştırılmasıyla güç üretiminin dağılımında önemli ölçüde büyüme
Yaygın hidrojen boru hattı altyapısının oluşturulması	2040	Hidrojenli yakıt hücresi araçlarının yaygınlaştırılması
Hidrojenin doğrudan yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretimi	2050	Yakıt hücrelerinin taşımacılıkta, yaygın güç üretiminde ve portatif uygulamalarda baskın teknoloji haline gelmesi
		Hidrojenin havacılıkta kullanılması

**Kaynak:** Eroğlu, İ. (2004a). Türkiye ve Dünyada Hidrojen Enerjisi. V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu Bildiri Kitabı Cilt: 2, 674s, İstanbul: Su Vakfı Yayınları.



Tablo 1.1 incelendiğinde, yakın ve orta dönemde (2010'a kadar) hidrojenin elektrolizle doğal gaz reforming yöntemiyle üretilmesi, orta dönemde (2020'ye kadar) çevreye uyumlu teknolojilerle hidrojen üretimi, orta ve uzun dönemde ise (2020 yılından sonrası) biokütle enerjisiyle hidrojen üretiminin önemli ölçüde yaygınlaştırılması, 2050'den sonra ise tamamen yenilenebilir enerji kaynaklarında hidrojen üretimi planlanmaktadır (Eroğlu, 2004b).

Yakıt pili uygulamaları portatif, sabit ve hareket eden sistemlerde kullanılmak üzere üç ayrı sistemde incelenmelidir. Yakın dönemde, 2010 yılına kadar, tüm uygulamalarda 50 kW'tan az olan sistemlerde düşük sıcaklıkta çalışan proton değişim zarlı (PEM) yakıt pili sistemleri, 500 kW'a kadar yüksek sıcaklıkta çalışan doğal gaz, LPG, dizel gibi yakıtların doğrudan uygulanabileceği erimiş karbonat (MCFC) ve katı oksit (SOFC) yakıt pillerinin geliştirilmesi planlanmaktadır. Orta dönemde, 2020'ye kadar, yakıt hücreli araç filolarının seri üretimi (doğrudan hidrojen kullanan), diğer taşımacılık işlemlerine uygulaması (tekne vb.) ve sabit yardımcı güç ünitelerinde yakıt pilinin kullanımı planlanmaktadır. Katı oksit yakıt pili sistemlerinin 10 MW'a kadar atmosferik ve hibrit ticari uygulamasının gerçekleştirilmesi, portatif uygulamalarda yakıt pili kullanımının yaygınlaştırılması, yolcu araçlarında yakıt hücrelerinin kullanımı planlanmaktadır. Uzun dönemde 2020–2050 yılları arasında ise yakıt hücrelerinin taşımacılıkta, güç üretiminde ve portatif uygulamalarda baskın teknoloji haline gelmesi beklenmektedir.

### 1.2.2. Türkiye'de Hidrojen Enerjisinin Gelişimi

Gelişmiş ülkelerin yanı sıra birçok ülkede hidrojen ekonomisine geçiş doğrultusunda politikalar belirlenmekte, ulusal plan ve programlar hazırlanmakta, yoğun araştırmalar yapılmakta, yasal mevzuat ve standartlar hazırlanmaktadır. Bu kapsamda Türkiye'de, dünyanın en büyük araştırma merkezi İstanbul'da kurulmuştur. Uluslararası Hidrojen Enerjisi Teknolojileri Merkezi'nin (ICHET) kurulmasına ilişkin anlaşma, Birleşmiş Milletler Sanayi Kalkınma Örgütü (UNIDO) ile Enerji Bakanı arasında imzalanmıştır. İstanbul'da kurulan "Dünya Hidrojen Merkezi", UNIDO'nun oluşturacağı bir hibe fonuna sahip olacaktır. Bu fona, Türkiye'nin yanı sıra birçok ülke ve kuruluş hibe yapabilecektir. Uluslararası Hidrojen Enerjisi Teknolojileri Merkezi'nin (ICHET)'in başlıca amaçları;

- Kalkınmış ve kalkınmakta olan ülkeler arasında bir köprü vazifesi görerek; hidrojen araştırma, geliştirme ve yatırımcı kuruluşlar arasında bir koordinasyonu sağlamak ve gelecekteki hidrojen teknolojisi ve endüstrisinin uygulama alanlarını tespit etmek,
- Hidrojen teknolojisi uygulamalarında barışçıl ve kalkınmaya yönelik işbirliğini geliştirmek,

- Hidrojen araştırma ve geliştirme çalışmalarının artırılması için kalkınmış ülkelerin bilim adamları ve uzmanlarının doğrudan katkılarını sağlamak,

Ayrıca ülkemizin en önemli enerji kaynaklarından ve dünya rezervlerinin %60'ın ülkemizde barındıran bor'un ve bileşenlerinin de hidrojen enerjisi konusunda kullanılmasını sağlamak amacıyla, UNIDO ile Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN) arasında 13.07.2005 tarihinde bir niyet mektubu imzalanarak, Uluslararası Bilimsel ve Teknolojik işbirliği oluşturulmuştur. Bu işbirliği, beraber geliştirilip yürütülecek uluslararası araştırma projeleri, toplantılar, seminerler ve kongreler gibi çeşitli faaliyetler ve organizasyonlarla gerçekleştirilecektir (ETKB, 2005).

Hidrojen enerjisi teknolojisi üzerine ülkemizdeki araştırma kuruluşları ve çeşitli üniversiteler tarafından çalışmalar yapılmaktadır. Ülkemizde, üniversite-sanayi işbirliği ile özel bir şirket olan EAE Grubu tarafında 1.5 kW gücünde proton değişim zarlı yakıt hücresini üretmiştir. Bu hücre saf hidrojen ve havadaki oksijeni kullanarak çalışmaktadır. EAE Grubunun bundan sonraki projeleri arasında ise 5 kW gücünde konutsal yakıt hücresi üretimi, direkt metanol yöntemi kullanılarak 50–100 Watt gücünde taşınabilir yakıt hücresi üretimi ve uzun vade de 50 kW sabit güç istasyonları kurulmasına yönelik proje desteği alınması yer almaktadır (Balkan ve Öztürk, 2004).

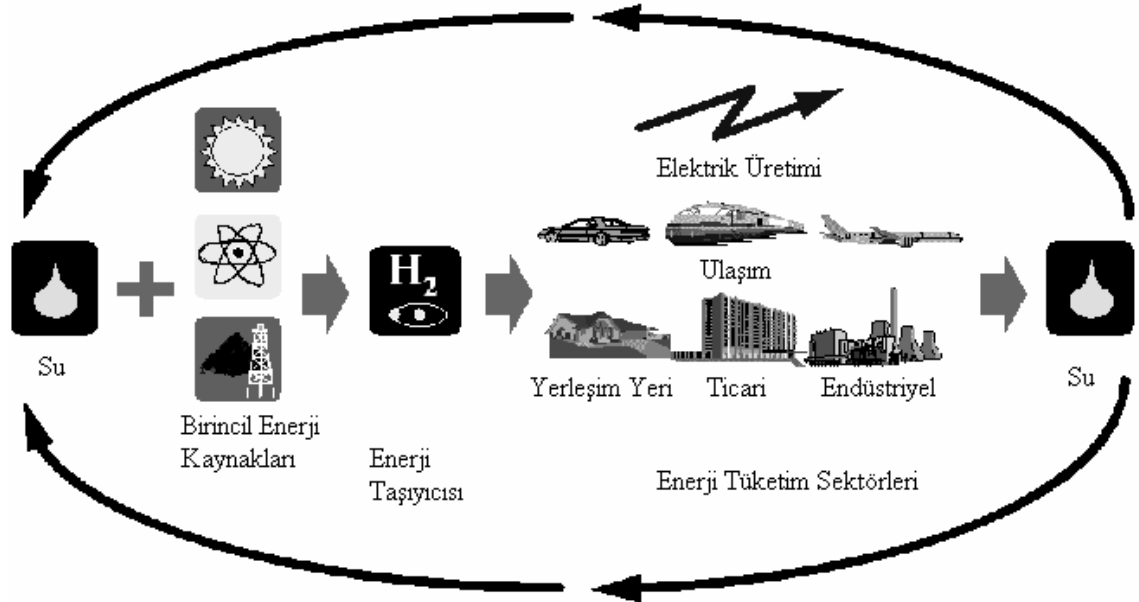
Teknolojik verilere ve Türkiye'nin enerji-ekonomi verilerine göre, 1995–2095 yılları arasında güneş-hidrojen sistemli yakıt üretimi ve bunun fosil yakıtlarla rekabet olanağı, özel bir simülasyon modeli kapsamında bilgisayar çözümleriyle araştırılmıştır. Bu ulusal modelde, 2010–2015 döneminde hidrojen enerjisi maliyetinin fosil enerji maliyetinin altına düşebileceği, ancak yapılabilecek yerli hidrojen üretiminin 2.3 milyon ton eşdeğer petrol (Mtep)'ün altında kalacağı görülmüştür. 2020–2025 döneminde yerli hidrojen üretiminin 10 Mtep'ün üzerine çıkabileceği, 2015 yılından sonra fosil yakıt dışalımını azaltıcı etki yapacağı bulgular arasında yer almıştır. Giderek artan hidrojen üretimi, yerli petrol, doğal gaz ve kömür üretiminin sınırlanabileceği 2065 yılında, yaklaşık 290 Mtep hidrojen üretilabileceği görülmüştür. Hidrojen üretimine bağlı biçimde ulusal kazancın artacağı saptanmıştır (TÜSİAD, 1998).

Türkiye'de hidrojen üretiminde kullanılacak olası kaynaklar, hidrolik enerji, güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, deniz-dalga enerjisi ve jeotermal enerji olarak bildiğimiz yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Türkiye gibi gelişme sürecinde ve teknolojik geçiş aşamasındaki ülkeler açısından, uzun dönemde fotovoltaik güneş-hidrojen sistemi uygun görülmektedir. Ayrıca diğer bir kaynağımızda Karadeniz kıyılarıdır. Karadeniz'in tabanında kimyasal biçimde depolanmış hidrojen-sülfür, büyük bir hidrojen kaynağıdır. Elektroliz reaktörü ve oksidasyon reaktörü gibi iki reaktör kullanarak hidrojen-sülfürden hidrojen üretilabileceği bilimsel çalışmalarla ispatlanmıştır (DPT, 2001).

## 2. HİDROJEN ENERJİSİ

Enerji son tüketiciye yakıt veya elektrik biçiminde sunulmaktadır. İkincil enerji olan elektriğin çeşitli kullanım avantajlarının bulunmasına karşın, teknoloji yalnızca elektriğe bağlı olarak değil, yakıtı da önemli kılmaktadır. Bunun nedeni, genel enerji tüketiminin % 60'ının ısı biçiminde gerçekleşmesidir. Birincil enerji kaynaklarının, fiziksel durum değişimi içeren biçimde dönüştürülmesi ile elde edilen ikincil enerjilere, enerji taşıyıcısı denir. Elektrik 20. yüzyıla damgasını vurmuş bir enerji taşıyıcısıdır. Hidrojen ise 21. yüzyıla damgasını vuracak bir diğer enerji taşıyıcısıdır.

Hidrojen enerjisi kullanılmasını gerektiren başlıca iki neden olup, birincisi fosil yakıtların yanması sonucu çevreye verdiği zararlar, diğeri de petrol, doğal gaz gibi akışkan yakıtların, bilinen üretilebilir rezerv ömürlerinin insan ömrüyle kıyaslanabilecek boyuta düşmüş olmasıdır. Hidrojen, kolayca ve güvenli olarak her yere taşınabilen, taşınmasında çok az enerji kaybı olan, her yerde (sanayide, evlerde ve taşıtlarda) kullanılabilen, tükenmez, temiz, kolaylıkla ısı, elektrik ve mekanik enerjiye dönüşebilen, karbon içermeyen, ekonomik, hafif ve verimi çok yüksek olan bir yakıttır. Hidrojen doğal bir yakıt olmayıp, birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak su, fosil yakıtlar ve biyokütle gibi değişik hammaddelerden üretilebilen sentetik bir yakıttır (Ün, 2003a). Hidrojen enerji sisteminin şematik gösterimi Şekil 2.1. de görülmektedir.



Şekil 2.1 Hidrojen Enerji Sisteminin Şematik Gösterimi

## 2.1. Hidrojenin Özellikleri

21. yüzyılın enerji kaynağı olarak kabul edilen hidrojen 1500'lü yıllarda keşfedilmiş, 1700'lü yıllarda yanabilme özelliğinin farkına varılmıştır. Hidrojen evrenin en basit ve en çok bulunan elementi olup, renksiz, kokusuz, havadan 14.4 kez daha hafif ve tamamen zehirsiz bir gazdır. Güneş ve diğer yıldızların termonükleer tepkimeyle vermiş olduğu ısının yakıtı hidrojen olup, evrenin temel enerji kaynağıdır (Veziroğlu, 2004).

Periyodik cetvelin birinci elementi olan hidrojenin sembolü H'tır. Atom ağırlığı 1.00797, yoğunluğu 0.0899 gram/litre, kaynama noktası -252.76 °C ve erime noktası -259.06 °C'dir. Sıvı hidrojenin yoğunluğu 0.070 g/cm<sup>3</sup>, kristal halindeki yoğunluk ise 0.088 g/cm<sup>3</sup>'tür. Periyodik cetvelde 1A, alkali metaller grubunda olmasına rağmen 1A grubu özelliklerini göstermeyen bir ametaldir. Bileşiklerinde +1 ve -1 değerlilik alır. -1 değerlilikli olan hidrojene hidrür denir. Hidrojenin üç farklı izotopu vardır. Doğada en çok bulunanı kütle numarası 1 olan (<sup>1</sup>H) izotopudur. Bu izotopa protiyum da denir. Bir proton ve bir elektrondan meydana gelmiştir. Hidrojen nötronu olmayan tek elementtir (Hazer, 1995).

Sıvı hidrojenin hacmi gaz halindeki hacminin sadece 1/700'ü kadardır. Hidrojen bilinen tüm yakıtlar içerisinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahip 2.016 moleküler ağırlığı ile en hafif kimyasal elementtir. Sıvı hidrojenin birim kütesinin ısıl değeri 141.9 MJ/kg olup, petrolden 3.2 kat daha fazla enerji içermektedir. Sıvı hidrojenin birim hacminin ısıl değeri ise 10.2 MJ/m<sup>3</sup> tür ve petrolün %28'i kadardır. Gaz hidrojenin birim kütesinin ısıl değeri sıvı hidrojenle aynı olup, doğal gazın 2.8 katı kadarken, birim hacminin ısıl değeri 0.013 MJ/m<sup>3</sup> ile doğal gazın %32.5'i olmaktadır. Rakamları daha sade bir şekilde ifade edersek, 1 kg hidrojen 2.8 kg doğal gaz veya 3.2 kg petrolün sahip olduğu enerjiye sahiptir. Hidrojen doğada serbest halde bulunmaz, bileşikler halinde bulunur. En çok bilinen bileşiği sudur. Hidrojenin büyük kısmı oksijenle birleşerek su (H<sub>2</sub>O)'yu oluşturmaktadır. Sudaki üç atomdan ikisi hidrojendir. Okyanuslar, göller ve nehirler birer hidrojen rezervi olarak kullanılabilir (Bockirs, Veziroğlu ve Smith, 2002).

Hidrojen yakıtının dönüştürülebilirliği ve çok yönlü kullanımı, yanma işlemi dışında, diğer enerjilere dönüşümlerine uygunluğunu gösterir. Hidrojen alevsiz yanma (katalitik yanma), alevli yanma direkt buhar üretme, hidritleşme ile kimyasal dönüşüme ve yakıt hücresiyle elektrik dönüşümüne uygun bir yakıt iken, fosil yakıtlar yalnızca alevli yanmaya uygundur. Hidrojen alevli yanma özelliği ile içten yanmalı motorlarda, gaz türbinlerinde ve ocaklarda yakıt olarak kullanılabilir. Hidrojenin direkt buhara dönüşüm özelliği, buhar türbinleri uygulamasında kolaylık sağlamaktadır. Bu özelliği ile endüstriyel buhar üretimi de kolaylaşmaktadır. Hidrojen katalitik yanma özelliğinden mutfak ocakları, su ısıtıcıları ve sobalara uygulanmasında yararlanılmaktadır. Hidritleşme, yani hidrojenin bir organik moleküle

depolanması özelliği de hidrojen depolanması açısından önemlidir. Ayrıca kimyasal reaksiyona girme özelliğinden dolayı da yakıt pillerinde elektrokimyasal çevrimle direk elektrik üretiminde kullanılmaktadır.

