

FARKLI ÖZELLİKLERDEKİ
PROTON DEĞİŞİM ZARLI YAKIT HÜCRESİ
TASARIMI VE ÖLÇÜMLERİ

Murat KELLEĞÖZ

Doktora Tezi
Fizik Anabilim Dalı

2005

DESIGN AND MEASUREMENT OF
PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL
HAVING DIFFERENT PROPERTIES

Murat KELLEĞÖZ

Ph. D. Thesis
Physics Department

2005

**FARKLI ÖZELLİKLERDEKİ PROTON DEĞİŞİM ZARLI YAKIT HÜCRESİ
TASARIMI VE ÖLÇÜMLERİ**

Murat KELLEĞÖZ

Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Fizik Anabilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd.Doç.Dr.İsmail ÖZKAN

2005

Murat KELLEGÖZ'ün Doktora Tezi olarak hazırladığı "FARKLI ÖZELLİKLERDEKİ PROTON DEĞİŞİM ZARLI YAKIT HÜCRESİ TASARIMI VE ÖLÇÜMLERİ" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye: Yrd. Doç. Dr. İsmail ÖZKAN (Danışman – Osmangazi Üniversitesi)

Üye: Prof. Dr. Önder ORHUN (Anadolu Üniversitesi)

Üye: Prof. Dr. Ertuğrul YÖRÜKOĞULLARI (Anadolu Üniversitesi)

Üye: Prof. M. Selami KILIÇKAYA (Osmangazi Üniversitesi)

Üye: Yrd. Doç. Dr. Salih KÖSE (Osmangazi Üniversitesi)

Fen Bilimleri Enstitüsünün Yönetim Kurulu'nun ...23.../...06.../...2005...
gün ve2005-8/2..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

Enstitü Müdürü

Murat KELLEGÖZ'ün Doktora Tezi olarak hazırladığı “**FARKLI ÖZELLİKLERDEKİ PROTON DEĞİŞİM ZARLI YAKIT HÜCRESİ TASARIMI VE ÖLÇÜMLERİ**” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye: Yrd. Doç. Dr. İsmail ÖZKAN (*Danışman – Osmangazi Üniversitesi*)

Üye: Prof. Dr. Önder ORHUN (*Anadolu Üniversitesi*)

Üye: Prof. Dr. Ertuğrul YÖRÜKOĞULLARI (*Anadolu Üniversitesi*)

Üye: Prof. M. Selami KILIÇKAYA (*Osmangazi Üniversitesi*)

Üye: Yrd. Doç. Dr. Salih KÖSE (*Osmangazi Üniversitesi*)

Fen Bilimleri Enstitüsünün Yönetim Kurulu'nun/...../.....
gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖZET

Bu çalışmada, farklı besleme türlerine sahip proton değişim zarlı yakıt hücrelerinin imalatı için kullanılan bileşenlerinin üretimi, bunların üretiminde karşılaşılabilecek zorlukları, bileşenlerinin bir araya getirilerek monte edilmeleri, ölçümler sonucu performanslarının belirlenmesi ve üretim maliyetleri konu edilmiş ve incelenmiştir. Turbo Pascal 7.0 programlama diliyle yazılmış olan bir yazılım yardımıyla proton değişim zarlı yakıt hücresinden elde edilen sinyaller incelenmiştir. Sinyallerin analog olması nedeniyle bilgisayarın paralel port girişine verilmeden önce dijital sinyallere dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm için 0808ADC entegresi kullanılmıştır. Bilgisayara aktarılan dijital sinyaller yazılım desteği ile işlenerek farklı çalışma şartlarına göre voltaj-zaman grafikleri elde edilmiştir. İmalatları gerçekleştirilen proton değişim zarlı yakıt hücrelerinin hidrojen/hava veya hidrojen/oksijen ile beslenmeleri sonrasında elde edilen ölçüm sonuçları değerlendirilerek çalışma şartlarına bağlı voltaj-akım, güç-akım, voltaj-zaman değişimleri gözlenmiştir. Elde edilen ölçümler “Turbo Pascal 7.0” programlama dilin yazılmış yazılımın dışında “Microcal Origin 6.0” grafik çizim programında kullanılarak grafik çizimleri elde edilmiştir. Proton değişim zarlı yakıt hücresine bağlı yük direncinin değiştirilmesi sonucu ölçülen akım ve voltaj değerleri ohm yasasına uyduğu gözlenirken, yük direncinin alt ve üst sınır değerler dışına çıkartılması durumunda ise ölçülen akım ve voltaj değerleri ohm yasasına uymamaktadır. Yük direncindeki alt ve üst sınır değerler, hidrojen/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresi için $0.7\Omega - 5\Omega$ bulunurken, hidrojen/oksijen beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinde $0.6\Omega - 10\Omega$ bulunmuştur. Ölçümlerin, proton değişim zarlı yakıt hücrelerine bağlı yük direncine, hücreyi besleyen hidrojen gazının konsantrasyonuna, oksitleyici olarak kullanılan hava veya oksijen gazının konsantrasyonuna sıkı sıkıya bağlı olduğu anlaşılmıştır. Proton değişim zarlı yakıt hücresinden elde edilen verilerle çizilen voltaj-güç grafiğinde hidrojen/oksijen beslemeli yakıt hücresinden elde edilebilen azami güç 0.135W iken hidrojen/hava beslemeli yakıt hücresinden elde edilen azami güç 0.175W olduğu görülmüştür. Üretilen proton değişim zarlı yakıt hücresinden elde edilen ölçümlerden bu tür yakıt hücresinin verimini %31 bulunmuştur. Proton değişim zarlı yakıt hücresinin üretilmesi için gerekli demirbaş malzemelerin maliyeti 4441.46YTL olmuştur. 1W’lık yakıt hücresi yığınının üretilmesi için gerekli sarf malzemelerin maliyeti ise 1929.60YTL dir.

SUMMARY

In this work, the production of components used in the fabrication of proton exchange membrane fuel cells with different biasing types, the difficulties that could be appear, the integration of components, determining the performances by measurements and fabrication costs are taken into account and investigated. Since the signals obtained from proton exchange membrane fuel cell, by using Turbo Pascal 7.0 computer program, are analog, these are converted to digital signals before being given from computers parallel port. 0808ADC integration is used for this conversion. Current-voltage plots have been obtained at different working conditions by software support and analyzing the digital signals transported to the computer. After the examination of measurement results obtained from the biasing of proton exchange membrane fuel cells by hydrogen/air and hydrogen/oxygen, voltage-current, power-current and voltage-time variations related to working conditions were determined. The results are also plotted using "Microcal Origin 6.0" besides "Turbo Pascal 7.0". As a result of the changing of the load resistance connected to the proton exchange membrane fuel cell it was seen that the current and voltage values are consistent with ohm's law. However, at deviation from lower and upper limit values of load resistance, the above consistency fails. The limit values are $0,7-5\Omega$ for hydrogen/air biased proton exchange membrane fuel cell and $0.6-10\Omega$ for hydrogen/oxygen biased proton exchange membrane fuel cell. It was determined that the results are strictly depend on the load resistance, the concentration of the hydrogen gas that biases the cell, the concentration of the air or oxygen gas used as oxidant. The maximum power obtained from the hydrogen/oxygen biased proton exchange membrane fuel cells voltage-power plot is 0.135W were the maximum power obtained from the hydrogen/air biased proton exchange membrane fuel cells voltage-power plot is 0.175W. After all investigations the efficiency of such a fuel cell is found to be 31%. The cost for the production of proton exchange membrane fuel cell is 4441.46YTL. The cost of the materials used for the production of 1W of fuel cell is 1929.60YTL.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmamda beni yönlendiren sayın hocam Yrd.Doç.Dr. İsmail ÖZKAN'a sabır ve ilgisinden dolayı sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Yaptığım doktora tezimin deneysel bir çalışma olmasından dolayı Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Komisyonu Başkanlığınca 200319010 nolu “PC KONTROLLÜ HİDROJEN VE OKSİJEN BESLEMELİ PEM (PROTON DEĞİŞİM ZARLI) YAKIT HÜCRESİ TASARIMI” adlı projenin katkısı tartışılmaz olup emeği ve yardımları olan tüm çalışanlara teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmemde şüphesiz en büyük katkı ve emeği olan; sevgi, destek ve yardımlarını hiçbir zaman eksik etmeyen çok değerli anneme ve babama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince her zaman sevgisini, desteğini ve sabrını hiç esirgemeyen eşim Filiz ALACA KELLEĞÖZ'e çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
1.1. Giriş	1
1.2. Amaç	3
2. HİDROJEN ENERJİSİ	4
2.1. Giriş	4
2.2. Hidrojenin Özellikleri	4
2.3. Hidrojenin Üretimi.....	6
2.4. Hidrojenin Depolama	8
2.5. Hidrojenin Taşıma	11
2.6. Hidrojenin Güvenliği	12
2.7. Hidrojenin Çevresel Etkileri	13
2.8. Hidrojenin Kullanım Alanları	16
2.9. Hidrojenin Dünyadaki ve Türkiye’deki Durumu.....	17
2.9.1. Uluslararası Hidrojen Enerjisi Teknolojileri Merkezi	20

İÇİNDEKİLER (Devam)

Sayfa

3. YAKIT HÜCRELERİ	22
3.1. Giriş	22
3.2. Yakıt Hücrelerinin Tarihîsel Gelişimi	22
3.3. Yakıt Hücreleri Çeşitleri, Yapısal Bileşenleri ve Çalışma Prensipleri.....	24
3.3.1. Fosforik Asitli Yakıt Hücresi.....	27
3.3.2. Katı Oksitli Yakıt Hücresi	28
3.3.3. Eriyik Karbonatlı Yakıt Hücresi	30
3.3.4. Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi.....	31
3.3.5. Alkali Yakıt Hücresi	32
3.3.6. Katı Polimer Yakıt Hücresi.....	33
3.4. Yakıt Hücrelerinin Verimliliği	34
3.5. Yakıt Hücrelerinin Avantaj ve Dezavantajları.....	37
3.6. Yakıt Hücrelerinin Uygulama Alanları.....	38
3.6.1. Yakıt Hücrelerinin Türkiye’deki Uygulama Alanları.....	43
 4. PROTON DEĞİŞİM ZARLI YAKIT HÜCRESİ.....	45
4.1. Giriş	45
4.2. Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücrelerinin Yapısal Bileşenleri	45
4.3. Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücrelerinin Çalışma Esası	46
4.4. Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücrelerinin Performansı	47
4.5. Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücrelerinin Uygulama Alanları	56
 5. PROTON DEĞİŞİM ZARLI YAKIT HÜCRESİ İMALATI VE ÇALIŞTIRILMASI.....	58
5.1. Giriş	58

İÇİNDEKİLER (Devam)

Sayfa

5.2. Proton Değişim Zarının Hazırlanması	58
5.3. Elektrotların Hazırlanması	61
5.4. Sıcak Pres ile Elektrot-Zar Yapısının Oluşturulması.....	65
5.5. Gaz Akış Plakalarının Hazırlanması.....	68
5.6. Dış Devre ve Gaz Giriş/Çıkış Hortum Bağlantılarının Oluşturulması	70
5.7. Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücresinin Birleştirilmesi	70
5.8. Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücresinin Çalıştırılması	73
6. BİLGİSAYAR BAĞLANTISI VE YAZILIM	77
6.1. Giriş	77
6.2. Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücresinin Bilgisayar Bağlantısı	77
6.3. Yazılım.....	82
7. ÖLÇÜM SONUÇLARI İLE VERİM VE MALİYET HESABI.....	91
7.1. Giriş	91
7.2. Ölçüm Alımı ve Ölçüm Sonuçları	91
7.3. Verim Hesabı	106
7.4. Maliyet Hesabı.....	108
8. TARTIŞMA VE SONUÇ	110
7.1. Tartışma	110
7.2. Sonuç	114

İÇİNDEKİLER (Devam)**Sayfa****KAYNAKLAR****ÖZGEÇMİŞ**

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Atmosferdeki CO ₂ miktarının hidrojen kullanımı ile değişimi	16
3.1. Tipik bir yakıt hücresinin şematik gösterimi	25
3.2. Fosforik asitli yakıt hücresinin çalışma prensibi ve kimyasal tepkimeleri.....	27
3.3. Katı oksitli yakıt hücresinin çalışma prensibi ve kimyasal tepkimeleri	29
3.4. Eriyik karbonatlı yakıt hücresinin çalışma prensibi ve kimyasal tepkimeleri	30
3.5. Doğrudan metanol yakıt hücresinin çalışma prensibi ve kimyasal tepkimeleri	31
3.6. Alkali yakıt hücresinin çalışma prensibi ve kimyasal tepkimeleri	32
3.7. Katı polimer yakıt hücresinin çalışma prensibi ve kimyasal tepkimeleri.....	33
4.1. Nafion zarın basit kimyasal yapısı.....	45
4.2. Proton değişim zarlı yakıt hücresinin temel çalışma prensibi	46
4.3. Farklı platin katalizör yüklerine göre hücre potansiyeli - akım yoğunluğu grafiği	49
4.4. O ₂ basıncının proton değişim zarlı yakıt hücresi performansı üzerindeki etkisi	50
4.5. 1970'lerin ortalarından itibaren proton değişim zarlı yakıt hücrelerinin performans eğrileri ...	54
4.6. Proton değişim zarlı hidrojen/hava yakıt hücresinin performans eğrisi	54
5.1. Proton değişim zarı Nafion™ 'un ticari hali.....	58
5.2. Proton değişim zarı Nafion™ 'un işlemeye hazır kesilmiş hali	59
5.3. Proton değişim zarı kirliliği ve arındırma kimyasalları	59
5.4. Zar kirliliğinin temizlenmesinde kullanılan su banyosu.....	60
5.5. Karbon dokumanın kesilmiş hali	61
5.6. Kimyasal tartımlarda kullanılan kapalı dijital hassas terazi	63
5.7. Deneme uygulamanın kağıt üzerindeki görüntüsü	63
5.8. Morötesi ışık lambası içeren bir cihaz	64
5.9. Sandviç yapının şematik hali ve fotoğrafı	66
5.10. Sıcaklık değeri ayarlanabilir ve programlanabilir fırın.....	66
5.11. Elektrot-zar yapısının şematik görünümü.....	67
5.12. Elektrot-zar yapısı.....	68
5.13. Grafit levhaların işlenmiş hali.....	69
5.14. Delme ve yiv açma işlemlerinin gerçekleştirildiği el matkabı	69
5.15. Soket yuvalarına tutturulmuş metal folyolar	70

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.16. Hidrojen/oksijen beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresi tutucuları	71
5.17. Hidrojen/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresi tutucuları	71
5.18. Yakıt/oksitleyici beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresi birleşim şeması.....	72
5.19. Yakıt/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresi birleşim şeması.....	72
5.20. Yakıt/oksitleyici beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresi fotoğrafı.....	73
5.21. Yakıt/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresi fotoğrafı.....	73
5.22. Çalıştırılan hidrojen/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin şematik gösterimi...	74
5.23. Çalıştırılan hidrojen/oksijen beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin şematik gösterimi ..	74
5.24. Nargile ünitesinin şematik gösterimi ve fotoğrafı	75
5.25. Çalıştırılan hidrojen/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin fotoğrafı .	75
5.26. Çalıştırılan hidrojen/oksijen beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin fotoğrafı .	76
6.1. 0808ADC entegresinin bağlantı şeması.....	78
6.2. Akış şeması	79
6.3. Yazılımın ilk ekran görüntüsü	80
6.4 Yazılımın veri giriş ekran görüntüsü	80
6.5. Yazılımın grafik çizimi sırasındaki ekran görüntüsü.....	81
6.6. Yazılımın grafik çizim anındaki ekran görüntüsü	81
6.7. Yazılımın programdan çıkış ekran görüntüsü.....	82
7.1. Proton değişim zarlı yakıt hücresinin ölçüm devre düzeneği	92
7.2. Hidrojen/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin voltaj-akım grafiği..	94
7.3. Hidrojen/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin güç-akım grafiği...	94
7.4. Hidrojen/oksijen beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin voltaj-akım grafiği .	96
7.5. Hidrojen/oksijen beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin güç-akım grafiği...	96
7.6. $R_L=2.6\Omega$ durumunda proton değişim zarlı yakıt hücresinin voltaj-akım grafiği.....	97
7.7. $R_L=3.8\Omega$ durumunda proton değişim zarlı yakıt hücresinin voltaj-akım grafiği	98
7.8. $R_L=5.3\Omega$ durumunda proton değişim zarlı yakıt hücresinin voltaj-akım grafiği	98
7.9. Hidrojen gazı verilmesiyle elde edilen voltaj-zaman grafiği.....	101
7.10. Fanın çalıştırılmasıyla birlikte elde edilen voltaj-zaman grafiği	102

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.11. Hidrojen gazının kesilmesiyle elde edilen voltaj-zaman grafiği	103
7.12. Hidrojen gazı verilmesiyle elde edilen voltaj-zaman grafiği.....	104
7.13. Hidrojen gazı ile 1 saat süreyle beslenmesi sonrasındaki voltaj-zaman grafiği	105
7.14. Hidrojen gazının kesilmesiyle elde edilen voltaj-zaman grafiği	106

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Hidrojenin diğer yakıtlarla enerji yoğunluklarının karşılaştırılması.....	5
2.2. Hidrojenin, benzinin ve metanın yakıt özelliklerinin karşılaştırılması.....	5
2.3. Eşdeğer ısı miktarınca benzinin diğer yakıtlarla ağırlıklarının kıyaslanması.....	11
2.4. Hidrojenin diğer yakıtlarla emniyet faktörünün kıyaslanması	13
2.5. Farklı enerji sistemlerinden üretilen kirleticilerin miktarları.....	14
2.6. Enerji sistemlerinin çevresel uygunluk faktörü	15
3.1. Yakıt hücresi çeşitlerinin bazı temel özellikleri	26
3.2. Dünyada önde gelen otomotiv firmalarının ürettiği metanol yakıtlı araçlar	42
4.1. Anot-zar ve katot-zar ara yüzeylerinde meydana gelen tepkimeler ile toplam tepkime	47
6.1. ADDA, ADDB ve ADDC bacaklarının kodları	78
7.1. Hidrojen/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin farklı yük dirençlerindeki voltaj, akım ve güç değerleri	93
7.2. Hidrojen/oksijen beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin farklı yük dirençlerindeki voltaj, akım ve güç değerleri	95
7.3. Sabit yük dirençlerindeki voltaj ve akım değerleri.....	97
7.4. Su oluşum tepkimesindeki entalpi ve entropi değişimleri	107
7.5. Kullanılan demirbaş malzemelerin listesi.....	108
7.6. Kullanılan sarf malzemelerin listesi	109