Hidrojenin en önemli özelliği ise, elektrikten ve güneş enerjisinden üretilirken, taşınırken veya depolanırken ve son kullanımında herhangi bir kirlenici üretmez, çevreye zararlı bir etkisi yoktur. Hidrojenin yanması veya yakıt hücrelerinde kullanılması sonucu son ürün sadece saf su dur. Yanma yüksek sıcaklıklarda olursa havadaki azot ve oksijenden azotoksitler oluşabilir. Ancak bu sorun diğer yakıtlarla aynıdır ve kontrol edilebilir (Gosselink, 2002). Hidrojenin yakıt olarak bazı özellikleri benzin metan gibi yakıtlarla karşılaştırmalı olarak Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

**Tablo 2.1 Hidrojen, Benzin ve Metanın Yakıt Özellikleri**

Özellikler	Benzin	Metan	Hidrojen
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	4.40	0.65	0.084
Hava içindeki yayılması (cm <sup>2</sup> /s)	0.05	0.16	0.61
Sabit basınçta özgül ısısı (J.g/K)	1.2	2.22	14.89
Havada ateşlenme sınırı (% hacim)	1.0–7.6	5.3–15.0	4.0–75.0
Ateşlenme sıcaklığı (°C)	228–471	540	585
Havada alev sıcaklığı (°C)	2197	1875	2045
Patlama enerjisi (g.TNT.k/J)	0.25	0.19	0.17
Alev yayılması (%)	34	25	17

**Kaynak:** Oral, E. ve Çelik, V. (2005). Hidrojen Yakıtlı Motor Teknolojisi. Mühendis ve Makine Dergisi Cilt:46, Sayı:540, 32s.

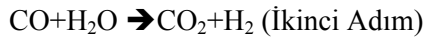
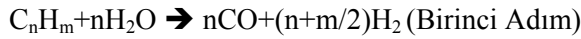
## 2.2. Hidrojen Üretimi

Hidrojen doğal bir yakıt olamayıp, birincil enerji kaynaklarından yararlanarak değişik hammaddelerden üretilen bir sentetik yakıttır. Hidrojen üretiminde tüm enerji kaynakları kullanılabilir. Kullanılan hammaddeler ise su, kömür, doğal gaz sayılabilir. Ancak sayılan bu kaynaklardan kömür ve doğal gaz fosil yakıt olup, sınırlı rezerve sahiptir. Ayrıca bu kaynakların gerek birincil enerji kaynağı, gerekse hidrojen üretim kaynağı olarak kullanılması çevreye zarar vermektedir. Bu nedenle hidrojenin temiz enerji kaynakları ile sudan üretilmesi en doğru seçimdir. Her türlü birincil enerji kaynakları yardımıyla üretilen hidrojen, günümüzde suni gübre sanayisi, bitkisel yağ üretimi, petrokimya endüstrisi ve roket yakıtı gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Bunun için dünyada her yıl 600 milyar metre küp hidrojen

üretilmektedir. Hidrojen üretimi için çok eskiden beri bilinen bir yöntem, bileşiği H<sub>2</sub>O olan suyun içindeki hidrojeni elektroliz yoluyla ayırmaktır. Burada hidrojen üretimi yöntemlerini tanımlarken, kullanılabilecek birincil enerji kaynaklarını da ayrıca belirtmek yerinde olacaktır. Buna göre hidrojen, fosil yakıtlar yardımıyla olabildiği gibi, güneş, rüzgâr, dalga enerjileri, jeotermal enerji ve biyokütle gibi birincil enerji kaynaklarının hepsi ile aşağıda tanımlanan yöntemlerin herhangi biri ile üretilir.

### 2.2.1. Buhar-Metan Yeniden Oluşturma Yöntemiyle Hidrojen Üretimi

Günümüzde hidrojen üretimi için en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Bu üretim biçimi iki adımdan oluşmaktadır. Birinci adımda doğal gaz yüksek sıcaklıkta (392 °C) buhara tabi tutularak hidrojen, karbonmonoksit ve karbondioksit elde edilir. İkinci adımda ise karbonmonoksit buhara tabi tutularak ilave hidrojen ve karbondioksit elde edilir. Hidrojen üretmek için en verimli yöntem bu yöntemdir ve hidrojen ürün miktarı % 70– % 90 arasında olur. Fakat ikinci adımdan sonra çevre kirliliğine neden olan CO<sub>2</sub> açığa çıktığı için geçerli bir yöntem değildir. Uygulanan yöntemin kimyasal formülü aşağıda verilmiştir (Dinçer, 2002).



### 2.2.2. Elektroliz Yöntemiyle Hidrojen Üretimi

Suyun doğru akım kullanılarak hidrojen ve oksijenlerine ayrılması işlemine elektroliz denmektedir. Hidrojen üretimi için en basit yöntemdir. Bir elektroliz hücresi içinde, düzlem şeklinde iki elektrot ve bunların içine daldırıldığı, elektrolit olarak adlandırılan iletken bir sıvıdan oluşmaktadır. Doğru akım kaynağı bu elektrotlara bağlandığında akım iletken sıvı içinde, pozitif elektrottan negatif elektrota doğru akar. Bunun sonucunda, su moleküllerine uygulanan doğru akım, hidrojen ve oksijen atomlarının bağlarının kopması sağlanır. Oluşan yüklü parçacıklardan hidrojen iyonu pozitif elektrik yüküne sahiptir ve negatif elektrotta toplanır, oksijen ise negatif yüke sahip olduğundan pozitif elektrota doğru hareket eder. Saf suyun elektrik direnci oldukça yüksektir (100 ohm/cm). Bu direnci düşürmek için; suyun sıcaklığını 700–1000 °C'ye çıkarılmalı veya da suyun içine tuz gibi iletkenliği artırıcı kimyasallar eklenir. Böylece suyun iletkenliği ve dolayısıyla yöntemin verimliliğini artırırlar (Yumurtacı, Bekiroğlu ve Akaryıldız, 2002). Suyun elektrolizi için, 25 °C sıcaklık ve 1 atm basınçta gerekli gerilim 1,24 voltur. Bir mol suyun elektrolizi için gerekli en düşük enerji miktarı 65,3 watt-saat ve 1 m<sup>3</sup> hidrojen üretmek için gerekli en düşük enerji miktarı 4,8 kWh'tır. Buna göre elektroliz işleminin verimi % 70 dolayında olmaktadır. Ancak, son yıllarda bu alanda yapılan çalışmalar ve gelişen teknoloji sayesinde % 90 verim elde edilmiştir. Pratikte kullanılan elektroliz hücrelerinde, nikel kaplı çelik elektrotlar en iyi sonuçları vermektedir.

### **2.2.3. Buhar Elektrolizi Yöntemiyle Hidrojen Üretimi**

Geleneksel elektroliz yönteminin bir çeşitlemesidir. Bu yöntemde, suyun ayrıştırılması için gerekli enerjinin bir kısmı sisteme ısı enerjisi olarak verilerek verim yükseltilir. 2500 °C sıcaklıkta suyun içersindeki hidrojen ve oksijen serbest hale geçer. Buradaki problem sistemin çalıştığı yüksek sıcaklıkta hidrojen ve oksijenin yeniden birleşmesinin önlenmesidir. Bu yöntemde hidrojen üretimi tek basamak yerine birkaç basamakta gerçekleştirilir. Bu alanda yapılan çalışmalar sonucu gerekli sıcaklık 950 °C ye kadar indirilmiş, toplam verim ise %50 olarak elde edilmiştir.

### **2.2.4. Hidrojen Sülfür'den Hidrojen Üretimi**

Hidrojenin önemli rezervlerinden biri de hidrojen sülfür (H<sub>2</sub>S) içermesi nedeniyle Karadeniz'in dip sularıdır. Buradan hidrojen üretilmesi amacıyla şuan kapsamlı bir çalışma yoktur. Ancak bu sulardaki hidrojen sülfür varlığı ve potansiyeli konusunda çeşitli inceleme ve araştırmalar yapılmıştır. Karadeniz'in kirletilmesi sonucu yaklaşık 423000 km<sup>2</sup>'lik bir alan hidrojen sülfür ihtiva etmektedir. Bu alan oksijensiz olup canlı yaşamı da söz konusu değildir. Karadeniz dip sularının durgun olmasından dolayı, burada bulunan hidrojen sülfür kendiliğinden deniz yüzeyine çıkmamaktadır.

Karadeniz dip sularında bulunan hidrojen sülfür 150 metre derinlikten itibaren başlar ve dibe doğru lineer olarak artar. 1000 metre derinlikte 8 ml/litre deniz suyu, 2000 metrede 8.5 ml/litre deniz suyu ve tabana yakın kısımlarda 13.5 ml/litre deniz suyu oranlarıyla Karadeniz'in toplam 4857 milyar ton hidrojen sülfür ihtiva ettiği tahmin edilmektedir. Hidrojen sülfür potansiyeline bağlı olarak toplam hidrojen potansiyelinin en yüksek olduğu tabaka 1500–2000 metre derinlikler arasındadır. Hidrojen sülfürden hidrojenin ayrıştırılması da elektroliz yöntemiyle gerçekleştirilir. Fakat hidrojen sülfürün elektrolizinde kullanılan enerji suya göre 3.235 kat daha azdır. Yani suyun elektrolizi yöntemiyle hidrojen elde etmek için kullanılan enerji 0.065 kWh iken, hidrojen sülfürün elektrolizi ile hidrojen elde etmek için gerekli enerji 0.0203 kWh'tir (Midilli, Ay, Kale ve Veziroğlu, 2004).

### **2.2.5. Güneş Enerjisinden Hidrojen Üretimi**

Hidrojenin güneş enerjisi kullanılarak üretilmesi, hem çevre yönünden hem de ekonomik yönden büyük bir üstünlük sağlamaktadır. Fosil yakıtların yakın bir gelecekte tükeneyeceği gerçeği göz önüne alınarak son yıllarda yapılan çalışmalar güneş-hidrojen hibrit sistemi üzerinde yoğunlaşmıştır. Güneş-hidrojen sistemi son derece temiz ve güvenli bir enerji üretim yoludur. Çeşitli kirleticiler yönünden diğer kirleticilerle karşılaştırıldığında bu gerçek açık bir şekilde görülmektedir (Tablo 2.2).

**Tablo 2.2 Değişik Enerji Sistemlerinde Açığa Çıkan Kirlenici Miktarları Kg/Milyar Joule**

<b>Kirleniciler</b>	<b>Fosil Yakıt Sistemi</b>	<b>Kömür/Sentetik Yakıt Sistemleri</b>	<b>Güneş-Hidrojen Sistemi</b>
Karbondioksit (CO <sub>2</sub> )	72.40	100.00	0
Karbonmonoksit (CO)	0.80	0.65	0
Kükürtoksit (SO <sub>x</sub> )	0.38	0.50	0
Azot Oksitler (NO <sub>x</sub> )	0.34	0.32	0.10
Hidrokarbonlar	0.20	0.12	0
Partikül Maddeler	0.09	0.14	0

**Kaynak:** Ün, T.Ü. (2003). Hidrojen Enerjisi: Depolanması, Güvenliği, Çevresel Etkisi ve Dünyadaki Durumu. Mühendis ve Makine Dergisi Sayı:525

Güneş enerjisinden, ısı (termal) ve fotonsal olarak iki şekilde yararlanılır. Isıl işlemlerde, güneş enerjisi önce ısıya çevrilir ve ya bu ısı enerjisinden yararlanılır ya da mekaniksel veya elektriksel enerjiye dönüştürülür. Işık fotonları kullanılarak hidrojen elde etmek için fotokimyasal sistemler, güneş pili sistemleri veya foto biyolojik sistemlerden biri kullanılır (Koyunoğlu, Dindar ve İçli, 2004).

#### **2.2.5.1. Fotokimyasal Sistemler**

Bu tür yapılarda ışık soğurucu yarıiletken anot veya katodu, ya da her ikisi birden elektrokimyasal hücrenin içinde yer alabilir. Fujima ve Honda'nın 1972 yılında ilk olarak geliştirdiği ve titanyumdioksit elektrot kullanılan hücrede, hidrojen ve oksijen elde edilmesinden sonra, bu alanda büyük bir gelişme yaşanmıştır. Günümüzde fotokatotlu hücreler %13 verimle çalışmaktadır.

Bu yöntemde suyun elektrolizi için yüksek sıcaklık ve elektriğe gerek duyulmadan, doğrudan güneş enerjisinin morötesi (UV) bölgesi kullanılmaktadır. Hidrojen üretmek için iki elektrokimyasal sistem kullanılır. Bunlardan birisi katalizör olarak çözünebilir metal bileşikleri kullanırken diğeri yarı iletken yüzeylerinden faydalanır. Çözünebilir metal bileşiğinin çözülmesi sırasında bileşik, güneş enerjisini soğurarak bir elektrik şarjı oluşturur ve su moleküllerinin parçalanmasını sağlar. Bu yöntem fotosentez olayını taklit etmektedir. Diğeri yöntemde ise yarı iletken elektrotlar bir fotokimyasal pil içerisinde optik enerjiyi kimyasal enerjiye çevirirler. Yarı iletken yüzeyi iki amaca birden hizmet eder, bir taraftan güneş enerjisini soğururken diğeri taraftan elektrot olarak çalışır. Bu yöntem, herhangi bir oynar parça veya makine kullanımı gerektirmediğinden, diğeri yöntemlere göre ucuzdur ve verimi yüksektir.



### **2.2.5.2. Güneş Pili Sistemleri**

Güneş pilleri, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken sistemlerdir. Paneller birden çok fotovoltajik hücreden meydana gelir. Bu sistemlerde hidrojenin güneş enerjisi ile üretimi iki basamaklı olarak gerçekleştirilir. İlk basamakta, güneş pilleri aracılığıyla doğru akım elde edilir. Daha sonra ikinci basamak olarak bu akım ile suyun elektrolizi gerçekleştirilir. Burada güneş pillerinin verimi ortalama %15, elektroliz hücresi verimi %75 den daha büyük alınabilir. Dünyanın 2/3'nün sularla kaplı olduğu ve her gün dünya üzerine düşen güneş enerjisinin bir yılda kullanılan enerjiden daha büyük olduğu düşünüldüğünde, ortaya çıkan potansiyelin boyutu gelecek için umut verici olmaktadır.

### **2.2.5.3. Foto Biyolojik Sistemler**

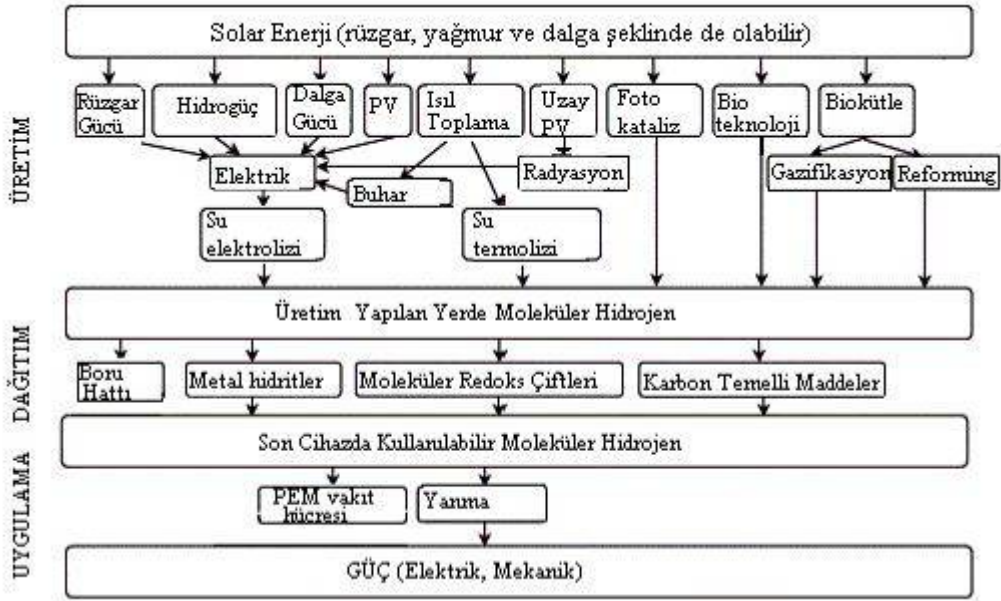
Foto sentetik organizmalar, güneş enerjisini bütün dünyada çok büyük miktarlarda depolayan bir enerji depolama mekanizması oluşturmaktadır. Normal olarak fotosentetik sistemler karbondioksiti karbonhidratlara indirger, fakat doğrudan hidrojen vermezler. Foto sentetik bakteriler, foto fermentasyon sonunda uygun organik bileşikler ortama verildiğinde ve oksijensiz ortamda büyütüldüklerinde hidrojen üretebilmektedirler (Koyunoğlu, Dindar ve İçli, 2004). Bugüne kadar hidrojen üretebilen en verimli foto biyolojik sistemlerin, yeşil alg ve cyanor-bakteria gibi algler olduğu anlaşılmıştır. Yeşil alglerin havasız ortamda inkübasyonu sonucu hidrojen ürettiği saptanmış ve verimleri %10 olmuştur.

## **2.3. Hidrojenin Taşınması**

Hidrojen gazı, doğal gaz veya hava gazına benzer olarak borular aracılığıyla her yere kolaylıkla ve güvenli olarak taşınabilmektedir. Doğal gaz için kullanılan yeraltı boru dağıtım ağının ileride çok az bir değişikliklikle hidrojen içinde kullanılması olanaklıdır. Bunun için ölçü cihazlarının ve kompresörlerin değişmesi ve basıncın artırılması yeterli olacaktır. Boru hatları dışında hidrojen, basınçlı gaz olarak veya sıvılaştırılarak tüplere konup tankerlerle taşınabilir.

Hidrojen boru ile taşınmasına, Texas'da petrol sanayi tarafından kullanılmakta olan ve 80 km uzunluğuna sahip boru şebekesi ile Almanya'da Ruhr havzasında 1938 yılında işletmeye açılan ve bugün 15 atmosfer basınç altında hidrojen taşımaya devam eden 204 km'lik boru hattı örnek olarak gösterilebilir. Basınçlı hidrojenin, çelik tüpler içine yerleştirilerek taşınması, bu güne kadar geliştiren birçok deneme amaçlı hidrojenle çalışan taşıtta kullanılan yöntem olmuştur. Burada görülen en büyük sorun çelik tüplerin kendi ağırlıklarıdır. Benzinli bir otomobil ortalama olarak 65 litre (47 kg) benzin almakta olup, bu da enerji olarak 17 kg hidrojene karşılık gelmektedir. Hidrojeni sıvı olarak depolamak ağırlık sorununu çözmekle birlikte, tank hacmi ve maliyet artmaktadır (EİE, 2005a).

Hidrojenin hidritlerle taşınması da günümüzde önemle ele alınmaktadır. Hidritleşme, hidrojenin bir organik molekülle depolanması demektir. Geliştirilen hidritler; titanyum alaşımları (özellikle demir-titanyum), paladyum alaşımları, zirkonyum alaşımları, magnezyum nikel alaşımları gibi materyallerle oluşturulmaktadır. Düşük sıcaklık ve yüksek sıcaklık hidritleri vardır. Demir-titanyum alaşımı düşük sıcaklık hidriti iken, magnezyum-nikel alaşımı yüksek sıcaklık hidritidir. Düşük ve yüksek sıcaklık hidritlerinin kombinasyonu da kullanılmaktadır. Metal hidritler paket olarak taşınmaya uygundur (TÜSİAD, 1998). Şekil 2.2’de hidrojenin üretimi ve taşınması yöntemleri birlikte gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Hidrojenin Üretim ve Dağıtım Zinciri

#### 2.4. Hidrojenin Depolanması

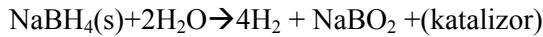
Hidrojenin depolanabilir olması en önemli özelliklerinden biridir. Gerek sabit gerekse taşınabilir uygulamalar için hidrojenin etkin ve güvenilir tarzda depolanabilmesi gereklidir. Taşınabilir uygulamalarda ilave olarak depolamada hafiflik önem kazanmaktadır. Hidrojen gaz veya sıvı olarak saf halde tanklarda depolanabileceği gibi, fiziksel olarak nanotüplerde veya kimyasal olarak hidrür şeklinde depolanabilmektedir. Hidrür şeklinde depolama; katı halde metallerde ve alanatlarda olabileceği gibi, sodyum bor bileşiğinde olduğu gibi sıvı halde de olabilmektedir (Güvendiren ve Öztürk, 2003).

Hidrojen karbon nanotüplerde depolanabilmektedir. Karbon nanotüpler kısaca grafit tabakaların tüp şekline dönüşmüş halidir. Çapları birkaç nanometre veya 10–20 nanometre mertebesinde, boyları ise mikron civarındadır. Nanotüpler tek duvarlı olarak üretilebileceği gibi çok-duvarlı tüplerde üretilebilmektedir. Çeşitli ilavelerle oluşturulan, örneğin alkali-ilaveli (Li-

K), nanotüpler de mevcuttur. Hidrojen, nanotüplerde iki şekilde depolanabilmektedir. Birinci yöntemde zayıf “van der waals” etkileşimi sonucu oluşan (fiziksel) depolama ile depolanan hidrojen geri alınabilmekte ve sisteme tekrar aynı miktarda hidrojen yüklenebilmektedir. İkinci yöntemde ise kovalent bağların oluşumu ile (kimyasal olarak) depolanan hidrojen ise ancak çok yüksek sıcaklıklarda geri alınabileceği için faydalı kapasite dışındadır (Hirscher ve diğerleri, 2002).

Orta ve küçük ölçekte depolamak için en çok kullanılan yöntem, sıvılaştırılmış hidrojenin yüksek basınç altında çelik tüpler içinde tutulmasıdır. Ancak bu uygulama, büyük ölçekli depolama için pahalı bir yöntem olarak görülmektedir. Diğer bir pratik çözüm ise, sıvı hidrojeni düşük sıcaklıktaki tanklarda saklamaktır. Uzay programlarında, roket yakıtı olarak sürekli şekilde kullanılan sıvı hidrojen bu yöntemle depolanmaktadır. Dünyadaki en büyük sıvı hidrojen tankı Kennedy Uzay Merkezinde olup 3400 m<sup>3</sup> sıvı hidrojen alabilmektedir. Bu kadar sıvı hidrojenin yakıt olarak değeri 29 milyon MJ veya 8 milyon kWh'e karşılık gelmektedir.

Hidrojen kimyasal olarak metallerde, alaşımlarda ve arametallerde hidrür olarak depolanabilmektedir. Metal hidrürler hidrojen depolamak için çok uygun bir yöntem olmasına karşın, kendi ağırlıkları ciddi sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle son 10 yıldır yüksek depolama kapasiteleri nedeniyle alüminyum ve bor içeren kompleks hidrürler yoğun olarak çalışılmaktadır. Bor içeren kompleks hidrürler sıvı koşullarda kullanılması nedeni ile de önem taşımaktadır. Bor esaslı sistemler ana olarak sodyum bor hidrürü (NaBH<sub>4</sub>) esas almaktadır. NaBH<sub>4</sub>, katı halde ağırlıkça %10,5 hidrojen içermektedir. Çözelti halinde, sodyum bor hidrür, aşağıdaki reaksiyona göre hidrojenini vermekte ve sodyum metaborata dönüşmektedir.



H<sub>2</sub>O ve NaOH ilavesi ile sodyum bor hidrürün sıvı içerisindeki miktarı ağırlıkça %20–35 arasında olabilmekte, bu da sistemde ağırlıkça %4.4–%7.7 arasında hidrojenin depolanmasına olanak vermektedir. Sodyum bor hidrürde hidrojen depolamanın en önemli üstünlüğü depolanan hidrojenin oda sıcaklığında geri alınabilmesi ve geri alımın katalizör yardımı ile kolaylıkla kontrol edilebilmesidir. Sodyum bor hidrürün hidrojen amaçlı kullanımında en önemli darboğaz, oluşan metaboratın tekrar NaBH<sub>4</sub> dönüştürülmesidir.

Hidrojenin dağıtım sisteminde depolanması gaz şekilde de olabilir. Gaz hidrojen depolanması genellikle doğal gazın tükendiği yeraltı mağaralarında ya da petrolü bitmiş petrol kuyularında yapılmaktadır. Hidrojenin diğer gazlara göre sızma özelliği daha çok olmasına karşın bu teknik ile depolamada sızıntı problem oluşturmamaktadır. Bu teknik ile depolamaya örnek şehir gazının (hidrojen içeren karışım) mağarada başarı ile depolandığı Fransa verilebilir. Ayrıca, hidrojenden daha fazla sızma eğilimli olan helyum gazı Teksas, Amarillo yakınında

tükenmiş doğal gaz mağarasında depolanmaktadır. Bu teknikte gazın mağara içerisine ve sonra da mağaradan dışarıya pompalanması için kullanılan enerji önem taşımaktadır (Ün, 2003b).

## **2.5. Hidrojen Kullanımında Güvenlik**

Hidrojen diğer yakıtlardan farklı güvenlik donanımı ve prosedürü gerektirse de onlardan daha fazla tehlikeli değildir. Dünyada hidrojen zaten petrol ve kimya endüstrisinde veya başka yerlerde güvenle kullanılmaktadır. Hidrojenin fiziksel özelliklerinden dolayı güvenlik karakteri diğer yakıtlardan oldukça farklıdır. Hidrojen düşük yoğunluklu olduğundan bir kaçak anında yer seviyesinde birikinti halinde kalmayarak atmosferde yükselir ve dağılır. Bu durumda iyi havalandırma uygulanarak güvenlik artırılabilir. Düşük yoğunluklu olması demek aynı zamanda belirli bir hacimde patlayan diğer yakıtlardan daha az enerji verecek demektir. Ayrıca hidrojen diğer yakıtlardan daha hızlı yayılır, böylece tehlike seviyesi de azalmış olur.

Hidrojen, benzin, propan veya doğal gazdan daha hafiftir. Benzin veya doğal gaz ile karşılaştırıldığında hidrojenin patlama yapması için havada daha yüksek derişimde bulunması gerekir. Patlama için yakıt/hava oranı hidrojen için %13 - %18'dir ve bu oran doğal gazın sahip olduğu orandan 2 kat, benzinin sahip olduğundan 12 kat büyüktür. Yakıtlar içerisinde hidrojen birim depolanan enerji başına en düşük patlama enerjisine sahiptir. Belirli bir hacimdeki hidrojen aynı hacimdeki benzin buharından 22 kat daha az patlama enerjisine sahiptir.

Hidrojenin yanması için havada hacimce %4 - %75 arasında olması gerekir. Bu aralık diğer yakıtlarda düşüktür. Örneğin doğal gaz için %5.3 - %15, propan için %2.1 - %10 ve benzin için %1 - %7.8'dir. Herhangi bir kaçak anında hidrojenin en düşük tutuşma sınırı benzininkinden 4 kat, propaninkinden 1.9 kat ve doğalgazinkinden de çok az büyüktür. Böylece hidrojenin geniş bir derişim aralığında düşük tutuşma sıcaklığı ve tutuşturuculuğu özellikle garaj gibi kapalı mekânlarda yangın tehlikesini azaltır. Hidrojen temiz ve kokusuz olduğu için sızıntısı benzin veya diğer yakıtlara göre daha az fark edilecektir. Hatta yanan hidrojenin alevi görülmez. Ancak sızıntı belirleme teknikleri vardır ve öncelikle de araştırılmaktadır. Ayrıca doğal gaza uygulandığı gibi kokulu bir maddenin veya renklendiricinin veya her ikisinin hidrojene eklenmesi yapılabilir. Ancak yapılacak herhangi bir ekleme saf hidrojenin çevresel açıdan temizliğini bozar (Ün, 2003b).

**Tablo 2.3 Yakıtların Güvenilirliğinin Kıyaslanması**

Özellik	Yakıt Güvenirliği		
	Benzin	Metan	Hidrojen
Yakıtın Zehirliliği	3	2	1
Yanma Zehirliliği	3	2	2
Yoğunluk	3	2	1
Difüzyon Katsayısı	3	2	1
Özgül Isı	3	2	1
Tutuşma Limiti	1	2	3
Tutuşma Enerjisi	2	1	3
Tutuşma Sıcaklığı	3	2	1
Yanma Sıcaklığı	3	1	2
Patlama Enerjisi	3	2	1
Yanma Yayılımı	3	2	1
Toplam	30	20	16
Güvenlik faktörü	0.53	0.80	1.00

**Kaynak:** Türk Sanayicileri ve İş Adamları Derneği, (1998). 21. Yüzyıla Girenken Türkiye'nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi. 209, İstanbul: Lebib Yalkın Yayınları.

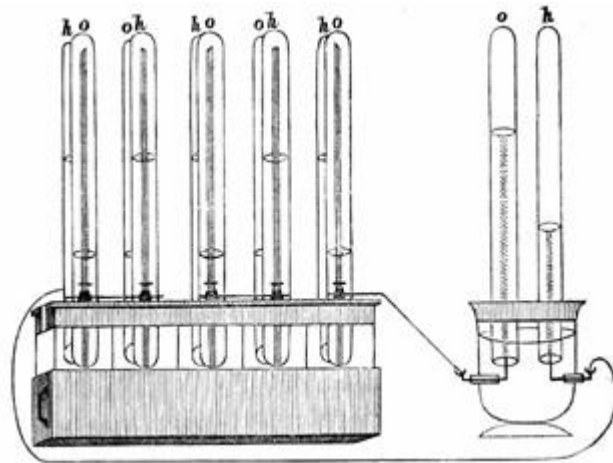
Tablo 2.2 de yakıtların güvenilirliğini kıyaslamaktadır. Her toksit eleman ve yanma zararı karakteristikleri için yakıtları 1'den 3'e kadar derecelendirmiştir. 1. en güvenli, 3. en güvensizdir. Bu dereceler toplam derecelendirme bulmak için, her yakıt için toplanmıştır. Toplam dereceler, hidrojenin toplam derecesini verilen yakıtın derecesine bölme ile tanımlanan güvenlik faktörünü çıkartmak için yapılmıştır. Buradan hidrojenin en güvenli, benzinin en güvensiz ve metanın bu ikisi arasında olduğu görülebilir (Veziroğlu, 2003).

### 3. YAKIT PİLLERİ

#### 3.1. Yakıt Pillerinin Tarihçesi

Yakıt pilleri ilk defa 19. yüzyılın sonunda geliştirilmiştir. İlk pratik yakıt pili Apollo uzay programı için 1960'lerde yapılmıştır. Günümüzde de hala uzay projelerinde yakıt pillerinin kullanımı devam etmektedir.