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
A.....	Amper
ABD.....	Amerika Birleşik Devletleri
ADC.....	Analog Digital Converter
ALE.....	Adress Latch Enable
AR-GE.....	Araştırma-Geliştirme
atm.....	Atmosfer
BP.....	British Petrol
CLOCK.....	Saat
cm ²	Santimetre kare
e ⁻	Elektron
EOC.....	End of Conversion
EPDK.....	Elektrik Piyasası Düzenleme Kurulu
g.....	Gram
GHz.....	Giga hertz
GJ.....	Giga joule
GND.....	Ground (Toprak)
ICHET.....	Uluslararası Hidrojen Enerji Teknolojileri Merkezi (International Center for Hydrogen Energy Technologies)
J.....	Joule
K.....	Kelvin
kg.....	Kilo gram
kW.....	Kilo watt
LED.....	Işık saçan diyot (Light Emitting Diyote)
LPG.....	Liquid Petrol Gas (Sıvı Petrol Gaz)
lt.....	Litre
m ³	Metre küp
mA.....	Mili amper
MAM.....	Marmara Araştırma Merkezi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devam)

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
mbar	Mili bar
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
MJ	Megajoule
ml	Mililitre
mV	Milivolt
mW.....	Miliwatt
nm	Nanometre
N.....	Newton
NASA.....	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (National Aeronautics and Space Administration)
OE	Output Enable
P	Pentium
Pa	Pascal
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
PEM	Proton Exchange Membrane
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
ppm	partical per million (milyonda bir parça)
R _L	Yük direnci
s.....	Saniye
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
TİDER.....	Türkiye İthalatçılar Derneği
TNT.....	Tri-Nitro-Toluen
TOFAŞ.....	Türk Otomobil Fabrikası Anonim Şirketi
TÜBİTAK.....	Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu
TW	Tera watt
UNIDO.....	Birleşmiş Millerler Sınai Kalkınma Örgütü (United Nations Industrial Development Organization)
U.S.	Birleşmiş Devletler (United States)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devam)

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
V.....	Volt
W.....	Watt
w/w.....	ağırlık/ağırlık (weight/weight)
YTL.....	Yeni Türk Lirası
°C	Derece celsius
µm.....	Mikrometre
Ω	Ohm
\$	Dolar
%	Yüzde

1. GİRİŞ

1.1. Giriş

Bir toplumun gelişmişlik ölçülerini veren en önemli faktör harcadığı enerji miktarıdır. İnsanoğlunun gücünün yetmediği yerlerde uygulanmak üzere ilave enerji; sanayi, tarım, ulaşım, iletişim gibi sektörlerde kullanılması konusunda vazgeçilmez bir kaynaktır. Dolayısıyla bir ülkenin kalkınması, güçlenmesi, gelişmesi ve varlığını devam ettirebilmesi için enerjiye ihtiyaç vardır. Enerjisi kısıtlı olan ülkelerin dinamizmi ve gücü yoktur. Kendi kaynaklarından enerji temin edemeyen ülkeler enerji açıklarını kapatmak için enerjiyi ithal etmek zorundadır. Bu durum serumu bağlanmış hasta gibidir. Artık onun yaşamı, kendi kontrolünde değil dış faktörlere bağlıdır. Sanayileşmiş ülkelerde enerji tüketimi sanayisi gelişmemiş olan ülkelere nazaran daha yüksektir. Bu duruma paralel olarak enerji üretimleri de daha fazladır. İçinde bulunmuş olduğumuz yüzyılın bu ilk yıllarında sanayileşme ve toplumsal kalkınmanın insan yaşamının vazgeçilmez bir parçası haline gelmesi enerjinin önemini açıkça ortaya koymaktadır. Enerjinin, sanayileşmenin temel faktörlerden birisi olması, ihtiyaç duyulan enerjinin zamanında, yeterli ve bol miktarda teminini gerekli kılmaktadır.

İnsanlığın medeniyet tarihine bir göz atılırsa enerji türlerinin gelişerek artması ile medeniyetlerdeki bilim ve teknoloji de o ölçüde artmıştır ve değişim göstermiştir. İlk zamanlarda sadece temiz enerji kaynaklarından yararlanan insanlar, 18. yüzyılda endüstri devrimi ile beraber suyun buhar gücünden, daha sonra petrol, kömür, doğal gaz ve yine suyun hidroelektrik enerjisi şeklinde suyun gücünden yararlanı hale gelmişlerdir. Özellikle, fosil yakıtlar denilen kömür ve petrolün depolanabilmesi ve istenildiği zaman ve yerlerde istenildiği miktarlarda kullanılabilmesi, bu enerji kaynaklarının aşırı biçimde kullanılmasına sebep olmuştur. Enerji kaynaklarından istediği miktarlarda yararlanan insan, son 30 yıl içinde fosil yakıtların, insanın içinde yaşadığı atmosferin kimyasal yapısını değiştirerek uzun vade de insanoğlu aleyhine olabilecek küresel ısınma, sera etkisi, iklim değişikliği ve ozon tabakasının incilmesi gibi küresel boyutta sorunlarla karşılaşabileceğini anlamıştır. Bunun doğal sonucu olarak, fosil yakıtlarının kullanımının azaltılması ve bunun yerine çevre ve atmosferi kirletmeyecek doğal enerji

kaynakları ve onların teknolojik uygulamalarına yönelmesi özellikle 1973 yılındaki dünya petrol krizinden sonra önem kazanmaya başlamıştır. Bugüne kadar yakıt ihtiyacı fosil yakıtlar ve onların türevleri ile karşılanmıştır. Fosil yakıtların hızlı tüketimi ve rezervlerinin giderek azalması insanlığın gereksinimini karşılamada yetersiz kalacaktır. Dünyada petrol yakıtlarına 40, doğal gaz yakıtlarına 60 ve kömür yakıtlarına 250 yıl daha yaklaşık ömür biçilmektedir. Ancak insan popülasyonunun gelecek yıllardaki artışı göz önüne alındığında bu süreler daha da kısılacaktır. 20.y.y.’ın son çeyreği ve içinde bulunduğumuz 21.y.y.’ın ilk yıllarında hali hazır kullanılan fosil kökenli yakıtların tükenmeye meyilli olması nedeniyle alternatif enerji kaynakları arayışı konusunda büyük bir çalışma sergilenmekte olup yeni bir yakıt ve onun teknolojik uygulamalarına gereksinim vardır.

Fosil yakıtların yanması sırasında çevreye kirletici emisyonlar yayılmaktadır. Hidrojenin temiz bir yakıt olması, yanması sonucu fosil yakıtların neden olduğu türden bir kirliliğe yol açmamakla birlikte, yüksek verimi, bol miktarda bulunması ve depolanarak uzun mesafelere taşınabilmesi sayesinde birçok teknolojik uygulamalarda 21’inci yüzyılın tercihli alternatif yakıtı olacağı düşünülmektedir. Günümüzde yanmadan elektrik üretimine kadar çeşitli alanlara yanıt verebilen hidrojenin yakıt olarak kullanımı fosil kaynaklara göre daha maliyetlidir. Ancak küresel üretim yapılmadığından göreceli olan bu maliyet hidrojen çağına adım atılmasıyla birlikte hızlı düşüşü beklenmektedir. Bununla birlikte insanlığın ortak malı olan atmosferin kirlenmemesi için temiz, çevre dostu ve tükenmeyen denilebilecek ve içinde bulunduğumuz yüzyılın tüm dünya enerji tüketiminin hemen hepsinin karşılanması beklenen hidrojen enerji kaynaklarının araştırılması, geliştirilmesi ve teknolojik uygulamaları ile ilgili sistemlerin geliştirmesi çalışmalarına ağırlık verilmiştir.

Yaşamımızın vazgeçilmez bir parçası olan enerji son tüketiciye “yakıt” ve/veya “elektrik” biçiminde sunulmaktadır. İkincil enerji olan elektriğin çeşitli kullanım avantajlarının bulunmasına karşın, teknoloji elektriğe bağlı olduğu kadar, yakıt da bağlı olarak gelişmiştir. Birincil enerji kaynaklarının dönüştürülmesi ile elde edilen ikincil enerjilere, “enerji taşıyıcısı” da denir. Elektrik 20. yüzyıla damgasını vuran bir

enerji taşıyıcısı olmasına karşın, Hidrojen 21. yüzyıla damgasını vuracak bir enerji taşıyıcısıdır.

Hidrojen enerjisinin kullanıldığı teknoloji ve onun uygulamalarından bir tanesi yakıt hücreleridir. Yakıt hücreleri temiz, çevreye zarar vermeyen ve yüksek verime sahip enerji dönüşüm teknolojileridir. Bu teknoloji yalnızca kimyasal madde kullanarak elektrik enerjisi, ısı enerjisi ve su üretirler. Toplam verimlilikleri yüksek olan yakıt hücreleri elektro-kimyasal makinalar olarak da bilinirler.

Yakıt hücreleri, bünyesinde kullanılan elektrolitin cinsine göre çeşitli isimler almaktadır. Bunlar içerisinde proton değişim zarlı yakıt hücresi diğerlerine nazaran daha yüksek bir güç yoğunluğuna sahiptir. Dolayısıyla elektrik uygulamalarında daha elverişlidir.

1.2. Amaç

Bu tezin amacı; farklı besleme türlerine göre proton değişim zarlı yakıt hücrelerin her bir bileşeninin nasıl üretilebileceği ve bir araya getirileceği konu edilerek, bu üretim esnasında hangi zorluklarla karşılaşılacağı incelenmiştir. Ayrıca imalatı gerçekleştirilen farklı besleme türlerindeki proton değişim zarlı yakıt hücrelerinin ölçüm sonuçlarına yer verilmiştir. Ölçümler, proton değişim zarlı yakıt hücresinin çalıştırılması sonucunda terminallerinde oluşan akım ve voltaj sinyallerinin analog olması sebebiyle, bu sinyaller bir analog dijital dönüştürücü entegre olan 0808ADC yardımıyla dijitalle dönüştürülüp bilgisayarın paralel port girişine verilerek alınmıştır. Bunun neticesinde Turbo Pascal 7.0 ile hazırlanan bir bilgisayar program yazılımı yardımıyla bilgisayara gelen sinyallerin uygun dönüşümü ve işlemleri gerçekleştirilerek okunmuş ve proton değişim zarlı yakıt hücresinin değişik bazı ortam şartlarına göre voltaj-zaman grafiklerinin çizilmesi sağlanmıştır. Alınan ölçümler aynı zamanda “Mirocal Origin 6.0” grafik çizim programıyla da değerlendirilerek voltaj-akım ve güç-akım ve voltaj-akım grafikleri elde edilmiş ve yorumlanmıştır. Ayrıca proton değişim zarlı yakıt hücresinin ölçüm değerleri kullanılarak proton değişim zarlı yakıt hücresinin verim hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Buna ilaveten proton değişim zarlı yakıt hücresinin ürettiği güç başına maliyetine de yer verilmiştir.

2. HİDROJEN ENERJİSİ

2.1. Giriş

Hidrojen, evrende bulunan en basit ve en yaygın elementtir. Bilinen tüm yakıtlar içerisinde birim ağırlık başına en yüksek enerji içeriğine sahiptir. Sıvı haline dönüştürüldüğünde gaz halindeki hacminin sadece 1/700'ünü kaplar. Hidrojen, serbest haldeyken ve normal koşullar altında renksiz, kokusuz ve tatsız bir gazdır. Hidrojen molekülü 2 hidrojen atomundan oluşur. Temelde her bir atom bir proton ve bir elektrondan meydana gelir. Ancak doğada hidrojenin üç izotopu bulunur. Bunlar %99.985 oranıyla hidrojen-1 (protyum), %0.015 oranıyla hidrojen-2 (döteryum) ve eser miktar oranıyla hidrojen-3 (trityum) izotoplarıdır. Kimyasal olarak çok aktif olduğundan tek başına element olarak bulunması çok zordur. Bu yüzden, doğada genellikle diğer elementlerle bileşik halinde bulunur. Saf oksijenle yandığında sadece su ve ısı açığa çıkar. Hava ile yandığında ise bazı azot oksitler açığa çıksa da diğer yakıtlara göre kirliliği son derece azdır (<http://www.taek.gov.tr/taek/td/html/hidro.htm>; Anabritanica).

2.2. Hidrojenin Özellikleri

Renksiz ve kokusuz bir gaz olan hidrojen kimyasal elementler içerisinde yoğunluğu en az olan element olup, evrende bilinen toplam maddenin yaklaşık %80'ini oluşturmaktadır. Molekül ağırlığı 2.016×10^{-3} kg/mol ve yoğunluğu 0.084 kg/m^3 'tür. Hidrojen, 1 atm basınçta ve -252.8°C 'un altındaki sıcaklıklarda sıvı formda olup -259°C 'un altında katı formdadır. Hem sıvı formu hem de gaz formu için hidrojenin birim kütledeki enerji yoğunluğu 141.9 MJ/kg 'dır ve oldukça yüksektir. Sıvı hidrojenin birim hacminin enerji yoğunluğu 10.2 MJ/m^3 iken gaz hidrojenin birim hacminin enerji yoğunluğu 0.013 MJ/m^3 'tür. Hidrojenin diğer yakıtlarla enerji yoğunluklarının karşılaştırılması Çizelge 2.1'de verilmiştir (Barbir, 2000; Bockirs et al., 2002; Veziroğlu; <http://www.tusiad.org/turkish/rapor/enerji/html/sec14.html#Heading3>).

Çizelge 2.1. Hidrojenin diğer yakıtlarla enerji yoğunluklarının karşılaştırılması.

YAKIT		ENERJİ YOĞUNLUĞU	
		MJ/kg	MJ/m ³
SIVI	Benzin	47.4	34.85
	Metanol	22.3	18.1
	Etanol	29.9	23.6
	LPG	48.8	24.4
	Hidrojen	141.9	10.2
GAZ	Doğal Gaz	~ 50.0	~ 0.040
	Hidrojen	141.9	0.013

Hidrojen düşük yoğunluklu olduğundan, bir kaçak anında yer seviyesinde birikinti halinde kalmayıp atmosferde yükselir ve dağılır. Ayrıca hidrojen diğer yakıtlardan daha hızlı yayılır. Hidrojenin yakıt olarak bazı özellikleri, benzin ve metan ile karşılaştırılması Çizelge 2.2’de verilmiştir. Hidrojenin patlama için yakıt/hava oranı %13-18 seviyesinde olup, yakıtlar içerisinde birim depolanan enerji başına en düşük patlama enerjisine sahiptir. Hidrojenin yanması için havada hacimce %4-75 arasında olması gerekir (Barbir, 2000; Eral, 1998; Veziroğlu, 2003; Ültanır, 1996; Ün, 2003; www.youthforhab.org.tr).

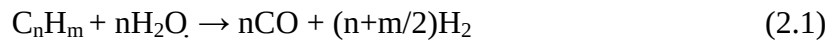
Çizelge 2.2. Hidrojenin, benzinin ve metanın yakıt özelliklerinin karşılaştırılması.

ÖZELLİK	BENZİN	METAN	HİDROJEN
Yoğunluk (kg/m ³)	4.4	0.65	0.084
Hava içindeki diffüzyonu (cm ² /s)	0.05	0.16	0.61
Sabit basınçtaki özgül ısı (J/gK)	1.2	2.22	14.89
Havada ateşleme sınırı (%hacim)	1.0-7.6	5.3-15	4-75
Havada ateşleme enerjisi (mJ)	0.24	0.29	0.02
Ateşleme sıcaklığı (°C)	228-471	540	585
Havada alev sıcaklığı (°C)	2197	1875	2045
Patlama enerjisi (gTNT/kJ)	0.25	0.19	0.17
Alev emmissivitesi (yayılabilirliği) (%)	34-42	25-33	17-25

2.3. Hidrojen Üretimi

Hidrojen evrende bulunan en bol elementtir. Buna rağmen hidrojenin atmosferdeki konsantrasyonu milyonda birden daha azdır. Hidrojenin çoğu kimyasal bağlarla bileşik halde bulunurlar. Bu sebeple hidrojen doğal bir yakıt olmadığından, büyük ölçekli kullanımı için su, kömür veya doğal gaz gibi birincil enerji kaynaklarından veya elektrik gibi ikincil enerji kaynaklarından yararlanılarak elde edilen sentetik bir yakıttır. Elde edilme işlemi için önemli ölçüde enerji tüketileceğinden, hidrojenin nasıl üretileceği büyük önem arz etmektedir. Buhar iyileştirme, elektroliz, hidrokarbonların kısmi oksidasyonu, radyoliz, foto-süreçler, atık gazların saflaştırılması, termokimyasal süreçler başlıca hidrojen üretim yöntemleridir (Barbir, 2000; Dinçer, 2002; Ün, 2003; Veziroğlu, 2000; www.youthforhab.org.tr).

Buhar iyileştirme; fosil yakıtlardan hidrojen üreten bir yöntem olup hidrojen üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Üretim biçimi iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada; doğal gaz, 392°C gibi yüksek sıcaklıkta su buharına maruz bırakılarak hidrojen, karbon monoksit ve karbon dioksit gazları elde edilir. İkinci aşamada ise; karbon monoksit, ilave su buharına maruz bırakılarak ilave hidrojen ve karbon dioksit gazları elde edilir. Bu iki aşamalı kimyasal tepkime Eşitlik (2.1) ve Eşitlik (2.2)'de verilmiştir;



şeklinde dir. Üretilen hidrojenin enerji içeriği, tüketilen doğal gazdan daha yüksektir. Ancak iyileştirmenin yapılması için yüksek miktarda enerji gerekmektedir. Bu nedenle net dönüşüm verimi %65 civarındadır (<http://www.taek.gov.tr/taek/td/html/hidro.htm>; Dinçer, 2002; Ün, 2003).