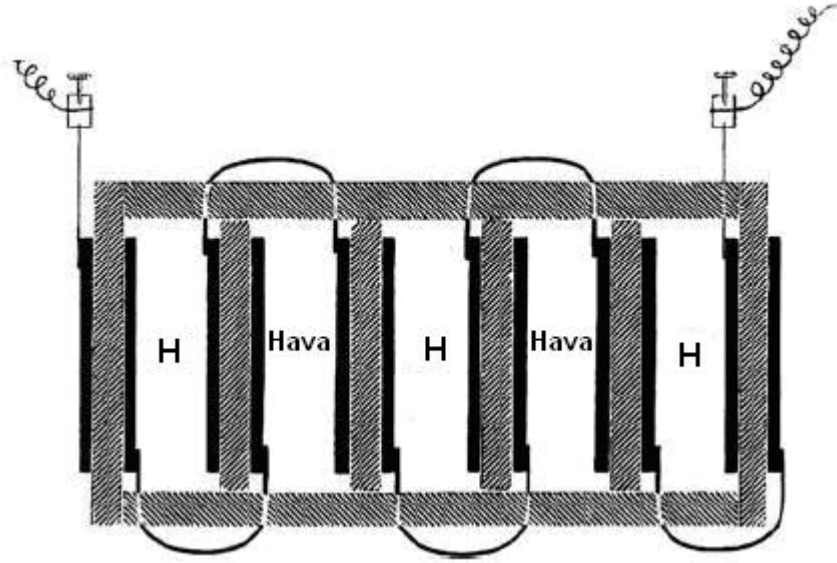
1838 yılında William Robert Grove (yakıt hücrelerinin babası olarak bilinir) yakıt hücrelerinin temel çalışma prensibi olan su elektrolizinin tersine çevrilmesiyle hidrojen ve oksijenden elektrik enerjisi üretmeyi başarmıştır. Grove hücresi olarak adlandırılan hücre, çinko sülfat içerisinde çinko elektrot ve nitrik asit içerisinde platin elektrot daldırılarak oluşturulmuş ve yaklaşık 1.8 volt civarında gerilim ve 12 amperlik akım üretmiştir. Grove, elektrotlardan biri sülfürik asit kabına diğeri oksijen ve hidrojen kabına daldırılan iki platin elektrotu düzenleyerek, elektrotlar arasında sabit bir akım akacağını keşfetmiştir. Sızdırmazlığı sağlanan kaplar hem suyu hem de gazları tutmuşlardır. Grove, akım aktığı sürece, su seviyesinin her iki tüpte de arttığını belirlemiştir. 1800'de, İngiliz bilim adamları Willam Nicolas ve Anthony Carlisle, elektrik yardımıyla suyun hidrojen ve oksijene ayrılabilceğini ispatlamışlardır. Fakat iki gazın birleştirip su ve elektrik üretilabileceğini çözememişlerdir. Grove, birkaç elektrotu seri devreyle bağlayarak bileşimini ayarlamak suretiyle suyun ayrıştırılmasını etkileyebileceğini keşfetmiştir. Bunu gaz bataryası adını verdiği ve ilk yakıt pili olarak tanımlayabileceğimiz Şekil 3.1 de gösterilen aygıtla başarmıştır (Bıyıkoglu, 2003).



Şekil 3.1 William Robert Grove Tarafından Geliştirilen Yakıt Hücresi

Grove'den sonra birçok bilim adamı yakıt pili gelişimi için çaba harcamıştır. 1882 yılında Lord Rayleigh tarafından platin elektrotların verimini arttırmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bunun için katı elektrot, gaz ve sıvı arasındaki işlem yüzeyini arttırmış hidrojenin

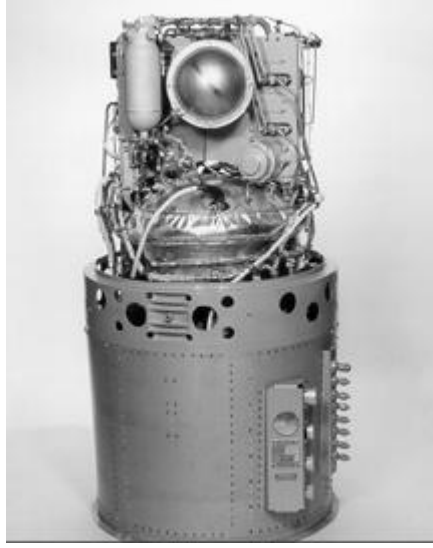
yanı sıra kömür gazı da kullanmıştır. 1889'da kimyager Ludwing Mond ve Carl Langer tarafından Grove'un çalışmaları tekrarlanarak; oksijen kaynağı olarak havayı, hidrojen kaynağı olarak da endüstriyel kömür gazını kullanarak 1.5 watt güç üreten ve %50 verimle çalışan bir yakıt pili geliştirilmiştir. Yakıt pilinden 1.47 volt gerilim elde edilmesi beklenmiş ancak bu değer 0.97 volt olarak ölçülmüştür. Şekil 3.2'de Mond ve Langer'in tasarladığı yakıt pili görülmektedir.



**Şekil 3.2 Mond ve Langer'in Tasarladığı Yakıt Pili**

1894'de Wilhwm Oswalt kömür türevli yakıtlar ile çalışan bir elektrokimyasal pil yapmıştır. 1932'de Francis T. Bacon ilk başarılı yakıt pilini geliştirmiştir. Bu yakıt pilinde hidrojen-oksijen hücre ve alkalın elektrolit kullanılmıştır. Bu projenin önemini kavrayan Partt&Whitney şirketi bu projeye lisans vererek NASA programlarında kullanılmasını sağlamıştır. 1959'da Bacon ve arkadaşları 5 kW'lık güç üreten bir yakıt pili yapmışlardır. Aynı yılın sonunda Harry Karl Ihring 20 beygir (yaklaşık 15 kW) gücünde yakıt piliyle çalışan traktör tasarlamıştır. Bu buluş günümüzdeki modern yakıt piliyle çalışan makinelerin başlangıcı olmuştur (Bıyıkoglu, 2003).

1950 yılı sonları ve 1960'lı yıllarda NASA yakıt hücresi teknolojisine oldukça ciddi yatırımlar yapmıştır. Yakıt hücreleri hafif olmaları ve yan ürün olarak su üretmelerinden dolayı uzay uygulamaları için düşünölmeye başlanmıştır. Uzay çalışmalarında yakıt hücrelerinin kullanılması; yüksek verim, düşük gürültü ve titreme, yüksek enerji yoğunluğu gibi avantajlar sağlamaktadır. İlk olarak Gemini uzay aracında General Elektrik tarafından üretilen proton değişim zarlı yakıt hücresi kullanılmıştır. Şekil 3.3 de NASA çalışmalarında kullanılan Gemini uzay aracında kullanılan proton değişim zarlı yakıt hücresi görölmektedir.



**Şekil 3.3 Gemini Uzay Aracında Kullanılan Proton Değişim Zarlı Yakıt Pili**

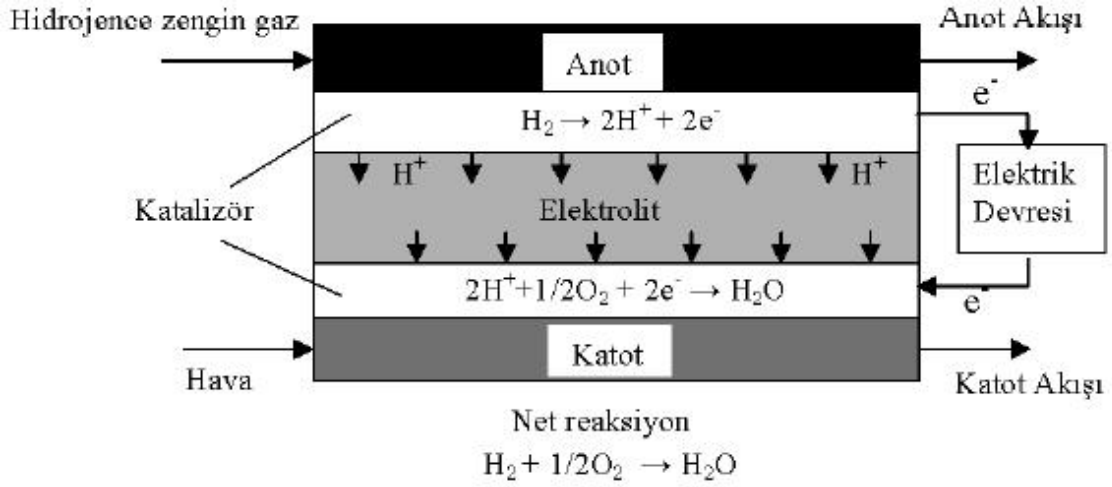
1970’li yıllarda General Motor “Elektrovan” adlı yakıt hücresiyle çalışan bir araç geliştirmiştir. 1970’li yıllarda devlet destekli yakıt hücresi araştırmaları başlamış ve bu amaçla Los Alamos Ulusal Laboratuvarı ve Brookhaven Ulusal Laboratuvarları kurulmuştur. Son birkaç on yılda, büyük otomobil üreticileri ve federal ajanslar yakıt hücreli otomobiller ve diğer uygulamalarda kullanılmak üzere yakıt hücresi teknolojilerinde gelişmeye destekleri devam etmiştir. Şimdilerde ise gelecek için yakıt hücrelerinin geleneksel güç kaynaklarının yerinin alması beklenmektedir. Cep telefonlarında kullanılabilecek mikro yakıt hücrelerinden motor sporlarında kullanılabilecek büyük güçlü yığın yakıt hücrelerine kadar geniş çaplı çalışmalar sürmektedir.

### **3.2. Yakıt Pili Çalışma Prensibi**

Yakıt pilleri prensip olarak akümülatör veya pile benzerdir. Her ikisi de kimyasal enerjiyi doğrudan elektriğe çevirir. Aralarındaki en büyük fark; akümülatörde, kimyasal enerji kullanımından önce depolanmış durumdadır, yakıt hücresinde ise dış kaynaklardan enerji sağlandığı sürece elektrik üretebilir. Yakıt pillerinin çalışma prensibi, elektroliz olayının tersi bir kimyasal reaksiyondur. Elektroliz reaksiyonunda suya doğru akım uygulandığında, oransal hacimlerde oksijen ve hidrojene ayrılmaktadır. Elektrik enerjisi uygulandığında su bileşenlerine ayrıştığına göre, mantıksal olarak işlemin ters yönde düzenlenmesi halinde, yani oksijen ve hidrojenin reaksiyonu sonucunda su ve ısı elde edilirken, elektrik enerjisi alınmaktadır. Yakıt pilinde saf hidrojen yerine, kendisinden hidrojen elde edilen hidrokarbonlar da kullanılabilir.



Fakat verimi düşürdüğü için tercih edilmemektedir. Şekil 3.4 de yakıt pili çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 3.4 Yakıt Pili Çalışma Prensibi

Yakıt pilinde anottaki hidrojenin katalitik oksidasyonu ve katottaki oksijenin indirgenmesi elektrotlar arasında potansiyel fark yaratır. Eğer elektrotlar arasında yalıtım sağlayan elektrolit, iyonik kütle ve şarj aktarımına izin verirse, bu potansiyel farkı dış bir devrede kullanılabilir. Eğer kullanılırsa, ürün olarak su elde edilir ve bu reaksiyonun kimyasal enerjisi, kutuplaşma ve direnç kayıpları dolayısıyla, elektrik ve ısı olarak serbest bırakılır. Yakıt pilinin iki elektrotu arasına dış devreden bağlanan iletkenle, oluşan elektrik pilden alınır. İletkenden geçen elektronların yarattığı elektrik enerjisi DC karakterlidir. Sonuç olarak sadece toplam verim değil elektriksel verim de yüksek olabilir. Yakıt pillerinde yakıt olarak hidrojen gazı, doğal gaz, metanol veya etanol, oksidan olarak oksijen gazı veya hava kullanılabilir. Eğer hidrojen ve oksijen gazları yakıt-oksidan çiftini oluşturursa, yan ürün olarak saf su elde edilir. Yakıt pillerinde, hidrojen içeren herhangi bir gaz karışımından üretilen yakıt kullanılabilir. Yakıt pillerinin hareketli kısımlarının olmayışı, gürültü ve titreşim seviyelerinin çok düşük olmasının yanı sıra güvenilirliğini artırmış ve ürün maliyetini azaltmıştır (Bıyıkoğlu, 2003).

Yakıt pili hücrelerden meydana gelmiştir. Her bir hücre de anot, katot olmak üzere iki elektrot ve elektrolitten oluşur. Anot elektrotuna yakıt elektrotu ve katot elektrotuna oksijen elektrotu da denilmektedir. Bir hücre 0.6 volt gerilim üretir. Gerilim değeri arttırılmak istendiğinde hücreler seri bağlanır. Örneğin 10 tane hücre seri bağlanarak 6 voltluk gerilim değeri elde edilebilir. Ayrıcı hücrenin üretebileceği akımda alanıyla alakalı olup her 1 cm<sup>2</sup> yakıt hücresi 0.5 amper akım üretir. Yine aynı şekilde akım değeri de arttırılmak istenirse hücrenin yüzey alanı arttırılır.

### 3.3. Yakıt Pili Çeşitleri

Yakıt pilleri uygulamada, çalışma sıcaklığı, elektrolit tipi ve yakıt tipine göre çeşitli isimler alır. Yakıt pilinin çalışma sıcaklığı 150 °C 'den düşükse, "düşük sıcaklık yakıt pili", 500–1000 °C arasında ise "yüksek sıcaklık yakıt pili" olarak adlandırılmaktadır. Düşük sıcaklık yakıt pillerinin hidrojen gibi basit yakıt ve platin gibi iyi ve pahalı katalizör gerektirmelerine karşı, yüksek sıcaklık yakıt pilleri hidrokarbon yakıt ve daha ucuz katalizör kullanabilme potansiyeline sahiptir. Yakıt hücrelerinin her ne kadar çalışma prensipleri benzer olsa da, çalışma koşulları ve uygulama alanları farklılık gösterirler. Yakıt pilleri bünyelerinde kullanılan elektrolit çeşidine göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılır.

- Proton değişim zarlı yakıt pilleri (Proton Exchange Membrane Fuel Cells, PEMFC)
- Doğrudan metanol kullanan yakıt pilleri (Direct Methanol Fuel Cells, DMFC)
- Alkali yakıt pilleri (Alkaline Fuel Cells, AFC)
- Fosforik asitli yakıt pilleri (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC)
- Erimiş karbonat yakıt pilleri (Molten Carbonate Fuel Cells, MCFC)
- Katı oksit yakıt pilleri (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC)

Yakıt pillerinin çalışma sıcaklığı ve çalışma ömürleri, pilin yapısında kullanılan malzemelerin fiziko-kimyasal ve termo-mekaniksel özelliklerine bağlıdır. Çalışma sıcaklığı aynı zamanda yakıt pilinde kullanılacak yakıt açısından da önemli rol oynar. Ayrıca kullanılan yakıtı göre de reaksiyon hızını arttıracak katalizör seçilir. Düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pillerinde kimyasal reaksiyon çok yavaş olur. Reaksiyonu hızlandırmak ve pil verimini arttırmak için katalizör olarak, çok pahalı olan platin kullanılır. Bu da pil maliyetini arttırmaktadır. Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri için bu durum söz konusu değildir. Pil çalışma sıcaklığı reaksiyonu hızlandırmak için yeterlidir. Yüksek sıcaklıkta çalışan pillerde katalizör olarak daha ucuz malzemeler kullanılabilir. Tablo 3.1'de yakıt pilleri çalışma sıcaklıklarına göre sıralanmıştır. Doğrudan metanol kullanan yakıt pillerinin özellikleri, proton değişim zarlı yakıt pilleriyle aynı olduğu için tabloda ayrıca yer verilmemiştir.