Elektroliz; sudan elektrik akımı geçirerek su moleküllerinin hidrojen ve oksijene ayrışmasını sağlayan hidrojen elde etme yöntemidir. Bu işlemde enerji kaybı nispeten azdır ve yaklaşık %65 enerji verimi elde edilir. Elektroliz mevcut hidrojen pazarında küçük bir paya sahip olsa da, temiz bir işlem olması ve suyun bol bulunması

nedeniyle büyük ilgi çekmektedir. Ancak, yüksek maliyet nedeniyle yakın ve orta vadede elektrolizin pazarda büyümesi sınırlı görülmektedir (Dinçer, 2002; Ün, 2003; <http://www.taek.gov.tr/taek/td/html/hidro.htm>).

Hidrokarbonların kısmi oksidasyonu; hidrojenin hidrokarbonların kısmi oksidasyonundan (örneğin gazifikasyon) elde edilir. Bu teknikte sıkıştırılabilen veya pompalanabilen hidrokarbon kaynağı kullanılmaktadır. Ancak sürecin toplam verimi %50 civarındadır ve saf oksijen gereklidir (Dinçer, 2002; Ün, 2003).

Radyoliz; bu metotta, nükleer reaktörde üretilen yüksek enerjili partiküller su moleküllerine çarptırılarak su molekülleri hidrojen ve oksijen atomlarına ayrıştırılır. Ayrışan hidrojen ve oksijen atomları çabuk bir şekilde tekrar su molekülüne dönüşebileceğinden radyolizin verimi %1 civarındadır (Dinçer, 2002; Ün, 2003).

Foto-süreçler; genellikle güneş ışığını kullanarak su veya biyo-kütleden hidrojen üreten süreçlerdir. Bu süreçler üç ana kategoriye ayrılır. Bunlardan birincisi, foto-biyolojik süreç olup, bazı bakteri, alg ve bitkiler ile fotosentez döngüsüne dayanarak, hidrojen üretim verimi %1-5 arasındadır. İkincisi, foto-kimyasal süreç olup, sentetik moleküllerin kullanılmasıyla doğal fotosentezi taklit eder ve %0.1 verimlidir. Üçüncüsü, foto-elektro-kimyasal süreç olup, yarıiletken maddeler ışığa maruz kaldığında gerilim farkı yaratır ve bu da suyun hidrojen ve oksijene parçalanmasını sağlar. Günümüzde hidrojen araştırma programlarının çoğunu foto-süreçler teşkil etmektedir (Dinçer, 2002; Ün, 2003).

Atık gazların saflaştırılması; petrol rafinerileri ve bazı kimyasal tesisler gibi bir çok endüstrinin atıklarının hidrojen konsantrasyonu oldukça yüksektir. Bu atık gazların toplanması ve saflaştırılması sonucunda atık gazlardan elde edilen hidrojen yine endüstride kullanılır. Bu uygulama mevcut hidrojen pazarının önemli bir bölümünü teşkil eder. Fakat gelecekte hidrojen kullanımı yaygınlaştıkça talebi karşılayacak yeterlilikte olmayacaktır (Dinçer, 2002; Ün, 2003).

Termokimyasal süreçler; Suyun hidrojen ve oksijene ayrışması için ısıнын kullanıldığı bir süreçtir. Basit bir uygulaması, suyun çok yüksek sıcaklığa (3400 K) ısıtılması ile doğrudan ısı dönüşümdür. Yüksek sıcaklık gerektiğinden, doğrudan ısı dönüşüm pratik bir süreç değildir. Kompleks ve çok basamaklı süreçler çalışılmaktadır. Ayrıca bir veya daha fazla tepkime basamağının elektrolizi içerdiği hibrit çalışmalar da yapılmaktadır (Dinçer, 2002; Ün, 2003).

2.4. Hidrojenin Depolanması

Hidrojen gaz veya sıvı hallerde depolanabilir. Sıvı forma dönüştürülen hidrojen, gaz formdaki hidrojenin yaklaşık olarak 1/700'ü kadar hacim kaplar. Bu durum, dar hacimde çok miktarda hidrojenin depolanabileceğini gösterir. Fakat buna karşılık hidrojenin sıvı formda depolanması, gaz formda depolanmasına nazaran daha fazla enerji gerektirir. Zira hidrojenin, sıvılaştırılması için -253°C 'ye kadar soğutulması gerekir, ki bu zor bir işlemdir. Hidrojenin -253°C sıcaklığa kadar soğutulması sırasında depoladığı enerjinin %25-30'u kadar bir enerji hidrojenin sıvılaştırılması için gereklidir. Bununla birlikte sıvılaştırılmış hidrojenin depolanması için bir takım yöntem ve cihazlarda gerekmektedir (<http://www.eksenotomasyon.com.tr/ARSIV/85/cevre.htm>; Ün, 2003; Dinçer, 2002; Ün).

Hidrojen, büyük ölçekli depolanabileceği gibi küçük ölçekli de depolanabilir. Büyük ölçekli depolama genellikle gaz ve sıvı formlarda gerçekleşir. Gaz formdaki hidrojen basınçlı olarak doğal gazın tükendiği veya sızmanın olmadığı yer altı mağaralarda yapılmaktadır. Sıvı formdaki hidrojen ise sıvı hidrojenin taşındığı tanklara benzer daha büyük tanklarda depolanır. Bu tanklar genellikle vakum-izoleli 100 m^3 ile 5000 m^3 hacimdeki küresel tanklardır. Küçük ölçekli depolama ise çeşitli yöntemlerle gerçekleşir. Bu depolama yöntemlerinin başlıcaları; sıkıştırılmış gaz olarak depolama, kriyojenik sıvı olarak depolama, metal hidrit olarak depolama, karbon adsorpsiyon olarak depolama ve cam mikro-kürelerde depolamadır (Ün, 2003; Ün).

Sıkıştırılmış gaz olarak hidrojenin depolanması; oda sıcaklığında, basınca dayanıklı tanklarda yapılmaktadır. Alçak basınç tanklarında 12 bar, yüksek basınç

tanklarında 150 bar'a kadar değişen tipleri vardır. Dolum istasyonlarında hidrojen gazının sıkıştırılması işleminde, hidrojenin enerji içeriğinin yaklaşık %20'si kadar bir enerji harcanmaktadır. Bu tekniğin depolama ağırlığının önemli olmadığı sabit sistemlerde veya kısa mesafede kullanılacak araçlarda kullanımı daha uygundur (Ün, 2003; Aydemir, 1998; <http://www.tusiad.org/turkish/rapor/enerji/html/sec14.html#Heading3>).

Kriyojenik (dondurulmuş) sıvı olarak hidrojenin depolanması; 1 atm basınçta ve 20 K sıcaklıkta izole edilmiş tanklarda gerçekleşir. İzolasyon, iç içe geçmiş iki tanktan, içtekini ostenitik paslanmaz çelik dıştakini karbon çelik oluşturacak şekilde, aralarının perlit ile doldurulup, 0.03 mbar değerine kadar vakumlanarak sağlanmaktadır. Hidrojen bu tanklarda 2.2 bar basınçlı olarak depolanır. Hidrojen sıvı formda olduğundan, eşdeğer ağırlıktaki gazolinden 3 kat daha fazla enerji içerir. Eşdeğer enerji içerdiği durumda ise 2.7 kat daha fazla hacim gerekir. Bu teknikte sistemin ağırlıkça yaklaşık %16'sını hidrojen oluşturur. Hidrojen gazının sıvılaştırılması işleminde, içerdiği enerjinin yaklaşık %40'ı kadarına ihtiyaç vardır. Diğer bir olumsuzluk ise izolasyona rağmen ısının tanka sızabilmesidir. Bu durum karşısında hidrojenin günlük %1-2 kadarı gaz forma dönüşerek kayıp olmaktadır (Aydemir, 1998; Ün, 2003; <http://www.pertas.net/PERLITMADENI.html>; http://www.bos.com.tr/tedarik_sivi.htm; <http://www.tusiad.org/turkish/rapor/enerji/html/sec14.html#Heading3>).

Metal Hidrit olarak hidrojenin depolanması; kimyasal bağlar şeklinde demir, magnezyum, nikel, manganez, titanyum gibi çeşitli granüler metaller veya magnezyum-nikel, magnezyum-bakır, demir-titanyum gibi granüler metal alaşımlar arasındaki boşluklarda sağlanır. Bu netice metal veya metal alaşımların soğutulmasıyla metalin veya metal alaşımlarının hidrojeni emerek depolanması ve tekrar ısıtılmasıyla hidrojeni serbest bırakarak kullanılır hale gelmesi ile gerçekleşir. Kullanılan metal veya metal alaşımına göre sistemin toplam ağırlığının yaklaşık %1-7 kadarını hidrojen oluşturur. Metal hidrit sistemleri, güvenilirdir ve az yer kaplarlar. Fakat bu sistemler sıkıştırılmış hidrojen gazı sistemleri ve kriyojenik sıvı hidrojen sistemlerine kıyasla daha ağır ve maliyetlidirler. Sıkıştırılmış hidrojen gazı veya kriyojenik sıvı depolamaya nazaran, metal hidritlere, hidrojenin yeniden depolanmasında daha az enerji gerekir. Fakat hidrojenin dışarıya salınımı için ısıtılarak enerji uygulanır. Hidrojenin metal veya metal

alaşımlarına absorpsiyon ve desorpsiyon tepkimeleri Eşitlik (2.3) ve Eşitlik (2.4)'te verilmiştir;



şeklindedir. Burada M element olarak metal veya metal alaşımını ifade etmektedir. Düşük sıcaklık ve yüksek sıcaklık hidritler vardır. Demir-titanyum düşük sıcaklık hidritine, magnezyum-nikel yüksek sıcaklık hidrite örnek verilebilir. Metal hidritlerin iyi birer depolayıcı olabilmesi için beklenen koşullar, metal veya metal alaşımının ucuz olması, birim hacim başına yüksek hidrojen depolama özelliğine sahip olması, metal veya metal alaşımın kolayca hidrojenle tepkimeye girmesi, metal hidritin veya metal alaşım hidritin oda sıcaklığında kararlı olması ve hidrojenin yüksek sıcaklıkta belirgin bir basınçta metalden veya metal alaşımından ayrılabilmesidir (Barbir, 2000; <http://www.tusiad.org/turkish/rapor/enerji/html/sec14.html#Heading3>; Aydemir, 1998; Ün, 2003; Temelci, 2000; Türe, 2001; Bilici, 2004).

Karbon adsorpsiyon tekniği ile hidrojenin depolanması; çapları 10-20 nm mertebesinde ve boyları mikron civarında olan karbon nanotüplerde gerçekleşmektedir. Hidrojen, nanotüplere de iki şekilde depolanabilmektedir. Zayıf Van der Waals bağ sonucu fiziksel depolama veya kovalent bağ sonucu kimyasal depolamadır. Hidrojenin fiziksel depolama sonucu, düşük ısı enerjisi ile geri alınabileceği gibi alınan miktar kadar hidrojen tekrardan geri nanotüplere de depolanabilmektedir. Kimyasal depolama sonucu ise hidrojen yüksek ısı enerjisine ihtiyaç vardır. Sistem ağırlıkça %4 hidrojen içerir (Ün, 2003; Ün; Güvendiren, 2003).

Cam mikro-kürelerde hidrojenin depolanması; çapları 25-500 nm arasında değişen, içi boş ve duvar kalınlığı yaklaşık olarak 1 nm olan küçük cam küreler ile sağlanmaktadır. Bu cam mikro-küreler 200-400°C 'a ısıtılmak suretiyle cam duvarlar geçirgenleşerek hidrojen küre içerisine geçer. Bu küreler soğutulduğunda geçirgenliği ortadan kalkar ve hidrojen cam mikro-küre içerisine hapsedilmiş durumda kalır. Bu

cam mikro-küreler ağırlıklarının yaklaşık %10 kadarını hidrojen oluşturmaktadır. Kullanılacağı zaman bu cam mikro-küreler ısıtılır ve hidrojen tekrar açığa çıkar. Ancak cam mikro-küreciklerin dezavantajları yüksek basınç altında çatlamalarıdır (Ün, 2003; Dinçer, 2002; Ün; Koca, 1998).

Depolama tekniklerinin, eşdeğer ısı miktarı yönünden, 30 lt benzine göre karşılaştırılması Çizelge 2.3'te verilmiştir (Aydemir, 1998).

Çizelge 2.3. Eşdeğer ısı miktarınca benzinin diğer yakıtlarla ağırlıklarının kıyaslanması.

YAKIT	YAKIT MİKTARI		TANK KÜTLESİ	TOPLAM KÜTLE
	Hacim (lt)	Kütle (kg)	(kg)	(kg)
Benzin	30	22	5	27
Gaz H ₂ (1150bar)	670	8.27	755	763
Sıvı H ₂	117	8.2	65	73
Metal Hidrit	-	8.2	764	772

2.5. Hidrojenin Taşınması

Hidrojen gazı, doğal gaz veya hava gazına benzer olarak borular aracılığıyla her yere kolaylıkla ve güvenli olarak taşınabilmektedir. Doğal gaz için kurulan yeraltı boru dağıtım ağının ileride çok az bir değişiklik ile hidrojen içinde kullanılması olanaklıdır. Boru hatları dışında hidrojen, basınçlı gaz olarak veya sıvılaştırarak tankerlerde kara, deniz, demir yolu gibi kanallarla taşınabilir (<http://www.youthforhab.org.tr/tr/yayinlar/enerji/hidrojen/idealh2.html>).

Hidrojen gazı, 16 bar basınç altında, hacmi 7.5 m³ 'e varan çelik gaz silindirler içinde veya 700-5100 m³ hacmindeki yüksek basınçlı gaz tankerleriyle ticari olarak taşınmaktadır. Gaz hidrojenin büyük ölçekteki sevkıyatı için, 50 bar basınçta çalıştırılan mevcut doğal gaz hatlarının kullanılması da mümkündür (Gregory, 1972).

Sıvı hidrojen iletimi, içinde sıcaklığın -252°C düzeyinde tutulduğu 36 ve 107 m³ kapasitede ve düşük sıcaklık teknolojisi normlarına göre yalıtılmış özel tanker vagonlarla demir yolu ile gerçekleştirilmektedir. Deniz yoluyla büyük ölçekte sıvı

hidrojen iletimi üzerinde de çalışmalar yapılmaktadır. Karmaşık teknoloji gereksinimine rağmen hidrojenin sıvı fazda iletiminin en ekonomik taşıma yöntemi olduğuna inanılmaktadır (Sherif et al., 1997; Bockris et al., 2002; Dooley, 1999).

2.6. Hidrojenin Güvenliği

Hidrojen, diğer yakıtlardan farklı güvenlik donanımı ve prosedürü gerektirse de onlardan daha fazla tehlikeli değildir. Dünyada hidrojen petrol ve kimya endüstrisinde veya başka yerlerde güvenle kullanılmaktadır. Hidrojen güvenlik sıralamasında doğal gazın önündedir. Yanma ürünü zehirli özellik taşımamaktadır (Dinçer, 2002).

Hidrojenin fiziksel özelliklerinden dolayı güvenlik karakteri diğer yakıtlardan oldukça farklıdır. Hidrojen düşük yoğunluğu sebebiyle bir kaçak anında atmosferde yükselir ve dağılır. Kapalı alanlarda meydana gelebilecek sızıntılar karşısında iyi havalandırma uygulanarak güvenlik artırılabilir ve böylece tehlike seviyesi de azalmış olur. Ancak sızıntı belirleme teknikleri ile de güvenlik artırılabilir. Hidrojen temiz ve kokusuz olduğu için, sızıntısı diğer yakıtlara göre daha az fark edilmektedir. Doğal gazı uygulandığı gibi kokulu bir maddenin veya renklendiricinin veya her ikisinin hidrojene eklenmesi yapılabilir. Ancak yapılacak herhangi bir ekleme saf hidrojenin çevresel açıdan temizliğini bozar (Eral, 1998; Bockris et al., 2002; www.youthforhab.org.tr; Veziroğlu, 2003; Ün, 2003; Dinçer, 2002; Barbir, 2000).

Hidrojenin düşük yoğunluklu olması demek, aynı zamanda belirli bir hacimde patlayan diğer yakıtlardan daha az enerji verecek demektir. Patlama için yakıt/hava oranı hidrojen için %13-18'dir ve bu oran doğal gazın sahip olduğu orandan 2 kat daha büyüktür. Yakıtlar içerisinde hidrojen, birim depolanan enerji başına en düşük patlama enerjisine sahiptir. Ayrıca hidrojen diğer yakıtlardan daha hızlı yayılır ve böylece tehlike seviyesi de azalmış olur (Barbir, 2000; Dinçer, 2002).

Hidrojenin diğer yakıtlarla emniyet faktörü açısından kıyaslanması Çizelge 2.4'te yer almaktadır. Yakıtın zehirliliği, yanma ürünlerinin zehirliliği, difüzyon katsayısı, ateşleme enerjisi, patlama enerjisi ve alev yayılabilirliği gibi faktörlere göre

yapılan emniyet değerlendirmesi açısından, hidrojen en emniyetli yakıttır. Hidrojenin emniyet faktörü 1 iken, benzinde 0.53 ve metanda 0.80 olmaktadır. Kısacası benzin ve metan, hidrojene göre tehlikeli yakıtlardır. Hidrojenin, benzin ve metana göre yanma tehlikesi daha azdır (<http://www.tusiad.org/turkish/rapor/enerji/html/sec14.html#Heading3>).

Çizelge 2.4. Hidrojenin diğer yakıtlarla emniyet faktörünün kıyaslanması.

ÖZELLİK	BENZİN	METAN	HİDROJEN
Yakıtın zehirliliği	3	2	1
Yanma ürünlerinin zehirliliği	3	2	1
Yoğunluk	3	2	1
Difüzyon katsayısı	3	2	1
Özgöl ısı	3	2	1
Ateşleme sınırı	1	2	3
Ateşleme enerjisi	2	1	3
Ateşleme sıcaklığı	3	2	1
Alev sıcaklığı	3	1	2
Patlama enerjisi	3	2	1
Alev emissivitesi (yayılğanlığı)	3	2	1
TOPLAM PUAN	30	20	16
EMNİYET FAKTÖRÜ	0.53	0.8	1
1 : En emniyetli 2 : Daha az emniyetli 3 : En az emniyetli			

2.7. Hidrojenin Çevresel Etkileri

Hidrojen kullanımı çok temiz bir yakıttır. Hidrojenin yanarak yakıt hücresinde tüketilmesi sonucu son ürün olarak sadece su üretilir. Yanma yüksek sıcaklıkta olursa havadaki azot ve oksijenden NO_x oluşabilir. Ancak bu sorun diğer yakıtlarla aynıdır. Diğer yakıtların aksine hidrojen elementlerden üretilen kirletici içermez. Bu nedenle de SO₂, CO, CO₂ gibi kimyasallar oluşmaz. Çizelge 2.5'te farklı enerji sistemlerinden üretilen kirleticilerin miktarları görölmektedir (Dinçer, 2002; Veziroğlu, 2003; www.youthforhab.org.tr).

Çizelge 2.5. Farklı enerji sistemlerinden üretilen kirleticilerin miktarları.

KİRLETİCİ	FOSİL YAKIT (kg/GJ)	KÖMÜR/SENTETİK FOSİL (kg/GJ)	HİDROJEN (kg/GJ)
CO ₂	72.40	100.00	0
CO	0.80	0.65	0
SO ₂	0.38	0.50	0
NO _x	0.34	0.32	0.10
HC	0.20	0.12	0
Partikül	0.09	0.14	0

Hidrojen fosil yakıt kullanarak buhar iyileştirme ile üretilirse, oluşacak karbondioksit miktarı, fosil yakıt direkt yakıldığında oluşacak emisyon miktarından yüksektir. Ayrıca buhar iyileştirmede kükürt gibi fosil yakıtın içerdiği safsızlıklarda kirletici emisyonu neden olmaktadır. Elektroliz yöntemi kullanıldığında ise elektroliz işleminin sürebilmesi için gerekli elektriğin ne şekilde temin edildiği önem taşımaktadır. Hidrojenin biyokütleden, solar enerjiden veya diğer yenilenebilir kaynaklardan üretimi emisyon miktarını azaltır (Dinçer, 2002).

Uçaklarda hidrojenin kullanımı sonucunda oluşacak su buharı emisyonu tehlikeli olabilir. Ortalama yükseklik ve enleme bağlı olarak buz bulutları oluşur ve bu bulutlarda sera etkisine ve ozon tüketimine neden olurlar. Hidrojen geniş bir aralıkta alev alma sıcaklığına sahip olduğundan NO_x emisyonu motor tasarımları değiştirilerek azaltılabilir.

Dünyada deniz ve nehirlerden su buharlaşması yılda yaklaşık $5 \times 10^{14} \text{ m}^3$ 'tür. Eğer günümüzde insanlığın toplam enerji tüketimi olan 11 TW, hidrojen ile sağlanırsa yıllık su buharlaşması yaklaşık $2.5 \times 10^{10} \text{ m}^3$ olur. Bu değer doğal buharlaşmanın 1/20,000 kadardır (Momirlan et al., 2002).

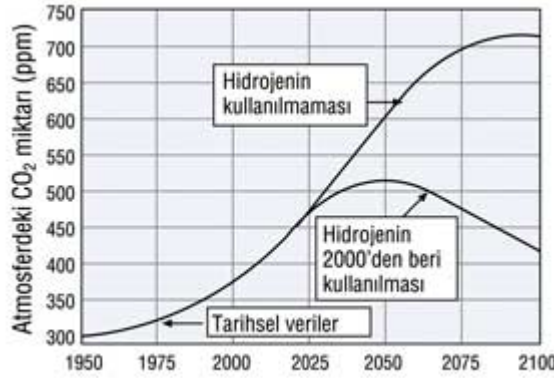
Yakıtlar için önemli olan bir özellik de çevresel uygunluktur. Fosil yakıt kullanımının hava kalitesi, insanlar, hayvanlar, ormanlar, insan yapısı yapılar, açık madencilik, iklim değişikliği ve deniz seviyesi yükselmesi gibi olumsuz etkilerinden

kaynaklanan çevre zararları vardır. Çevresel zarar ve çevresel uygunluk faktörü için fosil yakıt sistemi, kömür/sentetik yakıt sistemi ve güneş-hidrojen sisteminin karşılaştırılması Çizelge 2.6’da yer almaktadır. Çizelge 2.6’dan görüldüğü gibi güneş-hidrojen üretim sisteminde çevresel uygunluk faktörü 1 alındığında diğer enerji sistemlerinin çevresel uygunluk faktörünün bu değerden küçük olduğu görülmektedir (Ültanır, 1998).

Çizelge 2.6. Enerji sistemlerinin çevresel uygunluk faktörü.

ENERJİ SİSTEMİ	YAKIT	ÇEVRESEL UYGUNLUK FAKTÖRÜ
Fosil Yakıt	Kömür	0.047
	Petrol	0.054
	Doğal Gaz	0.082
Kömür/Sentetik Yakıt	Sentetik Gaz	0.033
	Sentetik Doğal Gaz	0.050
Güneş-Hidrojen	Hidrojen	1.000

Hava kirliliğinin insan sağlığı üzerindeki etkileri düşünüldüğünde, fosil yakıt yerine hidrojen kullanılması ile fiziksel sağlık şartlarında iyileşmeler olacaktır. Enerji üretimi sırasında CO₂ emisyonunun azaltılması veya atmosferdeki CO₂ konsantrasyonunun düşürülmesi sağlanabilir. Atmosferdeki CO₂ konsantrasyonunun düşürülmesi, teknik ve ekonomik olarak fotosentez ile sağlanabilir. Hidrojenin yaşamımıza girişi ile atmosferdeki CO₂ miktarının değişimi Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi, hidrojene geçişle CO₂ miktarı önemli ölçüde azalmaktadır, ve eğer 2025 yılında hidrojene geçilirse, atmosferdeki CO₂ miktarı 2100 yıllarında 420 ppm civarında olacaktır. Hidrojene geçişin olmaması durumunda ise bu miktar 720 ppm civarında olacaktır (Momirlan et al., 2002).



Şekil 2.1. Atmosferdeki CO₂ miktarının hidrojen kullanımı ile değişimi.

2.8. Hidrojenin Kullanım Alanları

Birçok uygulama için, hidrojen bir enerji taşıyıcısıdır. Fosil yakıtların kullanıldığı her yerde hidrojen kullanılabilir. Genel olarak hidrojen; ulaştırma için uygun, diğer enerji türlerine dönüştürülebilirliği iyi, kullanım verimi yüksek, çevre ile uyumlu ve emniyetli bir yakıttır (Aydemir, 1998; Gürsoy,1999; Tübitak).

Bir yakıtın her yerde, örneğin, sanayide, evlerde ve taşıtlarda kullanılabilmesi büyük önem taşımaktadır. Hava yada oksijen ile birlikte yakılarak evlerde ısıtma amaçlı olarak kalorifer, fırın ve şofbenlerde doğal gaz yerine rahatlıkla kullanılabilmektedir (Anonim, 1992).

Motor yada gaz türbiniyle bir jeneratörü tetikleyerek veya yakıt hücresi olarak kullanılmasıyla yüksek bir verim ile elektrik üretilebilir. Yakıt hücreleri konusunda yapılan yoğun çalışmalar sonucu bu alanda büyük ilerlemeler sağlanmıştır. Hidrojen yakıtının içten yanmalı motorlarda, yani otobüs, kamyon, otomobil, traktör ile tarım makineleri gibi tüm taşıtlarda kullanılabilmesi, sınırlı rezerve sahip petrol ürünlerinin yerini alması ve çevreye dost bir enerji olması, son yıllarda özellikle araç üreten şirketlerin büyük ilgi çekmesine sebep olmaktadır. Yakıt pilleri, hidrojenden enerji elde edilmesi için geliştirilen bir teknolojidir. Yakıt pillerinde elektroliz süreci tersine çevrilerek, hidrojenle oksijen elektro-kimyasal bir süreçle birleştirilir. Bunun sonucunda

elektrik, su ve ısı açığa çıkar. ABD'nin uzay programında uzay araçlarına enerji sağlamak için onlarca yıldır yakıt pilleri kullanılmaktadır. Otomobil ve otobüsleri çalıştıracak güçte yakıt pilleri geliştirilmiştir ve geliştirilmeye devam edilmektedir (<http://www.eksenotomasyon.com.tr/ARSIV/85/cevre.htm>; Anonim, 1992).

Hidrojen, sürekli üretim yapamayan (güneş, rüzgâr) yada enerji tüketim merkezlerinin çok uzağında inşa edilen (hidroelektrik, jeotermal) enerji üretim tesislerinde üretilen enerjinin tamamının yada o an için kullanılmayan kısmının depolanması için kullanılabilir (<http://www.eksenotomasyon.com.tr/ARSIV/85/cevre.htm>).

Hidrojen roket yakıtı olarak kullanılmakta olup uçaklarda da kullanılmaya başlanmıştır (Pohl et al., 1997).

2.9. Hidrojenin Dünyadaki ve Türkiye'deki Durumu

Dünyada pek çok ülkede, hidrojen enerji araştırma programları yürütülmektedir. Bu ülkeler içerisinde Almanya, ABD, Japonya, İtalya gibi ülkeler yer almaktadır. Yapılan çalışmalar hükümet bazında olduğu gibi özel sektörlerce de yürütülmekte ve desteklenmektedir.

Almanya ilk zamanlar yakıt hücreleri ve hidrojen teknolojileri yenilenebilir enerji kaynakları araştırmaları adı altında çalışma sergilerken, 1997 yılından itibaren konuyu ciddiyetle ele alarak ayrı bir araştırma alanı olarak olaya yaklaşmıştır ve 1997 yılı için hidrojen enerjisi ve teknolojik uygulamalarına 10 milyon \$ 'lık bir bütçe ayırmıştır. Almanya hükümeti tarafından desteklenen yakıt hücresi araştırmaları, sanayi ve bilim çevreleri ile işbirliği yapılarak iki ana proje üzerinde ilerlemektedir. Bunlardan birincisi, enerji üretim ve dağıtım şirketlerinin ihtiyaç duyduğu, özellikle dağıtımda kullanılmak üzere, 0.2-5 mW aralığında yakıt hücrelerinin geliştirilmesine yönelik katı oksit yakıt hücresi (SOFC - Solid Oxide Fuel Cell) geliştirme projesi ve ikinci olarak da, özellikle taşıtlarda kullanılmak üzere, proton değişim zarlı yakıt hücresi (PEMFC - Proton Exchange Membrane Fuel Cell) geliştirme projesidir. Devlet destekli hidrojen AR-GE çalışmaları; hidrojen üretimini, depolanmasını ve kullanımını geliştirmeye

yönelik sistem ve bileşenlerin geliştirilmesine yönelik yapılmaktadır. Hidrojen araştırmaları uzun dönem enerji stratejileri ile uyumludur. Ayrıca Almanya, Suudi Arabistan ile ortak yürüttüğü bir program ile Suudi Arabistan'da solar hidrojen üretim tesisi kurulması planlanmaktadır. Suudi Arabistan solar hidrojeni sürekli ihraç etmeyi planlamaktadır (Runci, 1999; Abaoud et al., 1998).

Japonya, 1997 yılı için hidrojen araştırmalarına 14.2 milyon \$ ayırmıştır. Öngördükleri program çerçevesinde, yenilenebilir enerji kaynakları kullanımıyla üretilen elektrik kullanılarak elektroliz yoluyla hidrojen üretilmesi ve bu sayede salınım yapmayan bir enerji sisteminin kurulması planlanmaktadır. Bunun haricinde hidrojenin depolanması ve taşınmasına yönelik araştırmalar da devam etmektedir. Program kapsamında; hidrojen-oksijen yakma türbinleri, hidrojen türbin kanatlarının soğutulması, kömürden hidrojen ve yüksek hidrojenli yakıt üretimi ve yakıt hücreleri araştırmaları da yapılmaktadır. Yalnızca yakıt hücrelerinin geliştirilmesine yönelik araştırmalara 1997 yılı için 33.69 milyon\$ ayırmıştır. Japonya hidrojen enerji sisteminde ilerleme sağlamak için 2020 yılına kadar 4 milyar \$ harcamayı planlamaktadır. Aynı zamanda, gelecekte de Pasifik denizinin ekvator bölgesinde yapay bir adada solar radyasyon kullanarak deniz suyundan elektrolizle hidrojen üretmeyi planlamaktadır (Dooley, 1999; Hijikata, 2002).

İtalya, yürütmüş olduğu programda yakıt hücresi araştırmalarına 1998 yılı için 6.1 milyon\$ ayırmıştır. Bu program kapsamında Milano yakınlarında 1.3 MW 'lık yakıt hücreleri ile çalışan bir tesis kurulmuştur. Bu tesis doğal gazla çalışmakta olup doğal gazdan ürettiği hidrojen bakımından zengin gazla yakıt hücrelerini beslemektedir. 1994'den beri İtalya yakıt hücresi araştırmaları, iki tip yakıt hücresi üzerinde yoğunlaşmıştır. Bunlar erimiş karbonatlı yakıt hücresi (MCFC- Molten Carbonate Fuel Cell) ve proton değişim zarlı yakıt hücresi (PEMFC) dir. Bunlara ek olarak 1990-1994 yılları arasında İtalyan hükümeti özellikle Milano'daki tesiste kullanılmak üzere fosforik asit yakıt hücrelerinin (PAFC- Phosphoric Acid Fuel Cell) geliştirilmesi için yakıt hücresi AR-GE çalışmalarına yaklaşık 22 milyon \$ harcamıştır. 1990'dan beri devam eden PEMFC programı devlet ve sanayi işbirliği ile yürütülmektedir. Program, 2004 yılına kadar yakıt hücresi ile çalışan bir taşıt üretilmesi hedefine yöneliktir.

2000-2004 yılları arasında projenin ihtiyaç duyduğu yatırım miktarı 108.5 milyon \$'dır. MCFC programı da sanayi ile işbirliği altında yürütülmektedir. Bu program çerçevesinde 100 kW kapasiteye sahip yakıt hücreleri üretilmiştir ve programın hedefi 500 kW 'lık yakıt hücreleri üretmektir. Teknolojinin 2008 yılına kadar ticari hale gelmesi hedeflenmektedir. Bu projenin bütçesi gelecek beş yıl için her yıl başına 5.4-24.4 milyon\$ 'lık yatırım gerektirmektedir (Evans, 1999).

ABD, 1998 yılı bütçesinde hidrojen enerjisi araştırmalarına 19.1 milyon \$ ayırmıştır. Hidrojen programının ana hedefi, hidrojen üretiminin daha ekonomik hale gelmesini sağlamak ve çevresel etkilerini en aza indirmektir. Program, sanayi ile işbirliği içersinde, metandan daha temiz ve daha ucuz hidrojen üretmeye yönelmiştir. Karbon içermeyen kaynaklardan hidrojen üretimine yönelik çalışmalar da yapılmaktadır. Ayrıca hidrojenin güvenli ve ekonomik olarak taşınması, depolanması ve taşıtlarda kullanılmasına yönelik araştırmalar da yapılmaktadır (Dooley, 1999).

Petrol şirketleri enerji ortamı olarak hidrojene kuşku ile bakmakla beraber son yıllarda bu bakış açısı değişmiştir. Petrol şirketlerinden Shell, Shell-Hydrogen adını verdikleri bir kuruluşla hidrojen konusunda araştırmalara başlamıştır. Bu araştırmalar için 500 milyon \$ yatırım yapmıştır. Diğer bir petrol firması olan BP'de benzer bir girişimde bulunmuştur (Bockris et al., 2002).

Türkiye'nin henüz ulusal bir hidrojen programı bulunmamaktadır. Buna rağmen hidrojen ile ilgili çalışmalar bazı üniversitelerimiz ve araştırma kuruluşlarımızda çok sınırlıda olsa ele alınmaktadır. Türkiye'de hidrojenin taşınması, depolanması, üretimi ve uygulama alanları ile ilgili olarak değişik üniversitelerde yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları; değişik gaz karışımları ve hidrojenin boru ile taşınması, hidrojen-metan kombinasyonunun yakılması, sıvı hidrojen tanklarında basınç yükselmesinin incelenmesi, doğal gaz motorlarında yakıtı hidrojenin katılmasının etkileri, hidrojen eldesi için güneş hücrelerinin kullanımı, hidrojenin fotokimyasal yolla üretimi şeklindedir (<http://www.youthforhab.org.tr/tr/yayinlar/enerji/hidrojen/trcalismalar.html>).

2.9.1. Uluslararası Hidrojen Enerjisi Teknolojileri Merkezi

21 Ekim 2003 tarihinde Viyana’da Türkiye adına Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanı Dr. Mehmet Hilmi GÜLER ile Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Örgütü (UNIDO) arasında Uluslararası Hidrojen Enerjisi Teknolojileri Merkezi’nin (ICHET) kurulmasına ilişkin anlaşma imzalanmıştır. Bu anlaşma, geleceğin enerjisi olarak adlandırılan hidrojen ile ilgili dünyanın en büyük araştırma merkezi İstanbul’da kurulmasına yol açmıştır. Bu merkez bir hibe fonuna sahip olacaktır. 2004 yılı için ön görülen 40 milyon \$ ’lık hibenin 1.5 milyon\$ ’ın ve merkez için gerekli arsa ile bina Türkiye tarafından karşılanacaktır. 2004 yılı itibari ile faaliyete geçen merkezin müdürlüğüne dünyanın önde gelen hidrojen uzmanı, Miami Üniversitesi Temiz Enerji Enstitüsü Başkanı, Türk bilim adamı Prof. Dr. Nejat VEZİROĞLU üstlenecektir (<http://www.enerji.gov.tr/detay.asp?id=63>).

ICHET’in başlıca amaçları; kalkınmış ve kalkınmakta olan ülkeler arasında bir köprü vazifesi görerek; hidrojen araştırma, geliştirme ve yatırımcı kuruluşlar arasında bir koordinasyon 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 adamlarını ve uzmanlarının doğrudan katkılarını sağlamak, kalkınmakta olan ülkelerin AR-GE merkezlerinin ve programlarını desteklemek ve hidrojen teknolojileri alanındaki yatırımları teşvik etmektir (<http://www.enerji.gov.tr/detay.asp?id=63>).