**Tablo 3.1 Yakıt Pili Çeşitleri ve Özellikleri**

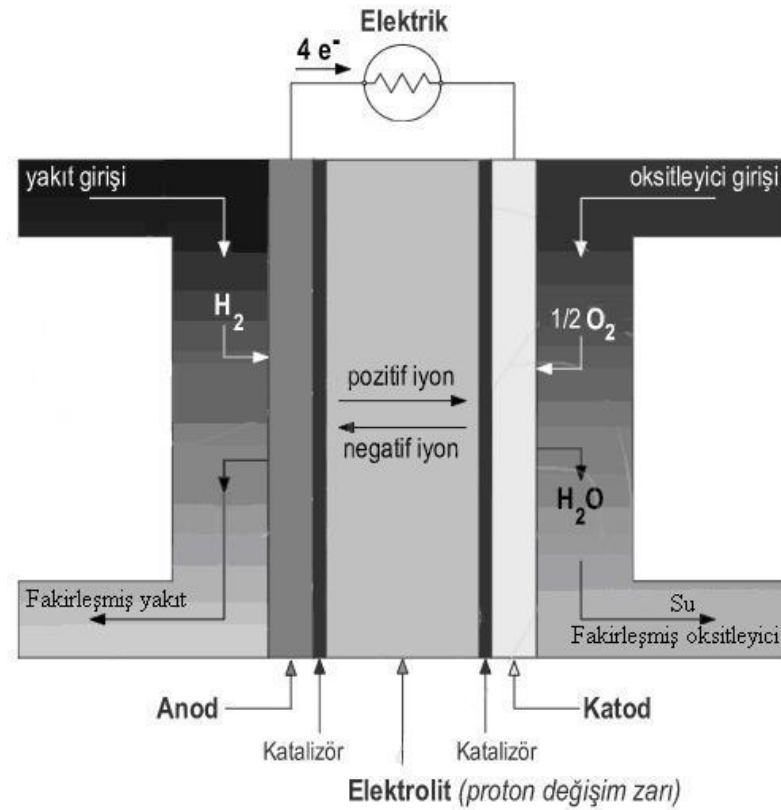
<b>Yakıt Pilleri</b>	<b>Proton Değişim zarlı Yakıt Pili</b>	<b>Alkali Yakıt Pili</b>	<b>Fosforik Asit Yakıt Pili</b>	<b>Erimiş Karbon Yakıt Pili</b>	<b>Katı Oksit Yakıt Pili</b>
Özellikler					
Kullanılan Elektrolit	Polimer iyon değişim zarı	Potasyum hidroksit (KOH)	Fosforik Asit	Karbonat	Zirkonyum
Elektrolitteki Taşıyıcı	H <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	O <sub>2</sub> <sup>-2</sup>
Sıcaklık	80–100 °C	80 °C	200 °C	600–700 °C	1000 °C
Verimleri	% 45	% 40–80	% 37–42	% 45–60	% 60–70
Güç Yoğunluğu (W/kg)	350–1500	35–105	120–180	30–40	15–20
Yakıt Türü	Hidrojen (H <sub>2</sub> ), Hidrokarbonlar	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , Hidrokarbonlar	H <sub>2</sub> , Hidrokarbonlar	H <sub>2</sub> , Hidrokarbonlar
Pil Materyali	Karbon Tabanlı	Karbon Tabanlı	Grafit Tabanlı	Nikel, çelik	Seramik
Kullanılan Katalizör	Platin	Platin	Platin	Nikel	Perovskites
Uygulama Alanları	Ulaşım araçları Askeri Sistemler	Uzay Çalışmaları	Ticari uygulamalar (Oteller, Hastaneler)	Elektrik Santralleri	Ticari ve Sanayi alanda Elektrik Santralleri

**Kaynak:** EİE, (2005b). Yakıt Pili Çeşitleri ve Özellikleri Tablosu. İnternette 16.12.2005 tarihinde indirilmiştir: [http://www.eie.gov.tr/hidrojen/yakit\\_pilleri.html](http://www.eie.gov.tr/hidrojen/yakit_pilleri.html)

### 3.3.1. Proton Değişim Zarlı Yakıt Pili (PEMFC)

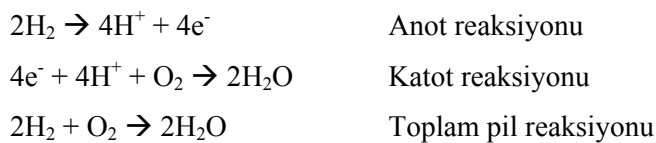
Elektrolit olarak polimer madde kullanıldığı için bu pillere “polimer elektrolit yakıt pili” de denmektedir. Yakıt olarak hidrojen, oksitleyici olarak da havanın oksijenini kullanır. Elektrotlar karbon yapılıdır. PEM yakıt pillerinde ince, geçirgen bir polimer elektrolit kullanılır. Polimer zar küçük ve hafiftir. Bu zara geçirgen zar da denmektedir. Bu tip yakıt pilleri 80 °C sıcaklıklarda çalışabilir Şekil (3.5)

Hidrojen atomları pilin anot tarafına verilir ve burada iyonize olurlar. Pozitif yüklü protonlar geçirgen zardan geçerek katoda yönelirler. Elektronlar, anottan katoda harici bir yoldan ilerleyerek elektrik enerjisinin ortaya çıkmasını sağlarlar. Katotta elektronlar, hidrojen protonları ve havadan alınan oksijen birleşerek su meydana getirir. Bu tip yakıt pilinin çalışması için polimer zar hidrojen protonlarının geçmesine izin verirken elektronların ve daha başka ağır gazların geçişini engellemelidir. Anot ve katot elektrotları bir kenarından ince platin tabakası ile örtülmüştür. Pil yaklaşık 80 °C’de çalıştığından meydana gelecek kimyasal reaksiyonlar için yeterli bir sıcak ortam yoktur. Platin tabakalar katalizör etkisiyle reaksiyonları yeterli seviyeye çıkarırlar. Proton değişim zarlı yakıt pillerinde verim %40–50 civarındadır. Şu an dünyada 50 kW üniteler çalışmakta, 250 kW üniteler ise tasarım aşamasındadır (Kellegöz ve Özkan, 2004b).



**Şekil 3.5 Proton Değişim Zarlı Yakıt Pili**

Proton değişim zarlı yakıt pillerinin çalışması esnasından katot, anot ve pil de toplam meydana gelen kimyasal reaksiyon aşağıda verilmiştir. Toplam reaksiyonda görüldüğü gibi çıkış ürünü sadece sudur.



Proton değişim zarlı yakıt pillerinin en önemli elemanı proton iletim özelliğine sahip polimer zardır. Yakıt hücreleriyle ilgili yapılan çalışmaların başında polimer zarların geliştirilmesi yer almaktadır. Günümüzde ticari olarak kullanılan değişim zarlarının çeşitliliğinin az ve fiyatlarının yüksek olmasından dolayı alternatif değişim zarları geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar oldukça hızlanmıştır. Polimer zarların yüksek verimlilikte çalışabilmesi için su ile tamamen doyurulmuş olmaları gerekmektedir. Yapılan çalışmalarda zarın tam doygun olduğu zaman yüksek iyonik iletkenliğe ulaşıldığı görülmüştür (Altıntaş ve Donatan, 2003). PEM yakıt pilinde kullanılan zar yaklaşık 50 µm kalınlığındadır. Proton değişim zarının;

- Proton geçirgen özellikte olması,
- Su, yakıt (hidrojen veya metanol), oksijen ve havadaki diğer gazları geçirmemesi,
- Mekanik dayanımının yüksek olması,
- Uzun süreli kullanımda ısıl ve kimyasal direnci yüksek,
- Teknolojik olarak yaygın bir şekilde kullanılabilmesi için emniyetli ve ucuz olması gerekmektedir.

Proton değişim zarlı yakıt pilleri yüksek akım ve güç yoğunluğuna sahiptir. Üretim maliyetlerinin pahalı olması dezavantajdır. Ayrıca yan ürün olarak çıkan suyun idaresi de performans için kritik bir noktadır. PEM yakıt pilleri tüm yakıt pilleri arasında en fazla ilgi çeken ve en fazla ümit vaat eden tipidir. Günümüzde geliştirilen yakıt pilleri arasında PEM yakıt pilleri bu özellikleri nedeniyle en başta gelmektedir. Bu önemli potansiyelin en önemli nedeni seri üretime imkân vermesidir (Özdemir, 2002).

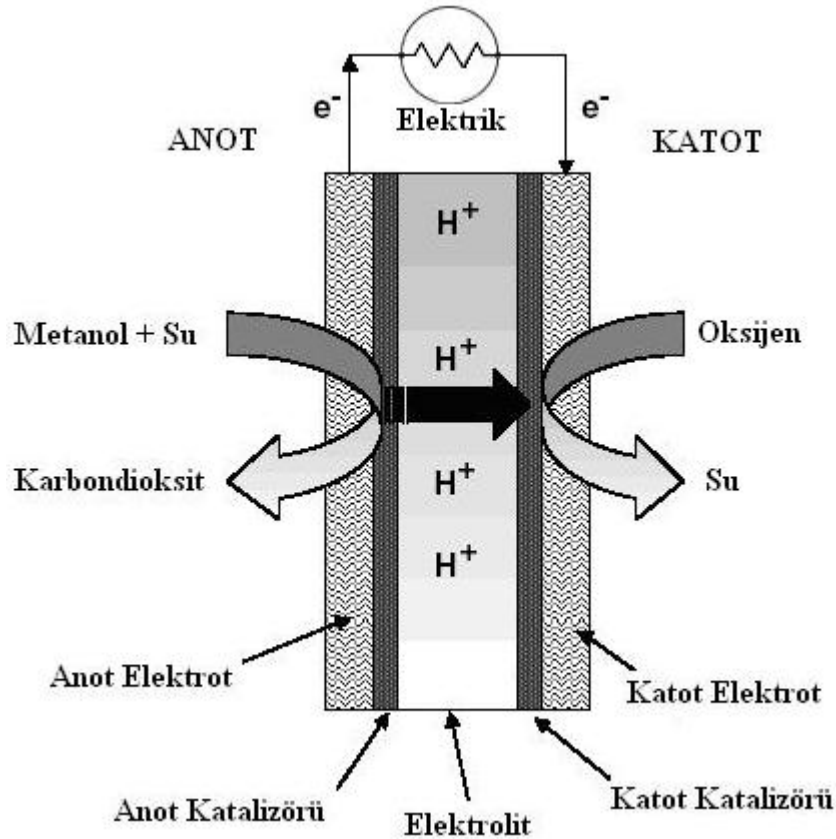
Proton değişim zarlı yakıt pilleri 1960'ların başında General Elektrik tarafından icat edilmiştir. Ünite su ve lityum hidrit karışımından elde edilen hidrojeni yakıt olarak kullanıyordu. Pil basit ve portatifti ama platin katalizörleri pahalı olmasından dolayı maliyet yüksekti. 1980 ve 1990'larda üreticiler pahalı platin katalizörlerin kullanımını azaltmanın yollarını aradı. Son olarak geçirgen polimer zarlı yakıt pili geliştiricileri elektroliti güçlendirmek için Gore-Tex maddesini kullanılarak maliyet düşürülmüştür.

Geçirgen polimer zarlı yakıt pilleri başlangıçta uzay araçlarında sıkça kullanılmıştır. Yakıt hücre verimlerinin, ulaşım sistemlerinde kullanılan mevcut sistemlerin veriminden 2.5–3 kat daha fazla olması ve ürün olarak kirletici içermemeleri yakıt hücrelerini ulaşım sektöründe cazip hale getirmiştir. Proton değişim zarlı yakıt pilleri, ulaşım sektöründe kullanılan küçük birimler için kullanılan en uygun yakıt pilidir. PEM yakıt pilleri uzay teknolojisinde ve uzay araçlarında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır (Bıyıkoğlu, 2003).

### 3.3.2. Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili (DMFC)

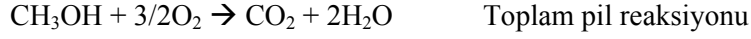
Doğrudan metanol kullanan yakıt pili, özellikleri ve çalışma prensipleri itibariyle proton değişim zarlı yakıt piline benzemektedir. Tek farklılık pilde yakıt olarak saf hidrojen değil de hidrojen elde edilebilen metanol kullanmasıdır.

Bu tip yakıt pillerinde elektrolit olarak, proton değişim zarlı yakıt pilindeki polimer zar kullanılmaktadır. Ancak doğrudan metanol kullanılan bu tip pillerde hidrojen doğrudan sıvı metanolden elde edilmekte, böylece yakıt yakarak hidrojen elde etme ünitesine gerek kalmamaktadır. Yakıt pilinde teorik olarak gerçekleşmesi beklenen reaksiyonlar şu şekildedir; katot üzerinde oluşan su ile sisteme doğrudan beslenen metanol-su karışımı anot üzerinde elektrokimyasal bir reaksiyon meydana getirerek metanolün parçalanması sonucu protonlar, elektronlar ve karbondioksit meydana gelmektedir. Oluşan protonlar diğer ürünlerden ayrılarak seçiciliğe sahip polimer elektrolit zarından geçerek katoda hareket etmektedir ve katot üzerinde beslenen havadan sağlanan oksijen ile reaksiyona girerek suyu oluşturmaktadır. Bu reaksiyonlar sonucu meydana gelen termodinamik potansiyeller, oluşturulan dış devre bağlantısıyla gerilim oluşmasını ve elektrik üretilmesini sağlamaktadır (Türker, İnan ve Trabulus, 2004).



Şekil 3.6 Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili

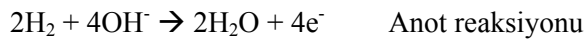
Doğrudan metanol kullanılan yakıt pilinin çalışması esnasında katot, anot ve pil de toplam meydana gelen kimyasal reaksiyon aşağıda verilmiştir.



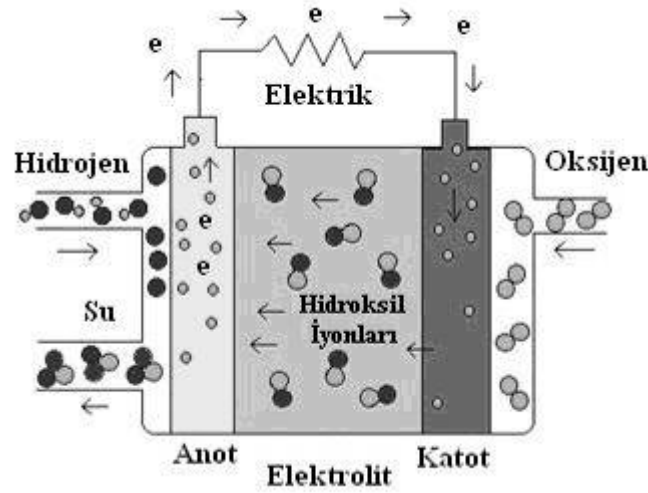
Toplam reaksiyonda görüldüğü gibi pil yan ürün olarak dışarıya karbondioksit ve su vermektedir. Bu pillerin verimleri %40 civarındadır ve çalışma sıcaklıkları 50–100 °C arasındadır. Metanolün (CH<sub>3</sub>OH) düşük sıcaklıkta karbondioksit ve hidrojene dönüşümü, PEM yakıt pillerinden farklı olarak, 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 imkân sağlaması ve reformlama ünitesi olmadan çalışabilir olmaları 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 hızla devam etmektedir (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu, 2002).

### 3.3.3. Alkali Yakıt Pilleri (AFC)

Bu tip yakıt hücrelerinde sulandırılmış sodyum hidroksit (NaOH) veya potasyum hidroksit (KOH) elektrolit olarak kullanılmaktadır. Yakıt olarak hidrojen, oksitleyici olarak da oksijen veya hava kullanılmaktadır. Bu tip yakıt hücrelerinin çalışma sıcaklığı 80 °C'dir. Çalışma basıncı normal atmosfer basıncıdır. Elektrotlar karbon ve nikel gibi metallere yapılmaktadır. Bu tipte yakıt pillerinde hidroksil iyonları (OH<sup>-</sup>) katottan anoda doğru ilerlerler. Anotta hidrojen gazı OH<sup>-</sup> iyonlarıyla reaksiyona girer ve su oluşurken elektronlar da açığa çıkar. Anotta açığa çıkan bu elektronlar harici bir devreye elektrik enerjisi sağladıktan sonra katoda dönerler. Burada elektronlar oksijen ve suyla reaksiyon gösterir ve böylece elektrolit içinde çözünen daha çok hidroksil iyonu üretilir. Bu hidroksil iyonları elektrolit üzerinden difüzyon vasıtasıyla tekrar anoda aktarılır ve reaksiyon devam eder (Şekil 3.7). Yakıt pilinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibidir.



Kimyasal reaksiyonlarda da görüldüğü gibi yakıt olarak saf hidrojen kullanıldığında katottan gelen hidroksil iyonları hidrojenle birleşip yan ürün olan saf suyu oluşturmaktadır. Alkali yakıt pilinde yan ürün olarak kirlenici çıkışı söz konusu değildir.