ICHET’in faaliyetleri; uzun ve kısa dönemli atölye çalışmaları, bilimsel toplantılar, bilim adamları ve uzmanların katılacağı uygulamalı eğitim programları düzenlemek, AR-GE ve teknoloji transferi yapmak, danışmanlık hizmeti sunmak, endüstri ile işbirliği yapmak, hidrojen enerjisi teknolojilerini tanıtmak amacıyla katılımcı ülkelere teknolojik çalışmalar, teknoloji izleme ve tahmini, AR-GE, teknoloji transferi, eğitim, burs ve danışmanlık hizmeti sağlamaktır (<http://www.enerji.gov.tr/detay.asp?id=63>).

ICHET'in çalışma kapsamı; hidrojen enerjisi politikası oluşturulması, büyük miktarlarda hidrojen üretimi ve hidrojen enerji teknolojilerinin uygulanmasının ve çevresel çalışmaların ekonomik analizi, diğer yenilenebilir enerji sistemleriyle hidrojen üretim tekniklerinin entegre edilmesi, hidrojen depolama teknikleri, klima sistemleri ve hidrojen depolamada hidrojen hidratlarının kullanımı, boru ile hidrojen nakli, sıvı hidrojen teknolojileri, hidrojenle çalışan taşıtlar (otobüsler, kamyonlar, otomobiller, iki ve üç tekerlekli taşıtlar), yakıt hücresi uygulamaları, hidrojen alt yapısı geliştirilmesi, kimyada enerji üretiminde, gaz petrol endüstrisinde ve metalürjide hidrojen uygulamaları bulunmaktadır (<http://www.enerji.gov.tr/detay.asp?id=63>).

3. YAKIT HÜCRELERİ

3.1. Giriş

Günümüzde enerji büyük oranda fosil kökenli yakıtların yanmaları sonucu elde edilmektedir. Bu yakıt türlerinin yanmaları sonucu, çevreyi olumsuz yönde etkileyen emisyonlara neden olmaktadır. Bu emisyonlar yer küremizde dönüşü çok zor veya hiç olmayan büyük zararlara yol açabilmektedir. Bu zararların önüne geçebilmek için ekolojik denge ile uyumlu temiz yakıt türleri ve temiz enerji dönüşüm teknolojilerine ihtiyaç vardır. Yakıt hücreleri temiz, çevreye zarar vermeyen ve yüksek verime sahip enerji dönüşüm teknolojileridir. Bu teknoloji yalnızca kimyasal madde kullanarak elektrik enerjisi üretirler. Toplam verimlilikleri %80'lere kadar ulaşabilen yakıt hücreleri elektro-kimyasal makineler olarak da bilinirler. Ürün olarak elektrik, ısı ve su elde edilmesi ve özellikle minimum seviyedeki emisyonları yakıt hücrelerini avantajlı kılmaktadır. Yakıt hücreleri taşınabilir sistemlerde kullanılabileceği gibi sabit sistemlerde de kullanılabilmektedirler (Ar, 1998).

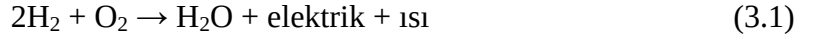
3.2. Yakıt Hücrelerinin Tarihsel Gelişimi

Yakıt hücreleri kavram olarak 150 yıldan daha uzun zaman öncesinden bilinmesine rağmen, güç üretimi alanında ancak son yıllarda önem kazanmıştır. Yakıt hücresi fikri ilk olarak 1839 yılında suyun elektrolizi konusunda çalışmalar yapan William Grove tarafından ortaya atılmıştır. Grove elektrik üretmek amacıyla hidrojeni oksijen ile tepkimeye sokarak elektroliz işlemini tersine çevrilebileceğini göstermiştir. Ludwig Mond ve Charles Langer 1889 yılında hava ve endüstriyel kömür gazını kullanarak ilk pratik cihaz oluşturmak üzere girişimde bulunmuşlardır. Kömür veya karbonu doğrudan elektriğe çevirebilecek yakıt hücrelerinin yapımı, malzeme ve elektrot kinetiği konularının anlaşılabilmesi nedeniyle 20. yüzyılın başlarına kadar başarısız olmaya devam etmiştir. Bu yıllarda içten yanmalı motorların geliştirilmesi, petrolün keşfedilmesi ve kullanımının yaygınlaşması enerji üretiminde kullanılabilecek elektro-kimyasal yaklaşımları geri plana itmiştir (Ar, 1998).

İlk başarılı yakıt hücresi 1932 yılında Francis Bacon'un çalışmalarının sonucunda ortaya çıkmıştır. Bacon, Mond ve Langer tarafından gerçekleştirilen bir hidrojen/oksijen hücresi, pahalı bir platin katalizör, düşük korozyon olan bir alkali elektrolit ve pahalı olmayan nikel elektrolit kullanılarak oluşturulmuştur. Teknolojik yetersizlikler sebebiyle ancak 1959 yılında, Bacon ve çalışma arkadaşları, bir kaynak makinasına güç sağlayan 5 kW'lık bir sistem kurmayı başarmıştır. Aynı yıl "Allis-Chalmers Manufacturing Company" 'de çalışan Harry Karl Ihring 20 beygir gücünde, yakıt hücresi ile çalışan bir traktör demonstrasyonunu gerçekleştirmiştir. 1950'lerin sonlarında o zamanlar az bilinen federal bir büro olan "National Aeronautics and Space Administration" (NASA) insanlı uzay araçları için panellere güç sağlamak üzere araştırmalar başlatmıştır. Çok riskli olduğu için nükleer reaktörlerin, çok ağır ve kısa ömürlü olmaları nedeni ile akülerin ve hantal olmaları nedeniyle güneş enerjisinin terk edilmesiyle NASA enerji kaynağı olarak yakıt hücrelerine önem vermiştir. Bugüne kadar yakıt hücrelerini çeşitli yönleriyle inceleyen 200'den fazla araştırma NASA tarafından desteklenmiştir. Bugün Apollo ve Space Shuttle görevlerinde güvenli bir şekilde elektrik sağlamış olmaları nedeniyle yakıt hücreleri uzaydaki rolünü ispatlamış bulunmaktadır. Bu başarılar, 1960'lı yıllarda, yakıt hücrelerinin dünyanın enerji problemlerinin tümüne çözüm olabileceği tahminlerine yol açmıştır. Uzay araştırmaları için yakıt hücrelerini ideal yapan özellikler grubunda yer alan küçük boyutu, yüksek verimi, düşük emisyonu, su üretimi gibi konulara sabit güç üreticilerini yönlendirmiştir. Yakıt hücrelerinin sabit uygulamalarında kullanılmasının önünde duran engellerin kaldırılması amacı ile yaklaşık olarak, 30 yıl süre ve 1 milyar \$ para harcanmıştır. Uzay uygulamalarında kullanılan çeşitlerinde olduğu gibi bir alkali elektrolitin kullanılmasının çok saf hidrojen gerektirmesi, doğal gaz veya kömür gibi yaygın yakıtların kullanılmasında problemlere neden olmaktadır. Ayrıca bu tür yakıtların kullanılması, NASA tasarımına benzer hücrelerdeki elektro-kimyasal bileşenlerin kullanım süresini de azaltmaktadır. Son yıllarda "Electric Power Research Institute", "American Gas Association", "Gas Research Institute" gibi çok sayıda üretici, elektrik ve gaz hizmet dağıtım grupları ve çeşitli federal kuruluşların çok sayıda girişimleri ile uygulama, araştırma ve geliştirme çalışmalarına destek verilmiştir. Buna paralel olarak Avrupa ve Japonya'daki çabalarda aynı şekilde artan destek görmüş olup, şu anda bir çok önemli proje yürütülmektedir (Ar, 1998).

3.3. Yakıt Hücresi Çeşitleri, Yapısal Bileşenleri ve Çalışma Prensipleri

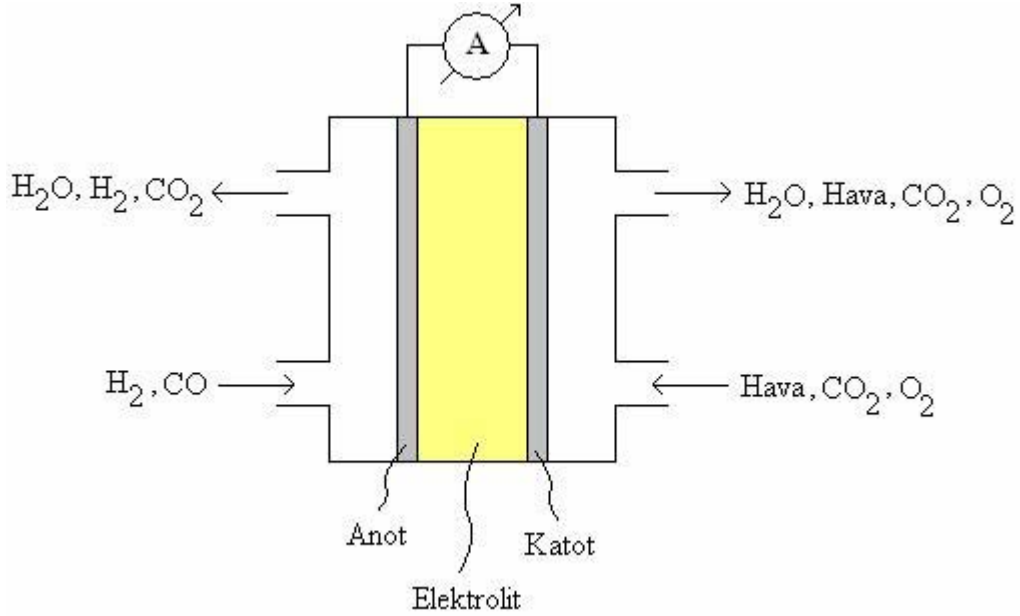
Yakıt hücrelerinde hidrojen ve oksijen arasındaki elektro-kimyasal bir tepkime sonucu elektrik ve ısı elde edilir. Yakıt olarak kullanılan hidrojen gazı, doğal gaz, metanol, kömür gibi çeşitli yakıtlardan elde edilmektedir. Oksitleyici olarak oksijen gazı kullanılmakta fakat havanın doğal yapısında oksijenin gazının varlığı nedeniyle doğrudan havada kullanılmaktadır. Yakıt hücrelerinde meydana gelen toplam kimyasal tepkimede hidrojen gazının oksijen gazı ile yanması sonrasında su oluşmaktadır. Kimyasal Eşitlik (3.1)'de gösterildiği gibi oluşan suyun yanı sıra elektrik enerjisiyle birlikte tepkimenin ekzotermik olması nedeniyle ısı enerjisi de açığa çıkmaktadır (Ar, 1998).



Her bir yakıt hücresi anot (negatif elektrot) katot (pozitif elektrot) ve bunları birbirlerinden ayıran bir elektrolitten oluşmaktadır. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi hidrojen gazı anot yüzeyi üzerinden oksijen gazı da katot yüzeyi üzerinden geçerken aşağıdaki durumlar gerçekleşmektedir (Ar, 1998).

- Anotta hidrojen gazı molekülleri elektron verir ve hidrojen gazı iyonları formuna dönüşürler.
- Elektronlar bir dış devre üzerinden katoda doğru hareket ederler.
- Hidrojen gazı iyonları yakıt hücresinin çeşidine göre farklılık gösteren elektrolitten geçerek katoda ulaşırlar ve oksijen gazı molekülleri ile tepkimeye girerek su oluştururlar.
- Hidrojen gazı moleküllerinin oksitlenme ve su oluşturma eğilimi ısı ve elektrik üretimini sağlamaktadır.

- Yan ürün olarak yalnızca su ve ısı oluşturmakta olup çevreyi kirletici herhangi bir ürün oluşturmamaktadır.



Şekil 3.1. Tipik bir yakıt hücresinin şematik gösterimi.

Her bir yakıt hücresinden 0.5-1.0 V arasında gerilim elde edilebilmektedir. Ancak yakıt hücrelerinin seri veya paralel bağlanarak yığın elde edilmesi suretiyle değişik boyutlarda güç sistemleri oluşturulabilmektedir. Yakıt hücreleri yığın haline getirilirken hücre gruplarının çıkış gerilimini arttırmanın iki yolu vardır. Bunlar, hücre sayısını arttırmak ve hücre alanını genişletmektir (Ar, 1998).

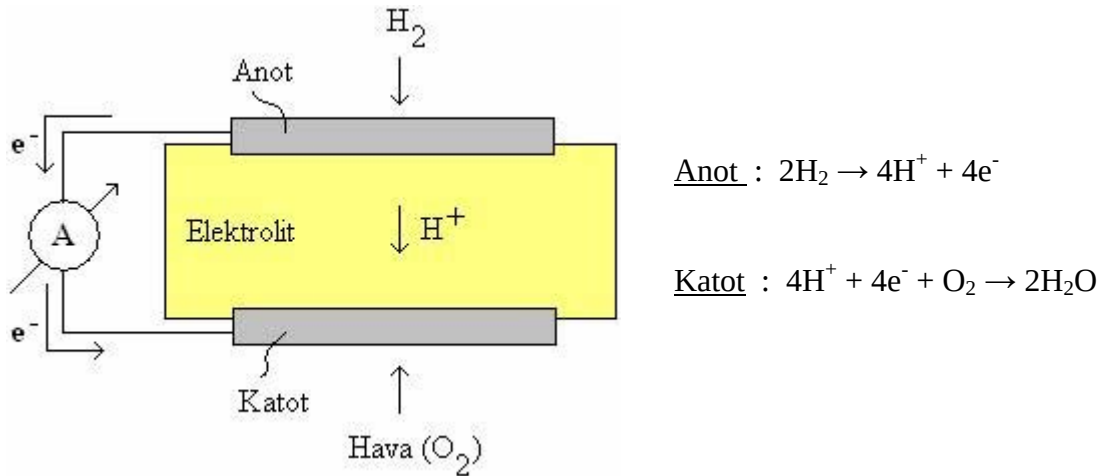
Yakıt hücreleri, bünyesinde kullanılan elektrolitin cinsine göre çeşitli isimler almaktadır. Her ne kadar çalışma esasları benzer olsa da, çalışma koşulları ve uygulama alanları farklılık göstermektedir. Elektrolit cinslerine göre ayrılan yakıt hücrelerinin çeşitli temel özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir (Ar, 1998).

Çizelge 3.1. Yakıt hücresi çeşitlerinin bazı temel özellikleri.

	Fosforik Asitli Yakıt Hücresi	Katı Oksitli Yakıt Hücresi	Eriyik Karbonatlı Yakıt Hücresi	Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi	Alkali Yakıt Hücresi	Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücresi
Elektrolit	Fosforik Asit	Çinko üzerine tutturulmuş Yittria	Karbonat	Polimer iyon değişim zarı	Potasyum hidroksit	Polimer iyon değişim zarı
Taşıyıcı	H^+	O_2^{-2}	CO_3^{-2}	H^+	OH^-	H^+
Hücre Materyali	Karbon	Seramik	Ni, paslanmaz çelik	Karbon	Karbon	Karbon
Güç Yoğunluğu (mW/cm^2)	200	240	100	40	100 – 200	350
Yakıt Türü	H_2	H_2 , CO, HC	H_2 , CO, HC	$CH_3OH + H_2O$	H_2	H_2
Çalışma Sıcaklığı ($^{\circ}C$)	170 – 210	1000	600 – 700	100	80	80
Verimi	37 – 42	60 – 70	45 – 60	~ 50	42 – 73	40 – 60

3.3.1. Fosforik Asitli Yakıt Hücresi

Fosforik asitli yakıt hücresi, hava elektrotu (katot), yakıt elektrotu (anot) ve iki elektrotun arasına yerleştirilen bir elektrolitten oluşmuştur. Yakıt hücresinin adından da anlaşılacağı üzere elektrolit olarak fosforik asit kullanılmaktadır. Fosforik asitli yakıt hücresinin çalışma prensibi ve kimyasal tepkimeleri Şekil 3.2’de verilmiştir. Görüleceği üzere yakıt elektrotunda hidrojen gazı molekülleri elektron vererek hidrojen atomu iyonlarına dönüşmektedir. Açığa çıkan elektronlar bir dış devre üzerinden taşınırken, hidrojen atomu iyonları fosforik asit elektrolitinden geçerek yakıt elektrotuna ulaşırlar ve burada oksijen molekülleri ile tepkimeye girerek su molekülüne dönüşürler. Buradaki elektrik enerjisini dış devre üzerinden geçen elektronlar sağlamaktadır. Toplam tepkimenin ekzotermik olması nedeniyle de ısı enerjisi de elde edilmektedir (Ar, 1998; U.S.Department of Energy, 1992).



Şekil 3.2. Fosforik asitli yakıt hücresinin çalışma prensibi ve kimyasal tepkimeleri.

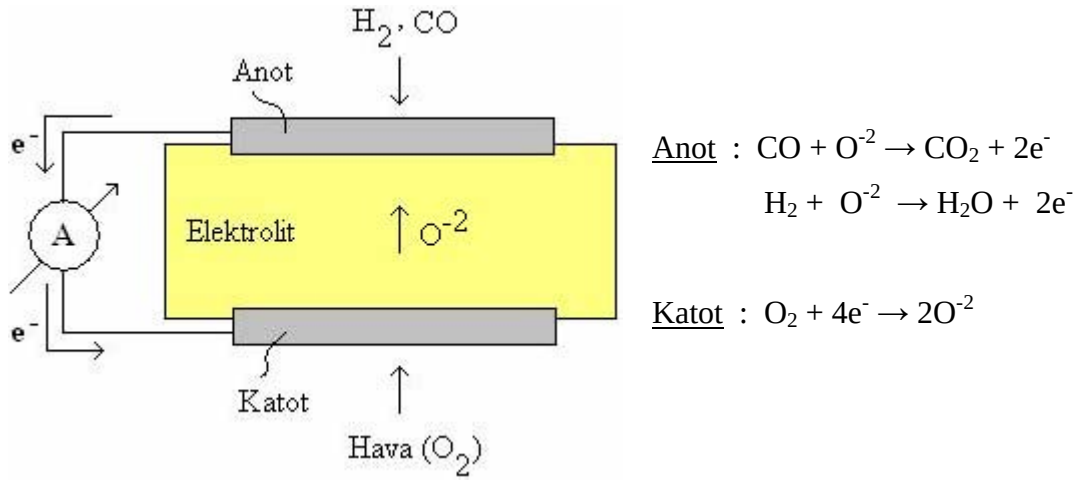
Elektrolit olarak fosforik asit kullanan, 170°C ile 210°C arası sıcaklıklarda ve 1-10 bar basınç aralığı arasında çalışan bir yakıt hücresi tipidir. Basit bir dönüşüm sağladıkları ve düşük sıcaklıkta çalıştıkları için en fazla gelişim gösteren yakıt hücresi çeşididir. Diğer yakıt hücresi çeşitlerine göre %37-42 gibi daha düşük bir verime sahiptir. Güç yoğunluğu 200 mW/cm² civarındadır. Bunun yanı sıra düşük çalışma sıcaklığı nedeniyle atık ısının kullanımı sınırlıdır (Ar, 1998; U.S.Department of Energy, 1992; Ekmekçi et al., 2002).