Şekil 3.7 Alkali Yakıt Pili

Alkali yakıt pillerinin verimi %70 civarındadır. Ürettikleri elektrik enerjisinin yanında kullanılabilir su da meydana getirdiklerinden uzay araçları için çok mantıklı seçim haline gelmişlerdir. Bu avantajlarının yanında, alkali yakıt pilleri çok saf halde hidrojene ihtiyaç duymaktadır. Aksi halde pil içerisinde istenmeyen kimyasal reaksiyonlar meydana gelmektedir. Elektrolit olarak kullanılan potasyum hidroksit (KOH) bazik özellik içermektedir. Karbondioksit de bazik ortamda kimyasal reaksiyona girerek karbonatı oluşturduğundan dolayı yakıt ve oksitleyici olarak kullanılan hava içinde CO<sub>2</sub> olmamalıdır. Aksi durumda çok az miktardaki karbondioksit bile, KHO ile reaksiyona girerek potasyum karbonat (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) oluşur ve bu da elektrolitin yapısını değiştirdiğinden pil çalışmaz duruma gelir. Yakıt pili teknolojisinde bu olaya CO<sub>2</sub> zehirlenmesi denilir.

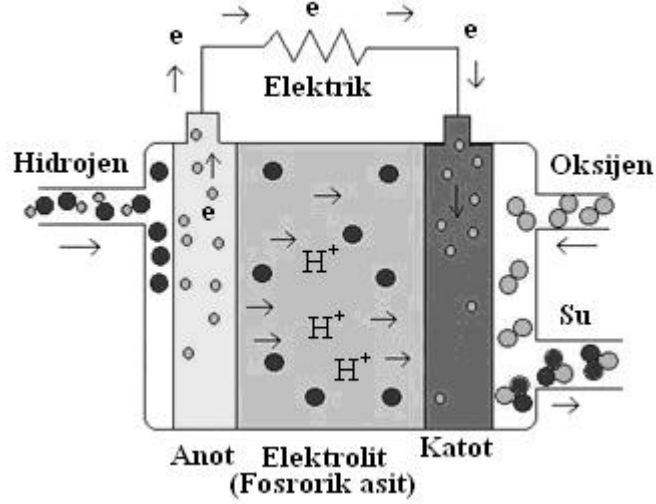
Alkali yakıt pilleri çalışma ömürlerinin uzun olduğundan, uzay araçlarındaki uygulamalarda ve NASA'nın diğer uygulamalarında en eski ve en çok kullanılan yakıt pili çeşididir. Bunun yanı sıra elektrikli araçlarda ve denizaltılarda da kullanılmaktadır. AFC'ler yüksek güç yoğunluğu ve soğukta çalışabilmesinden dolayı ulaştırma sektöründeki uygulamalarda avantajları olması yanında, saf H<sub>2</sub> depolama ve teminindeki zorluklar, CO<sub>2</sub>'e karşı çok hassas olmaları dezavantajlı yönlerini oluşturmaktadır. Kullanılan pahalı katalizörlerden, hidrojenin sıvılaştırılması ve sıkıştırılması için ekstra enerji tüketiminden ve saf hidrojenin pahalı olmasından dolayı pil maliyetini arttırmaktadır (Emekçi ve Ermiş, 2003).

Bu yakıt pilleri verimli bir şekilde en az 5000 saate kadar çalıştırılmışlardır. Bu çalışmalar 20 volt ya da altında olmuştur. Siemens 20 üniteden meydana gelen alkali yakıt pilini 8000 saatin üstünde test etmiştir. Ticari bir ürün şartını elde edebilmek için ise AFC'lerin 40000 saatin üstünde çalışabilmeleri istenmektedir.



### 3.3.4. Fosforik Asit Yakıt Pilleri (PAFC)

Adından da anlaşıldığı gibi elektrolit olarak fosforik asit ( $H_3PO_4$ ) kullanılmaktadır. Anot elektrotuna verilen yakıt proton ve elektronlarına ayrılır. Pozitif yüklü hidrojen iyonları elektrolitten geçerek anottan katoda ilerlerler. Anotta üretilen elektronlar ise harici bir yoldan devrelerini tamamlayarak elektrik enerjisi üretirler ve katoda dönerler. Burada elektronlar, hidrojen iyonları ve oksijen su meydana gelmesini sağlarlar (Şekil 3.8).

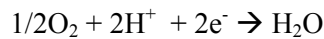


Şekil 3.8 Fosforik Asit Yakıt Pili

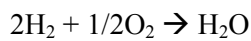
Pilde elektrolit olarak kullanılan fosforik asit kararlı bir asittir ve temel metallerle çok çabuk reaksiyona girer. Bunun sonucu olarak, sadece platin ve platin alaşımları katalizör olarak kullanılabilir. PAFC'lerin avantajı, doğal gaz veya kömür gazına dayanan yakıtların, elektrotu zehirlemeden kullanılabilmesidir. Bu hücreler karbondioksit içeren hava ile de çalışabilirler. Ancak platin zehirlenmesini önlemek için karbonmonoksit dönüştürülmeli veya tamamen kaldırılmalıdır. Fosforik asitli yakıt pilleri 150–200 °C çalışma sıcaklığında faaliyet gösterirler. Fosforik asitli yakıt pillerinin bir avantajı 200 °C de çalışırken bu yüksek çalışma sıcaklıklarından dolayı katalizörlerin karbonmonoksit ile zehirlenmesini azaltması ve %1.5 oranında bir karbonmonoksit konsantrasyonuna izin vermeleridir. Bir başka avantajları ise fosforik asit elektrolitin suyun kaynama noktasının üzerindeki sıcaklıklarda da görevini yapabilmesidir. Düşük sıcaklıklar fosforik asidin iletkenliğinin az olmasından dolayı tercih edilmez. Asidik ortamda meydana gelen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir (Bıykoğlu, 2003).



Anot reaksiyonu



Katod reaksiyonu

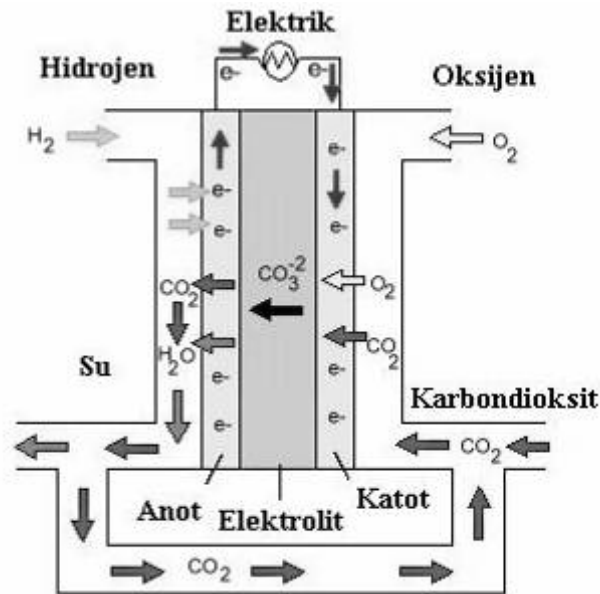


Toplam pil reaksiyonu

Fosforik asitli yakıt pillerinin verimi %40–50 civarındadır. Ancak açığa çıkan ısı kojenerasyonda kullanılırsa verim %80'i bulabilir. Kojenerasyon kısaca, enerjinin hem elektrik hem de ısı formlarında aynı sistemden beraberce üretilmesidir. Bu tip pilleri 200 °C lik çalışma sıcaklığıyla kojenerasyon için uygun yakıt pili tipidir. Fosforik asitli yakıt pillerinin ulaşım araçlarında kullanımı en uygun seçenek olarak gözükmektedir. 1970'lerde Los Alamos National Laboratory mühendisleri ilk kez fosforik asitli bir yakıt piliyle çalışan bir golf arabası üretmiştir. Ayrıca New York'ta Yonkers Waste Treatment Plant, ONSI Corporation PC25 200kW'lık üniteleri ticarileştirmiş. 11 MW'lık bir sistem Tokyo Elektrik Power tarafından geliştirilmiş, ancak ucuzlatma ve fizibilite çalışmaları devam etmektedir (Kadırgan, 2003).

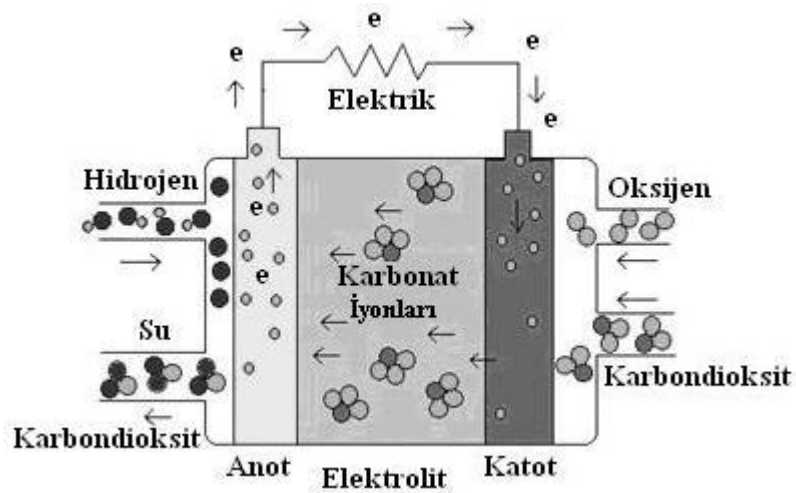
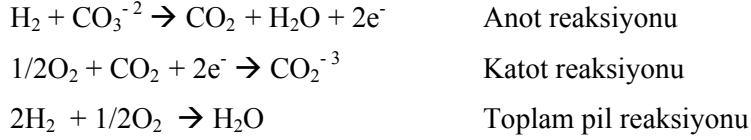
### 3.3.5. Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri (MCFC)

Erimiş karbonat yakıt pilleri diğer yakıt pillerinden çok farklı bir işletim sistemine sahiptir. Elektrolit olarak, poroz lityum-aliminyum matris içinde tutulan erimiş alkali potasyum lityum karbonat kullanılmaktadır. Bu elektrolit 650°C çalışma sıcaklığına sahiptir ve karbonat iyonları iletimi sağlamaktadır. MCFC katot tarafından oksijen ve karbondioksit gazı ile beslenir. Bu şekilde karbonat ( $\text{CO}_3^-$ ) oluşumunu sağlar ki iyonların iletimini sağlayan bu karbonat iyonudur.  $\text{CO}_3^-$  iyonları elektrolit içinden anoda geçer ve burada hidrojenle reaksiyona girerek su, karbondioksit ve elektronları açığa çıkarır. Elektronlar harici bir devreyi izleyerek elektrik enerjisini meydana getirir ve katoda geri döner. Katotta havadan alınan oksijen ve anotta açığa çıkan karbondioksit elektronlarla reaksiyona girerek karbonat iyonları meydana getirir ve bu iyonlar daha önce boşalan elektroliti tekrar doldurur (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 Erimiş Karbonat Yakıt Pili (İç Dönüşümlü)

Erimiş karbonat yakıt pilinde anotta meydana gelen karbondioksit gazı bir sistemle tekrar katot elektrotuna gönderiliyor ve geri çevrimle tekrar sisteme sokuluyor ise buna iç dönüşümlü (Şekil 3.9), eğer karbondioksit gazı direkt atmosfere veriliyor ise buna da dış dönüşümlü (Şekil 3.10) yakıt pili denilmektedir (Bıyıkoğlu, 2003). Bu tip yakıt pilinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.10 Erimiş Karbonat Yakıt Pili (Dış Dönüşümlü)

Yüksek sıcaklıkta çalışan erimiş karbonat yakıt pilleri, ihtiyaç duydukları hidrojeni dahili veya harici bir kaynaktan alabilir. Bu kaynak hidrojeni açığa çıkarmak için değişik yakıtlar kullanılabilir. Düşük sıcaklıktaki erimiş karbonat yakıt pilleri ise hidrojeni daha çok kömür bazlı yakıtlardan elde ederler. Bu yüzden bunlar çevreye daha zararlı olurlar. Erimiş karbonat yakıt pilleri, platinden çok daha ucuz olan nikelden yapılmış katalizörlerle oldukça iyi performans verir. Ayrıca sıcaklığın çok yüksek olmasından dolayı pilde kullanılacak malzeme yüksek sıcaklığa dayanıklı olmalıdır. Anotta nikel, katotta ise nikel oksit elektrot kullanılabilir (Bıyıkoğlu, 2003).

Erimiş karbonat yakıt pilinde çalışma sıcaklığı 600–700 °C arasındadır. Verimleri yaklaşık olarak %60 seviyesindedir. Ancak açığa çıkan ısı kojenerasyonda kullanılırsa verim %80 i bulabilir. 2 MW güç üretim kapasiteli, iç dönüşümlü ve 250 kW güç üretim kapasiteli, dış dönüşümlü sistemlerin tesisleri California’da, 280 kW kapasiteli sistem Almanya’da ve 1 MW güç üretim kapasiteli sitem 1998 yılında Japonya’da faaliyete geçirilmiştir.

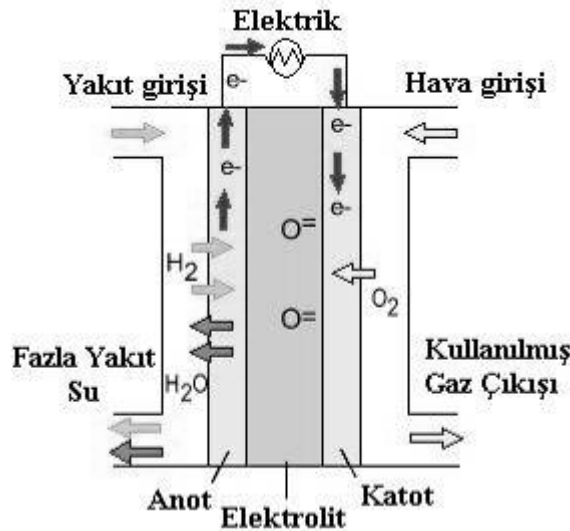
Erimiş karbonat yakıt pilleri çok yüksek çalışma sıcaklıklarına ihtiyaç duyduğundan ancak sabit, büyük santrallerde yerleşimleri mümkün olmaktadır. Yüksek çalışma sıcaklığı, açığa çıkan yüksek ısının kojenerasyonla yeniden kullanımına olanak tanımaktadır. Bu ısı, ısıtmada, buhar üretiminde, endüstriyel olarak veya daha çok elektrik üretmek için kullanılabilir.

Erimiş karbonat yakıt pillerinin iki önemli dezavantajı vardır. Dezavantajlarından birincisi katı yerine sıvı bir elektrolitle çalışmanın yarattığı zorluk, ikincisi ise karbonat iyonlarının anot reaksiyonunda harcanması nedeniyle sürekli katoda karbondioksit enjeksiyonu gerektirmesidir (Türker, İnan ve Trabulus, 2004).

### 3.3.6. Katı Oksit Yakıt Pilleri (SOFC)

Katı oksit yakıt pilleri tamamen katı yapıda olup, elektrolit olarak, yüksek sıcaklıkta oksijen iyonlarını ( $O^{2-}$ ) katottan anoda aktaran katı yitria dengeli zirkonyum materyaller kullanılır. Bu, gözeneksiz bir katı metaloksittir. Bu nedenle katı oksit yakıt pilleri diğer yakıt pili tiplerine nazaran yapı bakımından daha basittir. Çünkü yakıt pili yapısında sadece iki faz (gaz ve katı) söz konusudur. Hem elektrotlar hem de elektrolit seramik malzemedendir. Çalışma sıcaklıkları  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve verimleri %60-%70 civarındadır.

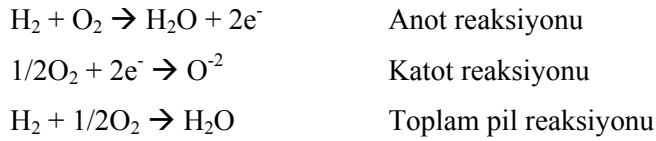
Katı oksit yakıt pilinde yakıt anot tarafına verildiğinde katot tarafında bulunan oksijen iyonları elektrolit içinden geçerek anotta hidrojenle reaksiyona girer. Bu reaksiyon sonucunda elektronlar ayrılır ve anot katot arasına bağlı dış devre iletkeninden geçerek elektrik enerjisini oluşturup katoda geri döner. Reaksiyona giren hidrojen, oksijen ve karbonmonoksit çıkış ürünü olarak su ve karbondioksiti üretir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 Katı Oksit Yakıt Pili

Katı oksit yakıt pillerinde yakıt olarak hidrojenin yanı sıra doğal gaz da kullanılabilir. Pilin yüksek çalışma sıcaklıklarından dolayı doğalgaz kolaylıkla hidrojene dönüşebilir ve bu dönüşüm yakıt hücresinde gerçekleşir. Bu tip yakıt pillerinde karşılaşılan en büyük sorun, saf hidrojen dışında kullanılan yakıtlar ile birlikte oluşan kükürt kirliliğidir. Yüksek çalışma sıcaklığına bağlı olarak elektrotlardaki reaksiyon hızları çok yüksektir (Emekçi, Ermiş, 2003).

Katı oksit yakıt pillerinde anot, katot ve toplam pilde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar aşağıda verilmiştir.



Katı oksit yakıt pilleri, erimiş karbonat yakıt pilleri gibi çok yüksek sıcaklıklarda faaliyet göstermektedir ve bunlar da genelde büyük sabit santrallerde kurulur. Yine yüksek sıcaklıktan dolayı açığa çıkan ısı kojenerasyonda kullanılmaya uygundur. Yakıt pilinden çıkan ısının buhar türbinlerinde kullanılması da mümkündür. Katı oksit yakıt pilleri konusundaki çalışmalarını sürdüren Siemens-Westinghouse 2002 yılı itibariyle toplam 1 MW kapasiteli yakıt pili ve kojenerasyon tesisini kullanıma açmıştır. Küçük ve büyük ölçekte enerji üretimi için geliştirilen katı oksit yakıt pili ile ilgili BMW, hidrojen/benzin yakıtı ile beslenen katı oksit yakıt pilli aracı prototip olarak üretmiş olup, Ar-Ge çalışmaları devam etmektedir (Türker İnan ve Trabulus, 2004).

### 3.4. Yakıt Pilinin Avantajları ve Dezavantajları

Yakıt pillerinin diğer yakıt sistemlerine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Bunlar aşağıda verilmiştir.

- Yakıt pili, termal enerji sistemlerine göre daha yüksek verimle çalışır. Termal sistemlerden elektrik elde edilirken, 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, NO<sub>x</sub>, yanmamış hidrokarbonlar ve kirlenici diğer maddeler oluşmazken, oksitleyici olarak hava kullanıldığında ihmal edilecek kadar az miktarda azot atıklar ve hidrokarbonlar kullanıldığında ise çok düşük miktarda CO<sub>2</sub> 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 olabilirler. Modülerdirler, gerekli görülen her yerde kullanılabilir ve yerleştirilebilirler.
- Yüksek sıcaklıklı yakıt pillerinde elektrik üretiminin yanı sıra yan ürün olarak oluşan atık ısı geri kazanılabilir ve buhar santrallerinde kullanılır.
- Yakıt pilleri dayanıklı ve güvenli sistemlerdir.

#### Yakıt Pili Dezavantajları

- 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 (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu, 2002).

### 3.5. Yakıt Pili Uygulama Alanları

Yakıt pili teknolojisi geliştikçe çok farklı alanlarda kullanımı yayılmaktadır. Uygulama alanlarını dört ana başlık altında toplamak mümkündür. Bunlar uzay çalışmaları ve askeri alanlar, ulaşım ve taşıma, sabit güç sistemleri ve taşınabilir uygulamalardır.

#### 3.5.1. Uzay Çalışmaları ve Askeri Alanlar

Yakıt pillerinin ilk uygulanma alanı, uzay çalışmalarıdır. ABD'nde 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 ünite 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 kWh'lik enerji üretilmiştir. Gemini gemisinde ise farklı olarak PEM tipi yakıt pili kullanılmıştır. Her ünite 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.

Konvansiyonel denizaltılar dizel-elektrikli tahrik sistemi ile teçhiz edilmişlerdir. Bu yöntemle üretilen enerji, asitli kurşun bataryalara yüklenmekte ve denizaltının dalma operasyonu ve personelin ihtiyacı karşılanmaktadır. Denizaltının su altında kalma zamanını bataryaların kapasitesi ile sınırlı olup su üstü operasyonu ile dizel jeneratörle bataryaların tekrar şarj edilmesi sağlanmaktadır. Denizaltının su üstü periyodunda iken düşman tarafından tespit edilme riski oldukça yüksektir. Bütün bu nedenlerden dolayı denizaltı sistemlerinin su üstü periyoduna geçmeden atmosfere kapalı bir tahrik sistemi ile teçhiz edilmesi ve daha fazla su altında kalması araştırılmıştır. Bu hedefe ulaşmak için Almanlar tarafından geliştirilen kapalı devre dizel motoru, stirling motoru, kapalı çevrimli gaz-buhar türbinleri ve yakıt pilleri gibi tahrik sistemleri geliştirilmiştir. Fakat yakıt pilleri diğer sistemlere göre

- Uzun periyotlarda su yüzeyine çıkmadan çalışma sağladığı,
- Çalışırken düşük ses seviyense sahip olduğu,
- Düşük manyetik özelliğe sahip oldukları için,
- Deniz suyuna az miktarda ısı transferi sağlaması gibi

daha avantajlı yanlarının olmasından dolayı diğer enerji kaynaklarına göre daha çok tercih edilmektedir. 1980’de ilk defa yakıt pillerinin denizaltılara uygulanması ile ilgili Howaltswerke-Deutsch Werft AG (HDW), Ingenieurkontrol Lubeck (IKL) ve Ferrostaal tarafından bir şirketler birliği oluşturmuştur. İlk araştırmalarda Polimer elektrolitli yakıt pillerinin denizaltı sistemlere uygulanması ile ilgili büyük gelişme kaydedilmiştir. Daha sonra Siemens tarafından 16 modülden oluşan 6.2 kW’lık yakıt pilleri geliştirilmiştir. HDW tarafından üretilen ve 212 Tip olarak adlandırılan denizaltılarda yakıt pillerinin enerji çıktısı 300 kW’a kadar ulaşmıştır. Sistemin güvenli bir ortamda çalışabilmesi için tüm modüller basınca dayanıklı kompartımanlarda tutulmaktadır. 212 Tip denizaltılar için standart üretilen yakıt pilleri 30–50 kW’lık modüllerden oluşmaktayken daha sonra modül gücü 120 kW’a kadar Siemens tarafından geliştirilmiştir (Bedir, Alniak, 2004).

### **3.5.2. Ulaşım ve Taşıma**

Yakıt pillerinin uygulandığı ve gelecekte de daha fazla yer bulacağı alan otomotiv sektörüdür. Yakıt pilleri, otobüs, kamyon, otomobil ve her türlü taşıt için yakıt görevi yapabilecek özelliklere sahiptir. Yakıt pilli araçlar, benzin ve dizel 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. Otomotiv sektöründe hedef, içten yanmalı motorların yerine 75 kW gücünde yakıt hücre sistemlerini yerleştirmektir. Yakıt hücreli otomobillerin büyük miktarlardaki üretimi 2006 ile 2010 yıllarında gerçekleşmesi beklenmektedir (Yıldırım, 2004).

Güç kaynağı olarak yakıt pillerinin kullanıldığı taşıtların kısımları temel olarak; yakıt pili, elektrik motoru, elektronik güç kontrolü ve yakıt tankından oluşmaktadır. 1990'lı yılların başında hemen hemen bütün büyük otomobil şirketleri yakıt pilleriyle çalışan otomobillere yönelik araştırma programı başlatmışlardır. Bu şirketlerden Daimler-Benz ve Toyota ürettikleri projelerle diğer şirketlerin önüne geçmişler ve ortak bir çalışma grubu oluşturmuşlardır. Aynı günlerde yakıt pilleri alanında araştırma çalışmalarını destekleyen Ballard firması Daimler-Benz ortaklığının dörtte bir hissesini satın almıştır.

Ballard Daimler-Benz ortaklığı neticesinde 1994 yılı mayıs ayında PEM yakıt pilleriyle çalışan ilk otomobil olan NECAR I (New Electric Car) üretilmiştir. NECAR I iki kişi taşıyabilmekte ve bir depo hidrojen yakıtıyla 130 km yol alabilmektedir. İki yıl sonra NECAR II üretilmiştir. NECAR II altı kişi taşıyabilmekte ve bir depo yakıtla 250 km yol kat edebilmektedir. NECAR I'den yüzde 20 daha hafif olan bu minibüsün erişebildiği en yüksek hız da 90 km/saat'dir. 1997 başlarında kent içi ulaşımında geleneksel otobüsler gibi rahatlıkla kullanılabilen ve 250 km menzili olan NEBUS adlı otobüs üretilmiştir. NEBUS çatısındaki güneş panelleri sayesinde ek bir elektrik üretimi de gerçekleştirebilmekteydi. Aynı yılın Eylül ayında NECAR III üretime geçmiştir. NECAR III önceki üç taşıttan da özellikleri bakımından farklıdır. Bu araçta yakıt olarak hidrojen değil metanol kullanılmıştır. Metanoldeki hidrojen, otomobilin seyri sırasında ayrıştırılıp yakıt pillerine sevk edilmiştir. Taşıtlarda metanol için gerekli yakıt deposu hidrojeninkinden çok daha küçük ve hafiftir. NECAR III bir depo (40 litre) metanolla 400 km yol alabilmektedir. Daha önceki modeller gibi NECAR III'ün de egzoz borusundan yalnızca su buharı çıkmaktadır.

NECAR I ve NECAR II yakıt olarak doğrudan hidrojeni kullanıyorlardı. Yakıt deposunun ve diğer aygıtların büyüklüğü nedeniyle bu taşıtlar minibüs tipindeydi. Ancak NECAR III'te yakıt olarak metanolün kullanılması sayesinde yakıt deposunu çok küçültülmüştür. Donanımın geri kalanındaki küçülme sonucunda da günümüz otomobillerinden hiçbir farkı olmayan bir elektrikli otomobil ortaya çıkmıştır.

1999 yılında Hamburg'da düzenlenen Uluslararası Yılın Motor Ödülleri yarışmasında en iyi motor düşüncesi dalındaki ödülü NECAR 4 almıştır. Bu taşıttaki yakıt pili teknolojisinin arabalarda geleceğin yakıt sistemi olduğu düşünülmektedir. NECAR 4 Mercedes-Benz'in A serisi temel alınarak yapılmış ve yakıt olarak sıvı hidrojen kullanılmıştır. Bu otomobilde, yakıt pili hidrojen ve oksijeni reaksiyona sokarak aracın gitmesi için gerekli elektriği üretmektedir. NECAR 4 sıfır emisyonu sahip ve bir tank yakıtla 280 mil (450 km) gidebilmektedir. Araç 145 km/s hıza ulaşabilmekte ve 5 kişi taşıyabilmektedir (Sayın ve Çanakçı, 2004).



### **3.5.3. Sabit Güç Santralleri**

Sabit güç santralleri yakıt pili teknolojisi için en önemli pazar konumundadır. Dünyada şu anda 200'den fazla sabit güç kaynağı olarak kurulmuş yakıt pili istasyonları bulunmaktadır. Bu enerji üreteçleri, hastanelerde, otellerde, iş yerlerinde, okullarda, evlerde, güç istasyonlarında, havaalanlarında gerek elektrik, gerek ısıtma sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu sistemleri kullanan şirketlerin enerji harcamalarında %20 - %40 arasında bir düşüş görülmektedir.

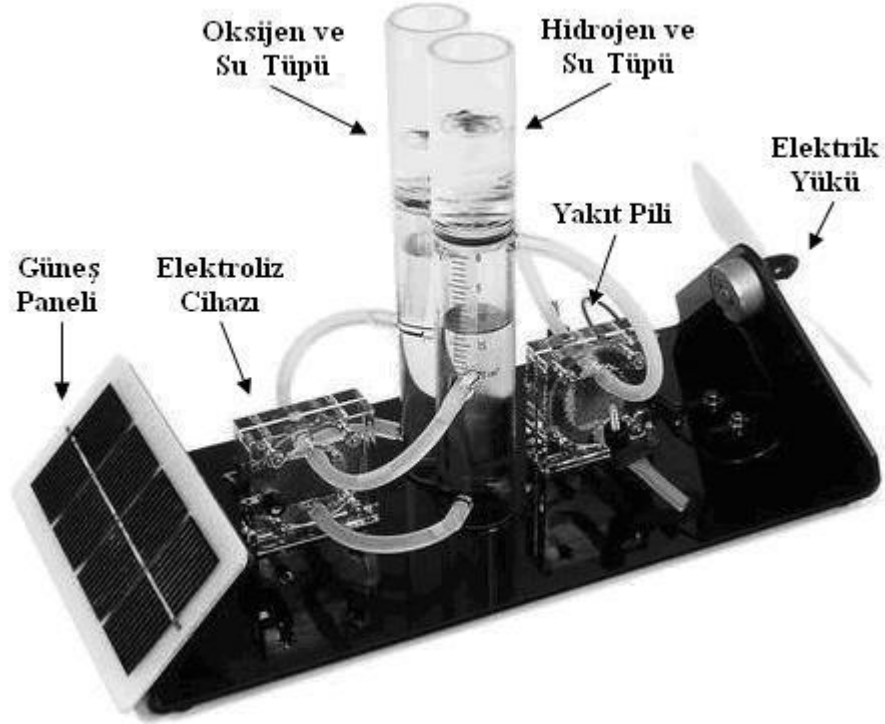
### **3.5.4. Taşınabilir Uygulamalar**

Taşınabilir uygulamalar az tanımlanmakla beraber oldukça büyük potansiyele sahiptir. Bu kategori genel olarak, enerji tüketimi ortalama 400 mW, bekleme konumunda 50 mW ve görüşme sırasında 1 mW olan cep telefonlarını ve enerji tüketimi ortalama 10 W olan dizüstü bilgisayarları içermektedir. Her iki uygulama da her gün büyüyen bir pazar payına sahiptir ve en büyük dezavantajları, kullanılacak bataryaların ömrünün kısa olmasıdır. Cep telefonu ve dizüstü bilgisayarlarda kullanılan piller içinde en verimli olan Li-on bataryaların yaklaşık 160 Wh/kg'lık bir enerjisi vardır. Bu telefon için birkaç günlük, dizüstü bilgisayar için 3 saatlik bir enerji demektir. Günümüzde, tüketiciler bunun 3-5 kat daha fazlasını talep etmektedir. Fakat kullanılan bataryalar zaten şu anda ulaşabilecekleri tüm limitleri zorlamış durumdadır.

Şu anda ayrıntılı bir şekilde üzerinde çalışılan çözüm, daha iyi enerji sağlayan, yakıt pili destekli şarj edilebilir, küçük boyutlu pillerdir. Bu durumda pilin ömrü sadece taşınan hidrojen veya metanol tankının büyüklüğü ile sınırlı kalacaktır. Kullanıcı cihazını sanki çakmağını veya dolmakalemını doldurmuş gibi birkaç saniyede dolduracak ve her dolmuş günümüz pillerinden 3-5 kat daha fazla enerji sağlayacaktır. Bu tip bir uygulamada en önemli nokta, günümüzde kullanılan batarya ile yakıt pilinin aynı oranda yer kaplamasıdır. Bu tip uygulamalar için prototipler çıkarılmıştır ve ilk ticari pil 2010 yıl içinde piyasada olacaktır. Kullanılacak teknoloji proton değişim zarlı yakıt pili ya da benzer şekilde çalışan direk metanol yakıt pili olacaktır. Çünkü düşük çalışma sıcaklığına sahiptir ve %100 katı içeriği ile diğer tip yakıt pillerinden daha avantajlıdır. Minyatür yakıt pilleri, pazara çıktıkları zaman, cep telefonu sahipleri cep telefonlarını bir ay şarj etmeden kullanabileceklerdir. Telekomünikasyon alanından bilgisayar dünyasına, görüntü teknolojilerinden alarm sistemlerine kadar birçok alandan bu küçük yakıt pilleri söz sahibi olacaktır.