Fosforik asitli yakıt hücresinde kullanılan elektrolitin asit oluşu, CO₂ nedeniyle elektrolitte bozulma meydana gelmemektedir. Böylece CO₂ 'in, hücre yapısına ters bir etkisi olmamaktadır. Metanol, nafta veya doğal gaz, kömür gibi fosil yakıtlardan elde edilen, küçük miktarlarda CO₂ içeren hidrojen zengini gaz, yakıt olarak kullanılabilir. Yakıt hücresinin ömrü tahmini 40 bin saat (~5 yıl) ile sınırlıdır. Genellikle yakıt hücresi performans kaybı, yakıt hücresi materyali olan karbonun korozyonu ve elektrolit sızıntısı nedeniyle meydana gelmektedir. Yakıt hücresi ömrü çalışma sıcaklığı ve basınç gibi çalışma koşullarına bağlıdır. Sık sık çalıştırılıp durdurulması, ani yük değişimleri nedeniyle çalışma ömrü etkilenmektedir (Ar, 1998; U.S. Department of Energy, 1992; Ekmekçi et al., 2002).

1990'lı yıllarda oldukça ekonomik bir sistem olmakla birlikte günümüzde güç santralleri uygulamalarında kullanımı hedeflenmektedir. "ONSI Corporation PC25" şirketi 200 kW'lık üniteleri hedeflemektedir. "Tokyo Electric Power" şirketi tarafından geliştirilmiş olan 11 MW'lık bir sistem söz konusu olup, fizibilite ve ucuzlatma çalışmaları devam etmektedir. 200 MW'lık bir hedefe günümüzde hala ulaşamamıştır (U.S.Department of Energy, 1992; http://www.hidrojenforumu.com/kongre2konusma/ozet_incioglu.htm).

3.3.2. Katı Oksitli Yakıt Hücresi

Katı oksitli yakıt hücresinin çalışma prensibi ve kimyasal tepkimeleri Şekil 3.3'te verilmiştir. Görüleceği üzere hava elektrotunda oksijen bir dış devre aracılığı ile sağlanan elektronlar ile tepkimeye girerek oksijen gazı iyonları formuna dönüşmektedir. Negatif yüke sahip bu iyonlar elektrolitten geçerek anoda doğru hareket etmeye başlarlar. Bu sırada anot hidrojen ve CO gazları ile beslenmektedir. Anoda ulaşan oksijen gazı iyonlarının, hidrojen ve CO gazları ile tepkimeye girmesi sonucunda H₂O ve CO₂ oluşur ve serbest elektronlar açığa çıkar. Buradaki elektrik enerjisini dış devre üzerinden geçen elektronlar sağlamaktadır. Toplam tepkimenin ekzotermik olması nedeniyle de ısı enerjisi elde edilmektedir. (Ar, 1998; Boersma et al., 1997; Nguyen et al., 1993).



Şekil 3.3. Katı oksitli yakıt hücresinin çalışma prensibi ve kimyasal tepkimeleri.

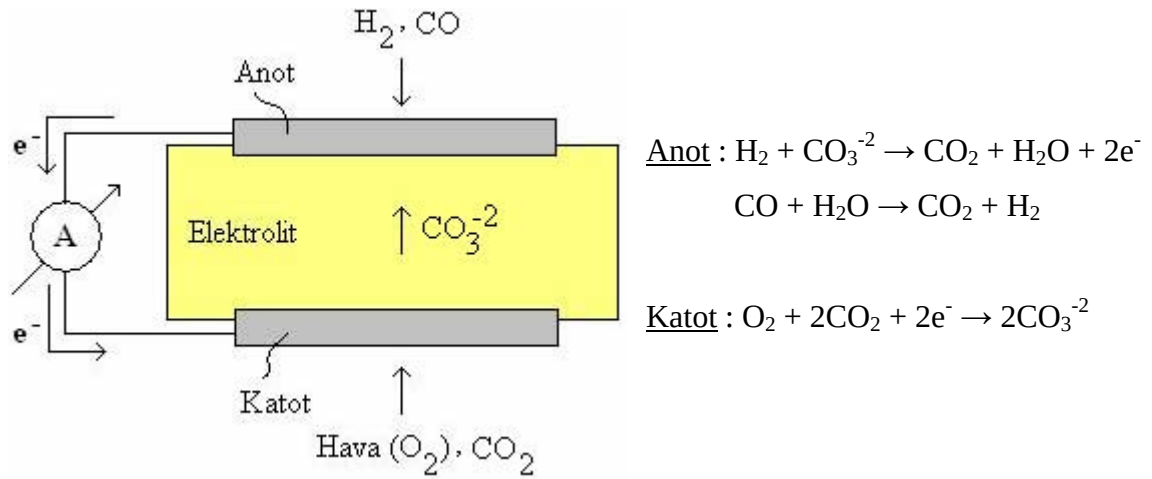
Katı oksitli yakıt hücreleri, bugüne kadar en az gelişme gösteren yakıt hücreleri olmasına rağmen geleceğin en verimli yakıt hücresi konumundadır. Güç istasyonları için büyük potansiyele sahiptir. Bu çeşit yakıt hücrelerinin verimi %60'a kadar ulaşmış olup $1000^\circ C$ 'lik çalışma sıcaklıkları vardır. Güç yoğunluğu 240 mW/cm^2 olan katı oksitli yakıt hücrelerinin ticari, endüstriyel ve günlük kullanımlar gibi geniş yelpazeye hizmet verebilmeleri için çalışmalar sürdürülmektedir. Bununla birlikte, taşımacılık alanında da kullanılması yolunda araştırmalar yürütülmektedir (Ar, 1998; Ekmekçi et al., 2002; Boersma et al., 1997; Nguyen et al., 1993).

Katı oksitli yakıt hücreleri yüksek sıcaklıklarda çalıştıkları için doğal gazın ve diğer yakıtların hidrojen gazına dönüşmesi için ayrı bir sistem ve dışarıdan ısı verilmesine gerek yoktur. Yüksek sıcaklıktaki yakıt hücresi içerisindeki yakıt, hidrojen ve CO'e dönüşerek elektrik üretimi sağlar. Verimliliği %70'ten fazladır. Ayrıca atık ısı verimli bir şekilde değerlendirilebilir. Bu çeşit yakıt hücreleri genellikle seramikten ve $1000^\circ C$ 'de oksijen iyonlarını harekete geçiren bir elektrolitten oluşmaktadır. Elektrolit genellikle yitria/çinko alaşımıdır. Katı oksitli yakıt hücresinin üretimi zor ve maliyetlidir (Ar, 1998; Ekmekçi et al., 2002; Boersma et al., 1997; Nguyen et al., 1993).

Katı oksitli yakıt hücreleri, ergimiş yakıt hücreleri ile benzer amaca yönelik olarak geliştirilmekte olup, çalışmaların esas hedefi gerekli performansı sağlamak ve daha düşük bir maliyet ile teknolojiyi kullanmaktır (Ar, 1998; Boersma et al., 1997; Nguyen et al., 1993).

3.3.3. Eriyik Karbonatlı Yakıt Hücresi

Eriyik karbonatlı yakıt hücresinin çalışma prensibi ve kimyasal tepkimeleri Şekil 3.4'te verilmiştir. Görüleceği üzere havanın doğal yapısındaki oksijen ve CO₂ ile katot beslenmektedir. Burada CO₃⁻² üretmek üzere bir dış devre üzerinden sağlanan elektronlar oksijen ile tepkimeye girerler ve oluşan CO₃⁻² anoda hareket eder. Hidrojen gazı ile beslenen anot CO₃⁻² ile tepkimeye girerek su oluşturur. Açığa çıkan elektronlar bir dış devre üzerinden katoda taşınır ve tepkime zincirinin tekrarlanmasıyla sürekli olarak elektrik üretimi sağlanır. Buradaki elektrik enerjisini dış devre üzerinden geçen elektronlar sağlamaktadır. Toplam tepkimenin ekzotermik olması nedeniyle de ısı enerjisi elde edilmektedir (Ar, 1998; Hishinuma et al., 1997).



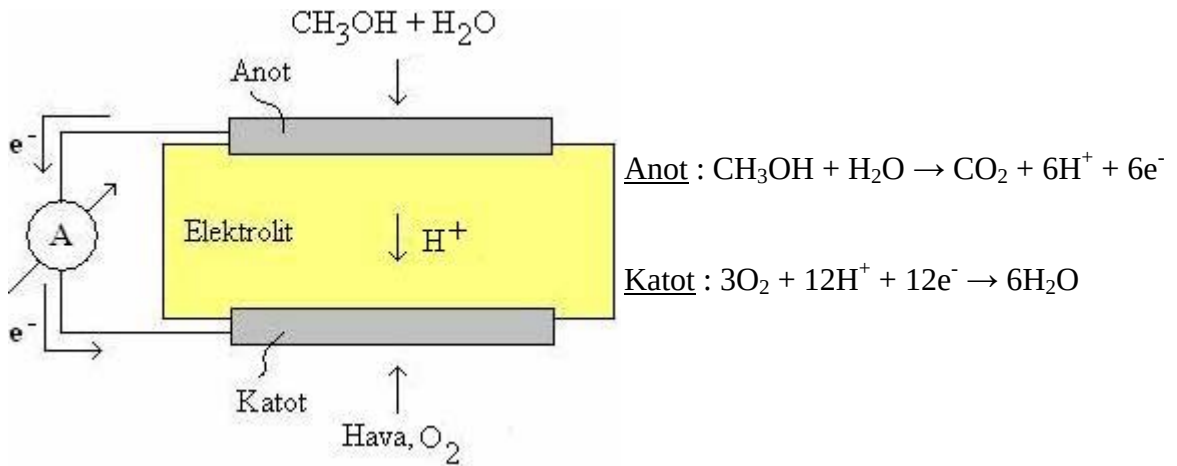
Şekil 3.4. Eriyik karbonatlı yakıt hücresinin çalışma prensibi ve kimyasal tepkimeleri.

Eriyik karbonatlı yakıt hücreleri yüksek verimlilikleri ve hızla inşa edilebilmeleri nedeniyle elektrik ihtiyacını karşılamak için uygundur. Elektrik eldesinin yanı sıra 680°C gibi yüksek çalışma sıcaklığı nedeniyle ısı enerjisinden de faydalanılmaktadır. Güç yoğunluğu 100 mW/cm² olup verimliliği %50 civarındadır. Eridiklerinde iyonik iletim gösterdiklerinden LiKCO₃ ve LiNaCO₃ gibi karbonatlar bu çeşit yakıt hücrelerinde elektrolit olarak kullanılmaktadır. Eriyik karbonatlı yakıt hücrelerinde yakıt olarak doğal gaz kullanılabileceği gibi kömür gazı gibi saf olmayan gazlar da kullanılabilmektedir. Yüksek sıcaklıkta çalıştıklarından dolayı doğal gaz ve

diğer hidrokarbon yakıtların yakıt hücresi içerisinde dönüşümü mümkündür ve dolayısıyla yakıt dönüşüm birimi gerektirmemektedir (Ar, 1998; Hishinuma et al., 1997).

3.3.4. Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi

Doğrudan metanol yakıt hücresinin çalışma prensibi ve kimyasal tepkimeleri Şekil 3.5'te verilmiştir. Görüleceği üzere anottan beslenen metanol-su karışımı tepkime sonrasında karbondioksit, hidrojen gazı iyonu ve elektronlarına ayrıışmaktadır. Bunun sonucunda oluşan hidrojen gazı iyonu polimer elektrolit zardan, elektronlar da bir dış devre üzerinden geçerek katoda ulaşırlar. Havanın doğal yapısındaki oksijen ile beslenen katotta hidrojen gazı iyonu, elektronlar ve oksijen gazı ile tepkimeye girerek su molekülüne dönüşürler. Buradaki elektrik enerjisini dış devre üzerinden geçen elektronlar sağlamaktadır. Toplam tepkimenin ekzotermik olması nedeniyle de ısı enerjisi elde edilmektedir (Karaosmanoğlu et al., 2002).



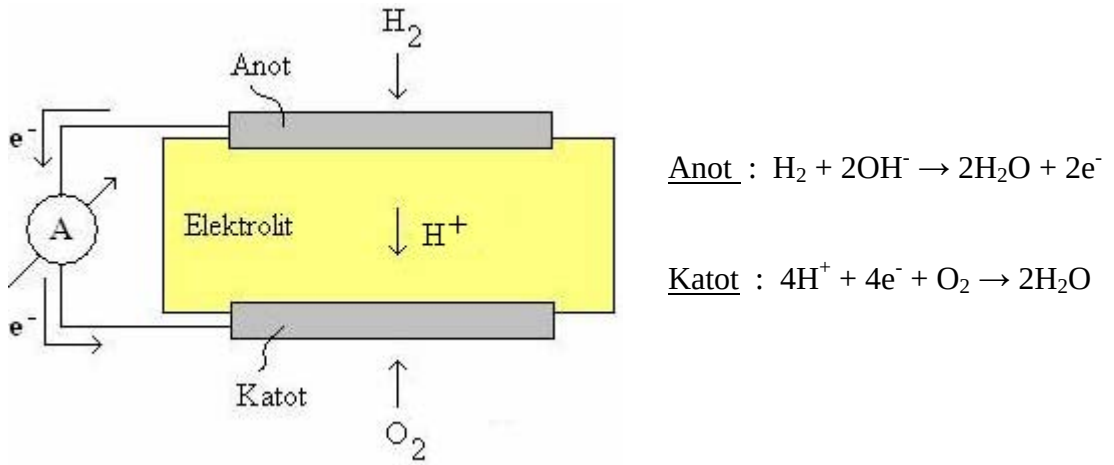
Şekil 3.5. Doğrudan metanol yakıt hücresinin çalışma prensibi ve kimyasal tepkimeleri.

Doğrudan metanol yakıt hücreleri bir iyileştirici olmaksızın metanol-su karışımı durumundaki yakıtı doğrudan kullanabilmektedir. Hidrojenin doğrudan kullanılmaması ve metanol kullanımının depolama açısından kolay ve basit oluşu bu yakıt hücresi çeşidinin en avantajlı durumudur. Güç yoğunluğu 40 mW/cm^2 olup verimliliği %50 dolaylarında ve çalışma sıcaklığı 100°C civarındadır. Bu düşük sıcaklık değeri bu çeşit

yakıt hücrelerinin küçük ve orta ölçekli uygulama alanlarındaki kullanımını çekici hale getirmektedir (Karaosmanoğlu et al., 2002).

3.3.5. Alkali Yakıt Hücresi

Alkali yakıt hücresinin çalışma prensibi ve kimyasal tepkimeleri Şekil 3.6'da verilmiştir. Görüleceği üzere elektrolit olarak potasyum hidroksit (KOH) kullanılmakta olup anotta hidrojen gazı molekülleri elektron vererek hidrojen gazı iyonları formuna dönüşmektedir. Açığa çıkan elektronlar bir dış devre üzerinden katoda taşınırlar. Taşınan bu elektronlarla potasyum hidroksit elektrolitten geçerek katoda ulaşan hidrojen gazı iyonları oksijen gazı molekülleri ile tepkimeye girerek su oluştururlar. Buradaki elektrik enerjisi dış devre üzerinden geçen elektronlar sağlamaktadır. Toplam tepkimenin ekzotermik olması nedeniyle de ısı enerjisi elde edilmektedir (Ar, 1998; Ergül et al.,1997).



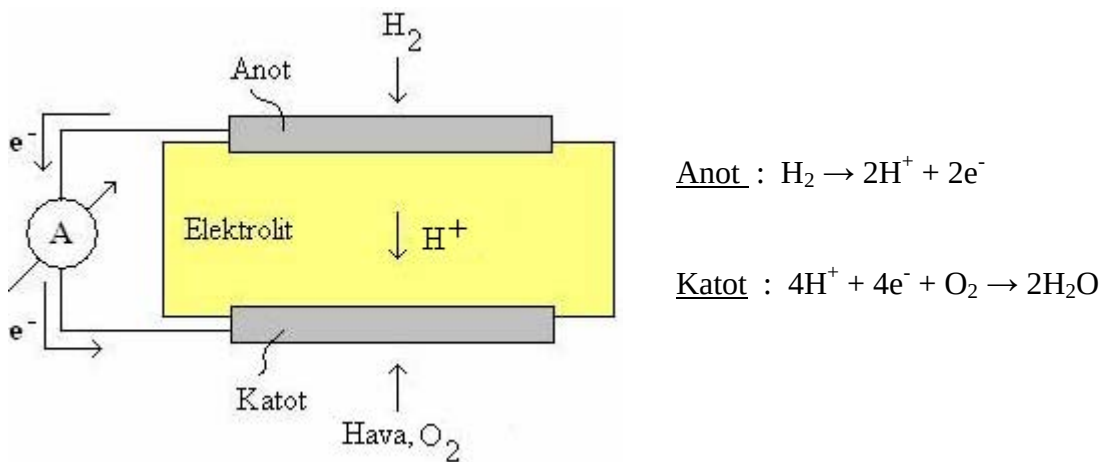
Şekil 3.6. Alkali yakıt hücresinin çalışma prensibi ve kimyasal tepkimeleri.

Alkali yakıt hücrelerin verimliliği %42-73 arasında olup, NASA tarafından uzay çalışmalarında kullanılmıştır. Yakıt olarak saf hidrojen gazı kullanılan bu çeşit yakıt hücrelerinde elektrolit olarak potasyum hidroksit kullanılır. Son yıllara kadar ticari uygulamaları maliyetli olan alkali yakıt hücreleri için bir çok şirket maliyetin düşürülmesi ve işletim kolaylığı sağlanması için çalışmalarını sürdürmektedir. Alkali yakıt hücrelerinin işletim sıcaklığı 80°C civarındadır. Bu nedenle atık ısı enerjisinin kullanımı mümkün değildir. Güç yoğunluğu 100-200 mW/cm² arasında değişmektedir.

Bu yüksek güç yoğunluğu ve yan ürün olarak su elde ediliyor olması diğer yakıt hücre çeşitlerine nazaran üstündür. Bununla birlikte bu çeşit yakıt hücrelerinde yüksek güç elde etmek için elektrotların üzerine platin yüklenmesi de maliyetini arttırmaktadır. Ancak potasyum karbonat (K_3CO_3) oluşturmak üzere KOH elektrolitinin CO_2 ile tepkimeye girmesi sadece elektroliti yavaş yavaş azaltması değil aynı zamanda elektrotun kutupları üzerine oluşması aktiflik kaybına neden olmaktadır. CO_2 'in havanın doğal yapısında mevcut oluşu nedeniyle alkali yakıt hücreleri saf O_2 ile beslenmelidir (Ar, 1998; Ekmekçi et al., 2002; Ergül et al.,1997).

3.3.6. Katı Polimer Yakıt Hücresi

Katı polimer yakıt hücresinin çalışma prensibi ve kimyasal tepkimeleri Şekil 3.7'te verilmiştir. Görüleceği üzere elektrolit olarak katı iyon iletim zarı kullanılmakta olup anotta hidrojen gazı molekülleri elektron vererek hidrojen gazı iyonları formuna dönüşmektedir. Açığa çıkan elektronlar bir dış devre üzerinden katoda taşınır. Taşınan bu elektronlarla iyon iletim zarından geçerek katoda ulaşan hidrojen gazı iyonları oksijen gazı molekülleri ile tepkimeye girerek su oluştururlar. Buradaki elektrik enerjisini dış devre üzerinden geçen elektronlar sağlamaktadır. Toplam tepkimenin ekzotermik olması nedeniyle de ısı enerjisi elde edilmektedir (Ar, 1998; U.S.Department of Energy,1992; Prater, 1992).



Şekil 3.7. Katı polimer yakıt hücresinin çalışma prensibi ve kimyasal tepkimeleri.

Aynı zamanda, katı polimer yakıt hücresi, kullanılan elektrolitin çok ince olması ve hidrojen atomu iyonlarının proton etkisi göstermeleri nedeniyle proton değişim zarlı yakıt hücresi olarak da bilinmektedir. Verimi %40-60 arasında yer alan katı polimer yakıt hücrelerinin çalışma sıcaklıkları 80°C civarında olup 350 mW/cm² 'lik güç yoğunluğuna sahiptir. Yüksek polimerlerin bulunmasından sonra uzay çalışmalarında ve özellikle askeri sistemlerde uygulanmak amacıyla geliştirilmiştir. Bu çeşit yakıt hücrelerinde katı elektrolit kullanıldığı için sızıntı sorunu yoktur. Katı polimer yakıt hücrelerinin akın yoğunluğu yüksek ve çalışma ömürleri uzundur. Düşük sıcaklıklarda çalıştığından ulaşım araçları için uygun bir yakıt hücresi çeşididir. Gelecekteki uygulamalar için büyük umut vadeden katı polimer yakıt hücreleri düşük sıcaklıklı yakıt hücreleri olduğundan tepkimenin hızlandırılması için elektrotlar platin bir katalizör gerektirir (Ar, 1998; U.S.Department of Energy,1992; Prater, 1992).

3.4. Yakıt Hücresinin Verimliliği

Yakıt hücreleri hidrojen gazı ve oksijen gazı halinde depolanmış kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Hidrojen gazı ve oksijen gazı ile beslenen yakıt hücresi kimyasal tepkime sonrasında gerçekleşen su oluşumunun yanı sıra elektrik ve ısı enerjileri meydana gelmektedir. Yakıt hücresinin enerji verimi yakıt hücresine verilen enerji ile yakıt hücresinden alınan enerji arasındaki ilişkidir. Bu ilişki Eşitlik (3.1)'de verilmiştir (www.h-tec.com).

$$\eta = \frac{E_{alınan}}{E_{verilen}} \quad (3.1)$$

$E_{alınan}$; yakıt hücresinden elde edilen maksimum enerjiyi temsil ederken, $E_{verilen}$; yakıt hücresine verilen hidrojen gazının enerji değerini ifade eder. Bu durum Eşitlik (3.2)'de verilmiştir (www.h-tec.com).

$$\eta = \frac{E_{alınan}}{E_{verilen}} = \frac{E_{elektrik}}{E_{hidrojen}} = \frac{V \cdot I \cdot t}{V_{H_2} \cdot H} \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2’de;

- V : yakıt hücresinden elde edilen voltajı
- I : yakıt hücresinden elde edilen akımı
- t : yakıt hücresinin yakıt ile beslenme süresini
- V_{H_2} : yakıt hücresine verilen gazın hacmini
- H : yakıt hücresine verilen gazın ısıl değerini

ifade etmektedir.

Yakıt hücreleri elektrik enerjisinin yanı sıra ısı enerjisi de üretmektedir. Eğer bu enerji kullanılmazsa elektrik enerjisi baz alındığında kayıp enerji olarak ortaya çıkmaktadır. Ancak ısı enerjisinin de kullanımıyla yakıt hücresinin verimi Eşitlik (3.3)’teki gibi elde edilir (www.h-tec.com).

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (3.3)$$

Eşitlik (3.3)’te;

- ΔG : Gibbs serbest enerji entalpisini (tepkime süresince yaptığı iş)
- ΔH : tepkime entalpisini (tepkime süresince elde edilen enerjiyi)

ifade etmektedir.

Tepkime entalpisi ΔH ile serbest enerji entalpisi ΔG arasındaki fark açığa çıkan ısı enerjisi Q ’dur. Bu durum Eşitlik (3.4)’te verilmiştir (www.h-tec.com).

$$\Delta H = \Delta G + Q \quad (3.4)$$

Isı enerjisi Q, sıcaklık ve tepkime entropisine bağlı ifade Eşitlik (3.5)’te verilmiştir.

$$Q = T \cdot \Delta S \quad (3.5)$$

Eşitlik (3.3)'te;

T : sıcaklığı

ΔS : tepkime entropisini

ifade etmektedir.

Eşitlik (3.5), Eşitlik (3.4)'te yerine ve sonucunda Eşitlik (3.3)'te yerine yazıldığında Eşitlik (3.6) elde edilir.

$$\eta = \frac{\Delta H - T \cdot \Delta S}{\Delta H} = 1 - \frac{T \cdot \Delta S}{\Delta H} \quad (3.6)$$

Yakıt hücresinde Faraday verimi yakıt hücresinin elektrik gücünden hesaplanan gaz hacmi ile yakıt hücresinin tükettiği gazın hacmi ile ilişkili olup bu durum Eşitlik (3.7)'de verilmiştir (www.h-tec.com).

$$\eta = \frac{V_{H_2}(\text{hesaplanan})}{V_{H_2}(\text{tüketilen})} \quad (3.7)$$

Faraday yasası tüketilen gaz ile oluşturduğu akım arasındaki ilişkiyi belirler. Bu durum hidrojen molekülünün sahip olduğu iki elektronunun akım olarak ortaya çıkışı ile açıklanır. Yakıt hücresinin oluşturduğu akımdan tüketilen hidrojen gazı hacminin hesaplanması Eşitlik (3.7) ile gerçekleştirilmektedir (www.h-tec.com).

$$V_{H_2}(\text{hesaplanan}) = \frac{R \cdot I \cdot T \cdot t}{F \cdot P \cdot z} \quad (3.7)$$

Eşitlik (3.7)'de;

R : gaz sabiti = $8.314 \frac{J}{mol \cdot K}$

I : yakıt hücresinde oluşan akımı

T : ortam sıcaklığını

t : akımın oluştuğu süreyi

F : Faraday sabiti = $96485 \frac{C}{mol}$

P : ortam basıncını

z : bir molekülden kopan elektron sayısını

ifade etmektedir.

3.5. Yakıt Hücrelerinin Avantaj ve Dezavantajları

Yakıt hücrelerinin avantajları ve dezavantajları sırasıyla aşağıda verilmiştir (http://www.hidrojenforumu.com/kongre2konusma/ozet_incieroglu.htm).

Avantajları;

- Yakıt hücresi ısı enerji sistemlerine göre daha yüksek verimle çalışırlar. Isı sistemlerden elektrik üretiminde sistem Carnot çevrimi kriterlerinden etkilendirken, yakıt hücresi sistemlerinde bu etkileşim yoktur. Isı sistemlerinde elektrik üretimindeki verim %35-40'ı geçmez iken, yakıt hücresi sistemlerinde %70'e yakın verimle çalışmaktadır.
- Yakıt hücresinde meydana gelen atık miktarı, diğer yakıtlara göre ihmal edilebilecek kadar azdır. Yan ürün olarak bir tek su oluşmaktadır. Yakıt hücrelerinde karbon monoksit, azot oksitler, yanmamış hidrokarbonlar ve kirletici diğer maddeler oluşmazken, oksitleyici olarak hava kullanıldığında ihmal edilecek kadar az miktarda azot oksitler, hidrokarbonlar kullanıldığında ise çok düşük miktarda karbon dioksit 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 hücrelerinde sistem, gürültü kirliliği oluşturmamaktadır.

- Yakıt hücrelerinde kullanılacak yakıt sayısı çok fazla olduğundan, fosil ve alternatif yakıtların kullanımının kolaylığı nedeniyle çok farklı alanlarda kullanılabilir.
- Yakıt hücreleri istenilen büyüklükte ve kapasitede üretilebilir. Basit bir yapıya sahiptir. Büyüklüklerine göre 10 W'tan 4.5 kW'a kadar olan bir güç yelpazesine sahiptirler. Boyutları bir el çantasında taşınabilecek kadar küçük ve bir buzdolabı kadar büyük olabilmektedir.
- Modülerdirler. Gerekli görülen her yerde kullanılabilir ve yerleştirilebilirler.
- Yakıt hücresi sistemlerinde yan ürün olarak oluşan atık ısı geri kazanılabilir.
- Yakıt hücreleri dayanıklı ve güvenli sistemlerdir.

Dezavantajları;

- Yakıt hücresi kullanımı, çok fazla bilgi ve ileri teknoloji gerektiren bir sistemdir.
- Diğer sistemlerden daha pahalıdır.
- Uygulamaların yüksek verimle gerçekleşmesi için uzun zaman ve maliyet gereklidir.

3.6. Yakıt Hücrelerinin Uygulama Alanları

Yakıt hücreleri verimli, ekonomik, sessiz ve çevre dostu yeni bir enerji üretim teknolojisi olarak geniş uygulama ve kullanım alanı bulmaktadır (Ar, 1998).

Yakıt hücrelerinin ilk uygulama alanı uzay çalışmalarıdır. ABD'nde NASA'nın çalışmaları kapsamında Apollo, Gemini ve Space Shuttle uzay gemilerinde hidrojen ve oksijen beslemeli yakıt hücresi birbirine bağlı üç ünite olarak kullanılmıştır. Toplamda

93 adet olmak üzere her üniteye 31 adet yakıt hücresi kullanılmıştır. Toplam üretilen güç 1.4 kW ve potansiyel 27-31 V'tur. Yakıt hücrelerinin ağırlığı 111 kg'dır. 1995 saatlik uçuş süresince 450 kg su ve 325 kW/saat 'lık enerji üretilmiştir. Gemini gemisinde ise farklı olarak proton değişim zarlı yakıt hücresi kullanılmıştır. Her üniteye 32 adet hücre bulunmakta ve 1 kW güç sağlamaktadır. Bu üç gemide de iki ünite ihtiyacı karşılamak için yapılırken üçüncü ünite acil ve özel görevler için hazırda tutulmuştur. "American UTC Fuel Cell" firması NASA ihtiyacını karşılamaktadır (http://www.hidrojenforumu.com/kongre2konusma/ozet_inceroglu.htm).

Stratejik bir önemi olan enerji kaynakları ülke politikalarında önemli bir yer tutmaktadır. Yakıt çeşitliliği ve veriminden dolayı askeri amaçla kullanılabilecek en iyi yakıtlardan biri yakıt hücreleridir. Gerek askeri araçlarda gerekse ısı ve elektrik ihtiyacı durumunda kolay kullanımıyla askeri yönden yakıt hücreleri iyi bir alternatiftir. Almanya, Avustralya ve Kanada donanmalarında kullanılmak üzere denizaltılar başta olmak üzere lokomotiflerde de yakıt hücre sistemlerinin uygulama çalışmaları mevcuttur (Ar, 1998; http://www.hidrojenforumu.com/kongre2konusma/ozet_inceroglu.htm).

Sessiz çalışan yakıt hücreleri, evlerde veya apartmanlarda ısıtma ve elektrik ihtiyacı sağlamak için kullanılabilecek bir alternatiftir. Bu tipte kullanılabilecek yakıt hücreleri, propan ve doğal gazda üretimi sağlayarak elektrik üretmekte ve oluşan ısı geri kazanılarak ısıtma sistemlerinde kullanılmaktadır. 3-5 kW 'lık yakıt hücreleri evsel tüketim için uygundur. ABD hükümeti hidrojenli yakıt hücresi uygulamaları için konutlarda 1000\$/kW vergi indirimi uygulamaktadır. Bu durum ABD'nin yakıt hücreleri sistemlerine ne denli önem verdiğinin bir göstergesidir (http://www.hidrojenforumu.com/kongre2konusma/ozet_inceroglu.htm).

Yakıt hücrelerinin önemli bir ticari uygulaması, değişik yakıt hücreli sistemlerin, ısı ve elektriğin birlikte kullanımı için kullanıcının bulunduğu mekanlara kurulmasına dayanmaktadır. Böylece uzak mesafelere ısının ve elektriğin taşınmasındaki kayıpların önlenmesi sağlanacaktır. Dünyada şu anda yüzlerce sabit güç kaynağı olarak kurulmuş yakıt hücresi istasyonları bulunmaktadır. Bu enerji üreteçleri; hastanelerde, otellerde, iş yerlerinde, okullarda, güç istasyonlarında, havaalanlarında gerek elektrik gerekse ısıtma sistemlerinde kullanılmaktadır.

Bu sistemleri kullanan şirketlerin enerji harcamalarında %20-40 arasında düşüş görülmektedir (http://www.hidrojenforumu.com/kongre2konusma/ozet_inciperoglu.htm; Ar, 1998).

Proton değişim zarlı yakıt hücresi santrallerinde verim %55 civarındadır. Üretimde açığa çıkan karbon dioksit ve su buharı ek bir elektrik üretiminde değerlendirilirse, enerji verimi %80'e çıkmaktadır. Yakıt hücresi güç üretim sistemleri az yer kaplamaktadır. 2 MW 'lık bir santral 20 m² 'den az bir alanda kurulabilmektedir. Minibüs büyüklüğündeki bir santral ile 20 kW güç üretilmektedir. Bu santrallerin önemli uygulamalarına örnek olarak "American ONSI" firmasının Kaliforniya'daki 2 MW 'lık, "American UTC Fuel Cell" firmasının Alaska'daki 200 kW 'lık, "Westinghouse-Canada" 'nın Hollanda'daki 100 kW 'lık sistemleri verilebilir (http://www.hidrojenforumu.com/kongre2konusma/ozet_inciperoglu.htm).

İletişim alanında, bilgisayar dünyasında, görüntü teknolojisinde, alarm sistemlerinde yakıt hücreli taşınabilir güç kaynağı uygulamaları söz konusudur. Bu tür uygulamalar üzerinde çalışmalar sürmektedir. Minyatür yakıt hücreleri pazara çıktıkları zaman, cep telefonu sahipleri cep telefonlarını haftalarca şarj etmeden kullanabileceklerdir. Bu tür yakıt hücreleri metanol ile çalışabilen, çok küçük ebatlarda üretilen hücrelerdir (http://www.hidrojenforumu.com/kongre2konusma/ozet_inciperoglu.htm).

Atık su ve atıkların işlenmesi sırasında yanma tepkimeleri sonucunda oluşan emisyonları azaltmak ve oluşan metan gazından güç elde etmek için yakıt hücreleri kullanılmaktadır (http://www.hidrojenforumu.com/kongre2konusma/ozet_inciperoglu.htm).

Elektrikli taşıtlar 2000'li yılların yeni ve temiz alternatif uygulamaları arasında ön sırada yer almaktadır. Elektrikli taşıtlar; tren, tramvay, metro gibi elektriği doğrudan hattan alarak, akülü taşıtlar gibi enerjiyi depolanmış bir sistemden kullanarak, yakıt hücreli taşıtlar, güneş hücreli taşıtlar gibi taşınabilir bir sistemden anında enerji üreterek ve benzin-yakıt hücresi gibi hibrit elektrikli taşıtlar şeklinde uygulamaları vardır. Bu uygulamalar içinde yakıt hücreli elektrikli taşıtlar pek çok avantaj ile öndedir ve geleceğin otomotiv teknolojisi içinde hidrojen kullanan yakıt hücreli elektrikli taşıt uygulaması tüm uygulamalar yelpazesinde çok büyük bir alan kaplayacaktır. Yakıt

hücreleri otobüs, kamyon, otomobil ve diğer taşıtlar için yakıt görevi yapabilecek özelliklere sahiptir. Yakıt hücreli araçlar, benzin ve motorin ile çalışan araçlara göre daha temiz ve enerji bakımından daha verimli bir uygulamadır. Günümüzde taşıt emisyonlarının çevre kirliliği üzerindeki etkileri düşünüldüğünde, yakıt hücresi ile çalışan araçlar çevre dostu ve karlı bir seçimdir. Elektrikli araçlar içten yanmalı motorlara göre daha yüksek verimliliğe sahiptir (http://www.hidrojenforumu.com/kongre2konusma/ozet_inciperoglu.htm).