#### 4. DENEY SETİNİN ÇALIŞMASI VE ÖZELLİKLERİ

Hidrojenle elektrik üretiminde amaç temiz ve çevreye zarar vermeden enerji üretmektir. Deney setinde yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisinden elektrik üretimiyle hidrojen elde edilmektedir. Deney seti beş bölümden oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla güneş paneli, elektroliz cihazı, su-hidrojen-oksijen depolama tüpleri, yakıt pili ve yük olarak da pervaneli bir motor devresidir (Şekil 4.1 ).



Şekil 4.1 Güneş Enerjili Yakıt Pili Sistemi

Deney seti üzerindeki güneş paneli, sistemdeki elektroliz cihazı için elektrik üretim kaynağıdır. Güneş paneli fotovoltaik hücrelerden oluşmuştur ve güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürerek elektroliz için gerekli olan doğru gerilim üretmektedir. Güneş paneli, direk güneş ışığına maruz bırakıldığında 2.5 voltluk bir gerilim üretmektedir. Bu sayede yakıt pili için gerekli olan hidrojen temiz ve yenilenebilir bir kaynaktan üretilir.

Elektroliz cihazı anot ve katot tarafında birer giriş ve birer çıkış olmak üzere dört boruyla su tüplerine bağlanmıştır. Alt kısmında bağlı olan boruyla cihaza su girişi sağlanmaktadır. Üst kısımda bulunan boruyla elektroliz edilen gaz tüplere geri gelmektedir. Bir elektroliz hücresi içinde, düzlem şeklinde iki elektrot ve bunların içine daldırıldığı, elektrolit olarak adlandırılan iletken bir sıvıdan oluşmaktadır. Sistemde elektrolit olarak saf su kullanılmaktadır. Doğru akım kaynağı bu elektrotlara bağlandığında akım iletken sıvı içinde, pozitif elektrottan negatif elektrotta doğru akar. Bunun sonucunda, su moleküllerine uygulanan

doğru akım, hidrojen ve oksijen atomlarının bağlarının kopması sağlanır. Oluşan yüklü parçacıklardan hidrojen iyonu pozitif elektrik yüküne sahiptir ve negatif elektrotta toplanır, oksijen ise negatif yüke sahip olduğundan pozitif elektrotta doğru hareket eder. Oluşan hidrojen ve oksijen borularla ayrı ayrı tüplerde depolanır.

Deney setinde su, hidrojen ve oksijen depolamak için birbirinden bağımsız iki ayrı tp kullanılmaktadır. Tüpün birinde su ve hidrojen diğer tüpte de su ve oksijen depolanmaktadır. Bu iki tüpün üst kısımlarında su depolama aparatı bulunmaktadır. Tüpler su ile doldurulup elektroliz başladıktan sonra yakıt pili çıkış vanaları kapatılırsa, oluşan hidrojen ve oksijen tüplerde birikmeye başlar. Elektroliz devam ettikçe tüplerin altında biriken gazlar suyu üst kısımdaki su depolama aparatına aktarmaktadır.

Proton değişim zarlı yakıt pili (PEMFC) tek bir hücrede oluşmaktadır. PEM yakıt pilinin üst kısmında ki borularla tüpten gelen hidrojen ve oksijen yakıt pilinde elektrik enerjisine dnmektedir. Alt kısımda bulunan borular da sistemde ki fazla gazı ve oluşan yan ürünleri dışarı atmaktadır. PEM yakıt pilinin anot tarafına gelen hidrojen atomları burada iyonize olur. Elektronlar dış devrede oluşturulan elektrik devresi üzerinden geçerek elektrik üretilir. İyonize olan hidrojenin protonları ise elektrolit içerisinden katot tarafına geçer. Yakıt pilinin katot tarafına gelen oksijen, elektrolitten gelen hidrojenle birleşerek suyu oluşturur. Böylece tüplerden gelen oksijen ve hidrojenle PEM yakıt pilinde elektrik üretilmiş olur. Deney setindeki PEM hücrenin çıkış voltajı 0.6 voltur. Yakıt pilinin alt kısmından çıkan, fazla ürün ve oluşan yan ürünlerin dışarı atıldığı borulardaki vanalar kapatıldığında; depolama tüpünden hücrede kullanılacak kadar yakıt gelir ve elektrolizle üretilen yakıt tüplerde depolanır.

PEM yakıt hücreinde üretilen elektrik, yük olarak kullanılan motor vasıtasıyla pervaneyi döndürerek harcanır. Yakıt hücresi yakıt (hidrojen) ve oksitleyiciyle (oksijen) beslendiği sürece elektrik üretimi devam edecek ve motor pervaneyi döndürecektir.

## 5. SONUÇLAR

Üretim sürecinin gerçekleştirilmesi ve yaşamın çağdaş koşullarda sürdürülmesi enerjiye bağlıdır. Tüm sektörlerin doğrudan ve dolaylı enerji talepleri olup, bu taleplerin aksamadan karşılanması önemlidir. Fosil yakıtlardan enerji üretiminde kullanılan petrol, doğalgaz ve kömür rezervlerine sahip olmamıza rağmen linyit dışında bu rezervlerimiz talebe karşılık verecek yeterlilikte değildir. Uzun vadeli düşünüldüğünde linyit yataklarımızda ihtiyaca karşılık verecek büyüklükte değildir. Ayrıca doğalgazda ve petrolde kaynakların yetersiz olmasından dolayı bu enerji kaynakları ithal edilmektedir. İthal kaynaklarla elektrik üretimi ithal elektrik demektir. İthal enerji ülke ekonomisine ve ülke büyümesine engel etmemdir. Ayrıca fosil yakıtlarla elektrik üretiminde çevreye ve insan sağlığına verilen zararlarda çok büyük sorunları beraberinde getirmektedir.

Yakıt pilleri gerek taşıt gerek güç istasyonları uygulamalarında gelecekte çok önemli kullanım alanına ve sektörde büyük bir paya sahip olacaktır. 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 sıraya oynayacak yakıtlardan biri olacaktır. 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. Bu tez çalışmasında, yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde, temiz ve en büyük enerji kaynağı olan hidrojen enerjisi ile bu enerji kaynağından yararlanarak elektrik üreten yakıt pilleri incelenmiştir ve neden yakıt pili sorusuna cevap verilmiştir.

Çalışmanın ilk bölümünde fosil yakıtlar, etkileri, çevreye verdiği zararlar, hidrojen enerjisinin Dünya ve Türkiye'deki gelişimi anlatılmıştır.

İkinci bölümde ise temiz ve tükenmez enerji kaynağı olan, geleceğin enerji teknolojisini oluşturan hidrojen anlatılmış ve bunun üretilmesi, depolanması, taşınması ve güvenliği hakkında bilgi verilmiştir.

Üçüncü bölümde hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı yakıt pili teknolojisinin tarihçesi ve teknolojik gelişimi ile yakıt pilinin çalışma prensibi incelenmiştir. Günümüzde pratikte kullanılan yakıt pili sistemleri tanıtılmış ve yakıt pili uygulama alanları hakkında bilgi verilmiştir.

Son bölümde ise yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisiyle hidrojen ve oksijen üretimi yapan ve bu gazları kullanarak elektrik üreten proton değişim zarfı yakıt hücreli deney setinin çalışması hakkında bilgi verilmiştir.

## 6. KAYNAKLAR

- Altıntaş, B. ve Donatan, S. (2003). Membran Teknolojisi ve Katkılı Membranlar (2). Kimya Teknolojileri Dergisi. Sayı: 29
- Ar, F., (1998). Yakıt Hücreleri: Tarihsel Gelişimi, Teknolojisi, Çeşitleri ve Dünyadaki Uygulamaları, Elektrik İşleri Etüt İdaresi Bülteni. Ankara.
- Balkan, Ö. ve Öztürk, M. (2004) EAE Yakıt Hücresi Projesi. V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu Bildiri Kitabı Cilt: 2, 825-828s, İstanbul: Su Vakfı Yayınları.
- Bedir, F. ve Alniak, M.O. (2004). Yakıt Hücre Sistemlerinin Çalışma Prensipleri ve Denizaltı Sistemlerdeki Tasarımı. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt:1, Sayı: 3
- Bıyıkoglu, A. (2003). Yakıt Hücrelerinin Tarihsel Gelişimi, Çalışma Prensipleri ve Bugünkü Durumu. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi. Sayı:16. 523-542s.
- Bockirs, J., Veziroglu, T. N. ve Smith, D. L. (2002). (Ed: Ö. F. Noyan) Geleceğin Enerjisi Güneş ve Hidrojen. İzmir: Kaynak Yayınları.
- Cowenden, R., Nahon, M., Rosen, M.A. (2001). Modeling and Analysis of a Solid Polymer Fuel Cell System for Transportations. International Journal Hydrogen Energy, 26:6, 615–623.
- Çetinkaya, M. ve Karaosmanoğlu, F. (2002). Yakıt Pilleri ve Uygulamaları. 3e Electrotech Dergisi. Sayı: 100
- Devlet Planlama Teşkilatı, (2000). İklim Değişikliği Özel İhtisas Komisyon Raporu. Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı 2000–2004. Ankara: DPT.
- Devlet Planlama Teşkilatı, (2001). Elektrik Enerjisi Özel İhtisas Komisyon Raporu. Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı 2001–2005. Ankara: DPT.
- Dinçer, I. (2002). Technical, Environmental and Exergetic Aspects of Hydrogen Energy Systems. International Journal of Hydrogen Energy. 27, 265-285pp.
- Ekmekçi, İ. ve Ermiş, K. (2003). Yakıt Hücrelerinin Önemi ve Uygulama Alanları. 3e Electrotech Dergisi. Sayı: 105

- Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü (EİE). (2005a). Hidrojen Enerjisi: Hidrojenin Taşınması. İnternette 16.12.2005 Tarihinde İndirilmiştir:  
[http://www.eie.gov.tr/hidrojen/hidrojen\\_tasinmasi.html](http://www.eie.gov.tr/hidrojen/hidrojen_tasinmasi.html)
- Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü (EİE). (2005b). Yakıt Pili Çeşitleri ve Özellikleri Tablosu. İnternette 16.12.2005 tarihinde indirilmiştir:  
[http://www.eie.gov.tr/hidrojen/yakit\\_pilleri.html](http://www.eie.gov.tr/hidrojen/yakit_pilleri.html)
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB). (2005). UNIDO-Uluslararası Hidrojen Enerjisi Teknolojileri Merkezi Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN) Niyet Mektubu. İnternette 20.01.2006 Tarihinde İndirilmiştir:  
<http://www.iklim.cevreorman.gov.tr/sunumlar/>
- Eroğlu, İ. (2004a). Türkiye ve Dünyada Hidrojen Enerjisi. Hidrojen ve Yakıt Hücresi Sistemlerinin Geliştirilmesine Yönelik Yakın, Orta ve Uzak Dönem Hedefleri Tablosu. V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu Bildiri Kitabı Cilt: 2, 674s, İstanbul: Su Vakfı Yayınları.
- Eroğlu, İ. (2004b). Türkiye ve Dünyada Hidrojen Enerjisi. V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu Bildiri Kitabı Cilt: 2, 671-680s, İstanbul: Su Vakfı Yayınları.
- Güvendiren, M. ve Öztürk, T. (2003). Enerji Kaynağı Olarak Hidrojen ve Hidrojen Depolama. Mühendis ve Makine Dergisi. Sayı: 523.
- Haktanır, D. (2003). Hava Kirlenmesini Önleyebilecek Yenilenebilir Enerjilerle Yakıt Hücreleri. İnternette 15.11.2005 Tarihinde İndirilmiştir:  
[http://www.obitet.gazi.edu.tr/Makaleler/T15\\_Yakit.htm](http://www.obitet.gazi.edu.tr/Makaleler/T15_Yakit.htm)
- Hazer, B. (1995). Genel Kimya (3. Baskı) Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi Basımevi.
- Kadırgan, F. (2003). Hidrojenli Yakıt Hücreleri Teknolojilerinde Son Gelişmeler. 3e Electrotech Dergisi. Sayı: 104
- Karaosmanoğlu, F. (2004). Türkiye Elektrik Üretimi İçin Yeni Seçenekler. 3e Electrotech Dergisi. Sayı: 119.
- Kellegöz, M. ve Özkan, İ. (2004). PEM Yakıt Hücrelerinin; Üretim Aşamaları, Performansa Etkileri ve Karşılaşılabilecek Zorluklar İle Diğer Yakıt Hücrelerine Nazaran

Avantajları ve Dezavantajları. V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu Bildiri Kitabı. Cilt:2, 809–818 İstanbul: Su Vakfı Yayınları.

Koyunoğlu, S., Dindar, B. ve İçli, S. (2004). Fotokimyasal ve Fotobiyolojik Hidrojen Üretimi. V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu Bildiri Kitabı. Cilt:2, 705–709 İstanbul: Su Vakfı Yayınları.

Midilli, A., Ay, M. Ve Dinçer, İ. (2004). Hidrojenin Dünya Barışına Katkısının Parametrik Değerlendirilmesi. V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu Bildiri Kitabı. Cilt:2, 681–691 İstanbul: Su Vakfı Yayınları

Midilli, A., Ay, M., Kale, A. ve Veziroğlu, T.N. (2004). Karadeniz Dip Sularının Hidrojen Enerjisi Potansiyeli. V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu Bildiri Kitabı. Cilt:2, 771–731 İstanbul: Su Vakfı Yayınları.

Oral, E. ve Çelik, V. (2005). Hidrojen Yakıtlı Motor Teknolojisi. Mühendis ve Makine Dergisi Cilt:46, Sayı:540, 32s

Özdemir, E. (2002). Yakıt Pili İle Elektrik Üretimi. 3e Electrotech Dergisi. Sayı: 94

Sayın, C. ve Çanakçı, M. (2004). Otomotiv Dünyasında İdeal Enerji Kaynağı: Yakıt Pilleri. Otomasyon Dergisi. Sayı: 145

Türker, B., İnan, A. ve Trabulus, S. (2004). Yakıt Pili Çeşitleri. 3e Electrotech Dergisi. Sayı: 126

TÜSİAD (1998). 21. Yüzyıla Giderken Türkiye'nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi: Hidrojen Enerjisi. 203–214, İstanbul: Lebib Yalkın Yayınları.

Ün, Ü.T. (2003). Hidrojen Enerjisi: Depolanması, Güvenliği, Çevresel Etkisi ve Dünyadaki Durumu. Mühendis ve Makine Dergisi. Sayı: 525.

Ün, Ü.T. (2003a). 21. Yüzyılın Enerjisi: Hidrojen. II. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Bildiriler Kitabı. 09.06.2005 Tarihinde İnternette İndirilmiştir:  
[http://arsiv.emo.org.tr/Kartus01/SEMPOZYUMLAR/Yeksem2003/bildiriler/oturum2/2\\_2.doc](http://arsiv.emo.org.tr/Kartus01/SEMPOZYUMLAR/Yeksem2003/bildiriler/oturum2/2_2.doc)

Veziroğlu, T. N. (2003). Hydrogen Energy System: A Permanent Solution To Global Problems. İnternetten 15.10.2005 Tarihinde İndirilmiştir: [www.iahe.org](http://www.iahe.org).

Veziroğlu, T. N. (2004). (Ed: Ö. F. Noyan). Dünya Barışı İçin Türkiye Dünya Barışı İçin Hidrojen. İstanbul: Kaynak Yayınları.

Yıldırım, M. (2004). Otomotiv Sektöründe Hidrojen Kullanımı ve Yakıt Pili Teknolojisi. V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu Bildiri Kitabı. Cilt:2, 795–807. İstanbul: Su Vakfı Yayınları.



## 7. ÖZGEÇMİŞ

01.05.1978 yılında Erzincan'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Erzincan'da tamamladı. 1995 yılında Erzincan Endüstri Meslek Lisesi Elektrik Bölümünden mezun oldu. 1998 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitim Bölümü Elektrik Öğretmenliği'nde başladığı lisans eğitimini 2002 yılında tamamladı.

2003–2004 öğretim yılının güz döneminde Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı Yüksek Lisans programına başladı. 2004–2005 güz yarıyılında yüksek lisans seminerini “Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Elektrik Üretimi” konusunda sundu ve jüri tarafından başarılı bulunarak, “Yakıt Pili İle Elektrik Enerjisi Üretimi” konulu tez çalışmasını yapmaya hak kazandı.