Kullanılan yakıtın enerji içeriğine bağlı olarak yakıt hücresi ile çalışan araçlarda güç üretimi %40-70 arasındadır. Hareketli parçası olmayan yakıt hücreleri kullanımında taşıtın gürültü kirliliği de görülür düzeyde azalmaktadır. Bir diğer avantaj ise, yakıt olarak hidrojen kullanıldığında araçlarda emisyon olarak sadece suyun oluşmasıdır. DaimlerChrysler-Ballard-Ford işbirliği ile XCELLSIS adı altında Kanada, ABD ve Avrupa'da 2005 yılından itibaren proton değişim zarlı yakıt hücreleri ile çalışan otobüsleri piyasaya sürecektir. Araçlarda saf hidrojen gazı kullanılması hedeflenirken, kısa ve orta vadede bu tercih incelenmelidir. Hidrojenin depolanması üzerinde çalışmalar son hızıyla devam etmekte olup, hidrojen depolanması yüksek basınçlı, hafif silindir, kriyojenik sıvı sistemleri ve katı metal hidrit depolama gerektirmektedir. Basınçlı hidrojen en iyi sistem olmakla birlikte hafif araçlarda gerekli olan hacim ve ağırlık kriterlerini karşılamamaktadır. Günümüzde nanoteknolojilere olan ilginin artışı ile birlikte hidrojenin depolanmasında kullanılması hedeflenen karbon nanotüpler gelecek için umut vericidir. Bu sistemlerde hidrojen gazına alternatif olarak sıvı yakıt beslemesi önerilmektedir. Günümüzde bu tip uygulamalara örnek olarak önde gelen otomotiv firmaları metanol kullanılan araçlar üretmişlerdir. Bu önde gelen otomotiv firmalarının ürettikleri metanol yakıtlı araçlar Çizelge 3.2'de verilmiştir (http://www.hidrojenforumu.com/kongre2konusma/ozet_inciperoglu.htm).

Çizelge 3.2. Dünyada önde gelen otomotiv firmalarının ürettiği metanol yakıtlı araçlar.

Araç Markası	Ford Motors	General Motors	Honda Motors	Daimler-Chrysler	Mazda Motors	Nissan Motors	Toyota	VW
Araç Modeli	Focus FC5	Opel Zafira	FCX-V2	NECAR3	FC-EV	R'nessa ve Xterra	RAV4	Capri

Fosforik asitli yakıt hücreleri çoğunlukla apartmanlar, alışveriş merkezleri gibi yerlerde elektrik üretimi amacıyla kullanılmaktadır. Bu çeşitteki yakıt hücresi, 250 W 'tan 200 kW 'a kadar 24 V 'luk elektrik jeneratörü şeklinde ticari olarak piyasaya sunulma aşamasındadır. Bunun yanı sıra 0.5-1.0 MW 'lık sabit güç istasyonları yine aynı çeşit yakıt hücreleri ile uygulamaya sokulma aşamasındadır. Fosforik asitli yakıt hücrelerinin ağır yük taşıtları ve lokomotifler üzerinde uygulanabilirliğinin araştırılması ve geliştirilmesi sürdürülmektedir. Katı oksitli yakıt hücreleri hidrojen gazı ve karbon monoksit kullanımına uygun olması sebebiyle doğal gaz buhar iyileştirme sistemleri ve kömür gazlaştırma birimlerinde kullanılabilmektedir. Eriyik karbonatlı yakıt hücreleri sabit güç istasyonları için uygundur. Doğrudan metanol yakıt hücrelerinin küçük uygulama alanlarında kullanımı uygundur. Oldukça yeni bir yakıt çeşidi olan doğrudan metanol yakıt hücrelerinin taşıt, jeneratör, sabit güç istasyonları gibi alanlarda uygulanabilirlik araştırmaları sürdürülmektedir. Alkali yakıt hücreleri yüksek güç yoğunluğu ve soğukta çalışabilme kapasiteleri olması nedeniyle ulaşım sektöründe kullanılabilmektedir. Katı polimer yakıt hücreleri yüksek güç yoğunluğu, hızlı çalışma yapabilme ve değişik güç çıkışlarına uygun olması ulaşım sektöründe kullanılmasını uygun kılmaktadır. Otomobil gibi hafif araçlarda şu anda kullanılabilen en uygun sistemdir. Bu çeşit yakıt hücre sistemi aynı zamanda uzay ve su altı uygulamaları için de geliştirilmektedir. Bu orta ölçekli uygulama alanlarının yanı sıra cep telefonu, diz üstü bilgisayarlar gibi küçük ölçekli uygulamaları da bulunmaktadır (Ekmekçi et al., 2002).

3.6.1. Yakıt Hücrelerinin Türkiye’deki Uygulama Alanları

Ülkemizde yakıt hücrelerine verilen önem diğer alternatif yakıtlara olduğu gibi düşük düzeyde olup enerji politikamızda geleceğe dair yatırımlar içinde yakıt hücrelerinin de yer alması ve dünyada bu alanda çalışmalar yapan diğer ülkelerle aynı seviyede araştırma ve geliştirme çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Ülkemizde yakıt hücreleri üniversitelerimizde bilimsel düzeyde uzun zamandır devam etmektedir. Yakıt hücrelerine ilk endüstriyel ilgi ELİMSAN Şirketler Grubu tarafından gösterilmiştir. Bir başka projede Endüstri-Üniversite işbirliği olarak sonuçlandırılmıştır. EAE Elektrik A.Ş., konutlarda yakıt hücrelerinin kullanımı ve Türkiye Cumhuriyeti’nde yakıt hücresi üretimi amacıyla, TÜBİTAK-TİDER tarafından desteklenen bu proje sonlandırılmıştır. Bu projede 5 kW elektriksel güç üreten proton değişim zarlı bir yakıt hücresi prototipi geliştirilmiştir. Oluşturulan prototip, doğrudan hidrojenle çalışan veya bir yakıt iyileştirici ilavesi ile, doğal gaz veya LPG ile de çalışabilecek bir yapıdadır. Söz konusu prototipin sayesinde konutlarda elektrik enerjisi ihtiyacını bağımsız şekilde ve çevre koşullarına uygun biçimde karşılamak mümkün olacaktır. Çok yakında “Temiz Enerji Yasası” düzenlenecektir. Bu yasa kapsamında EPDK çalışmaları içinde yakıt hücrelerinin yerini bulması ve üretilecek elektriğin konumunun belirlenmesi gerekmektedir (http://www.hidrojenforumu.com/kongre2konusma/ozet_incioglu.htm).

Ortadoğu Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği ve Kimya Bölümü önderliğinde alkali yakıt hücreleri üretimi ve performansı üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Yine aynı üniversitenin Kimya Bölümünde doğrudan metanol yakıt hücrelerinin kullanımı ile ilgili TÜBİTAK destekli bir çalışma yürütülmektedir (Ar, 1998).

TOFAŞ firması adına Marmara Araştırma Merkezi (MAM), yakıt hücre sistemiyle çalıştırılabilecek bir otomobil projesi üzerinde çalışmalar yapmaktadır. Yine aynı kuruluş yakıt hücrelerinde kullanılan elektrotların iyileştirilmesi ve yakıt hücreli güç üretim sistemleri üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Hacettepe Üniversitesi’nce yakıt hücrelerinin çeşitlerinden olan katı polimer yakıt hücresinin

elektrolitini oluşturan polimer zar üretimi ve iyileştirilmesi üzerinde araştırmalar yapmaktadır.

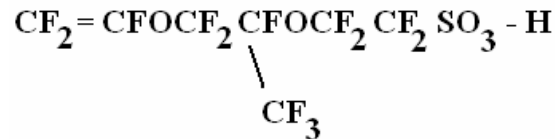
4. PROTON DEĞİŞİM ZARLI YAKIT HÜCRESİ

4.1. Giriş

Proton değişim zarlı yakıt hücresi, kimyasal enerjiyi doğru akım elektrik enerjisine dönüştürebilen düzeneklerdir. Bu bölümde proton değişim zarlı yakıt hücresinin temel yapısal bileşenlerine, çalışma esaslarına, performans özelliklerine ve uygulama alanlarına yer verilmiştir.

4.2. Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücresinin Temel Yapısal Bileşenleri

Proton değişim zarının yakıt hücrelerindeki ilk kullanımı 1959 yılında William T.Grubbs tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu proton değişim zarı, iyon iletimini sağlamakla birlikte yakıt gaz ve oksitleyici gaz arasında bir bariyer teşkil etmektedir. Diğer tür yakıt hücrelerde, ayrı duran katalitik yüzeyler arasında iletimi ve baryeri sağlamak için asit içerikli sıvı elektrolit kullanılmaktadır. Proton değişim zarlı yakıt hücrelerinde ise katalitik yüzeyler arasındaki iletimi ve baryeri bu zar sağlamaktadır. Sonuç olarak, proton değişim zarlı yakıt hücreleri, bu zardan başka herhangi bir elektrolit kullanmamaktadır. Proton değişim zarlı yakıt hücresinde kullanılan elektrolit zar Nafion™ ticari adı ile anılır. Bu zar ticari olarak değişik ebatlarda olmak üzere 0.05 mm ile 0.18 mm arasında değişen kalınlıklarda bulunabilmektedir. Bu zarların yüksek kimyasal dirence, mekanik sağlamlığa ve iyi proton iletkenliğe sahip olmaları açısından yaygın bir kullanımı vardır. Şekil 4.1 Nafion™ zarının basit kimyasal yapısı gösterilmektedir. (Grubb, 1957; Grune,1992; Pyle et al.,1993).



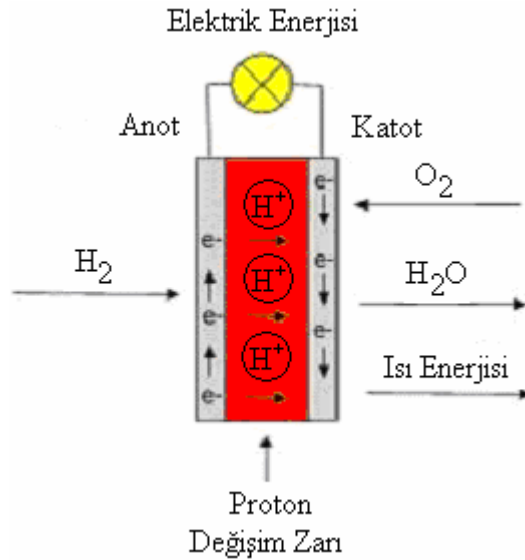
Şekil 4.1. Nafion zarın basit kimyasal yapısı.

En basit haliyle proton değişim zarlı yakıt hücresi, platin kaplanmış gözenekli elektrotlar arasına sandviçlenmiş, perflorosülfonik asit gibi bir proton değişim zarından

meydana gelmektedir. Elektrotların gözenekli oluşu gaz geçirgenliğini sağlamakta olup karbon dokumalar kullanılabilir. Bu elektrotların platinle kaplı (yükü) olması, proton değişim zarlı yakıt hücresinin çalışması esnasında meydana gelen elektro-kimyasal tepkimenin ekzotermik olması nedeniyle aktivasyon enerjisinin düşürülmesini amaçlamaktadır. Sonuç olarak elektrotlarla proton değişim zarının bir araya getirilerek birleştirilmiş yapısına elektrot-zar yapısı adı verilmektedir. Bu yapı proton değişim zarlı yakıt hücresinin kalbini teşkil etmektedir (Grubb, 1957; Grune,1992; Liu,1996).

4.3. Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücresinin Çalışma Prensibi

Proton değişim zarlı yakıt hücresi; yakıt olarak hidrojen gazını, oksitleyici olarak da oksijen gazını kullanarak bunların kimyasal enerjilerini doğru akım elektrik enerjisine dönüştüren bir düzendir. Proton değişim zarlı yakıt hücresi katı polimer elektrolitli yakıt hücresi olarak da isimlendirilmektedir (Liu et al.,1996; Ar, 1998).



Şekil 4.2. Proton değişim zarlı yakıt hücresinin temel çalışma prensibi.

Şekil 4.2’de gösterilen ve kapalı bir ortamda içerisinde yer alan iki adet elektrot arasında bulunan, protonu yani hidrojen atomu iyonunu (H^+) geçirebilen bir zar yer almaktadır. Anot olarak kabul edilen elektrot hidrojen gazı (H_2) yakıtı ile beslenmektedir. Anot-zar ara yüzeyine ulaşan hidrojen gazı yakıtı buradaki platin

katalizörün varlığında hidrojen gazı yakıtı parçalanarak serbest protonlara ve elektronlarına ayrışır. Serbest elektronların katoda hareketi, elektrotların her iki tarafında bulunan, içinde gaz akışı için açılmış kanalları olan, metal veya grafitten üretilmiş plakalar aracılığı ile bir dış devre üzerinden gerçekleşirken serbest protonlar, proton değişim zarı içerisinde geçerek katoda taşınır. Buraya ulaşan elektron ve proton katodu besleyen oksijen gazı (O₂) ile katot-zar ara yüzeyinde tepkimeye girerek su molekülüne (H₂O) dönüşür. Oksijen gazı burada oksitleyici olarak kullanılırken oluşan su molekülünün yanı sıra, serbest elektronların dış devre üzerinden hareketiyle elektrik enerjisi oluşurken, su oluşumu için meydana gelen toplam kimyasal tepkimenin ekzotermik olması nedeniyle ısı enerjisi de oluşmaktadır. Proton değişim zarlı yakıt hücresinde anot-zar ve katot-zar ara yüzeylerinde meydana gelen tepkimeler ve toplam tepkime Çizelge 4.1’de verilmiştir (Pyle et al.,1993; Liu et al.,1996; Ar, 1998; Hurley, 2002; Booth, 1993; <http://yunus.hacettepe.edu.tr/~yilser/yakitpili.htm>).

Çizelge 4.1. Anot-zar ve katot-zar ara yüzeylerinde meydana gelen tepkimeler ile toplam tepkime.

Anot - Zar	$\text{H}_2 + 2\text{Pt} \rightarrow 2(\text{Pt-H})$ $2(\text{Pt-H}) \rightarrow 2\text{Pt} + 2\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ $2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$
Katot - Zar	$4\text{H}^+ + \text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
Toplam Tepkime	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{elektrik} + \text{ısı}$

4.4. Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücresinin Performansı

Bir proton değişim zarlı yakıt hücresinin performansı, tasarım özelliklerine ve çalışma şartlarına bağlıdır. Bir proton değişim zarlı yakıt hücresinin tasarım özellikleri; yakıt hücresinin büyüklüğü ve şekline, kullanılan zar tipi ve kalınlığına, elektrot özelliklerine bağlıyken çalışma şartları açısından elektrotlardaki basınca, sıcaklığa, tepkime gazların nemliliğine, tepkime gazların saflığına ve ortamdaki suyun kontrolüne bağlıdır (Liu et al.,1996).

Yakıt hücresini büyüklüğü ve şekli; proton değişim zarlı yakıt hücrelerinde teorik olarak her büyüklük ve şekilde olabilmektedir. Ancak pratik olarak ise günümüz teknolojik uygulamalarında büyüklüğü 5 cm^2 'den $1,180 \text{ cm}^2$ 'ye kadar üretilmekte ve genellikle dikdörtgen şekillidir (Liu et al.,1996).

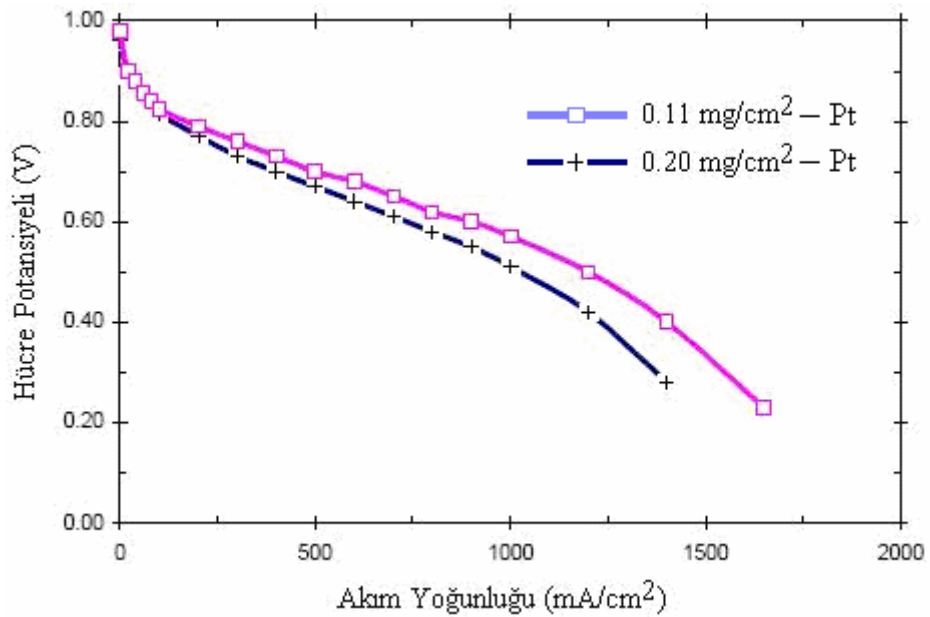
Zar maddesi ve kalınlığı; az sayıdaki firmalardan biri olan DuPont® tarafından üretilen Nafion™, doğrudan yakıt hücresi uygulamaları için üretilmesine de tek elde edilebilir ticari üründür. Nafion™ ticari adı olarak anılan bu zar maddesi aynı zamanda polimer perflorosülfonik asit adı ile de bilinmekte olup farklı kalınlıklarda (50, 125 ve $175 \mu\text{m}$) bulunabilmektedir. Nafion™ zarlar, güçlü baz veya asitlerle olan kimyasal tepkimelere, 125°C sıcaklığa kadarki ısı uygulamalarına karşı kararlı yapısını korumaktadır. Bir diğer üretici firma olan “Dow Chemical Company” firmasının ürettiği XUS 13204.10 adlı deneysel zarın kalınlığı $100 \mu\text{m}$ 'tır. Bu zar daha düşük elektriksel direnç ve yüksek akım yoğunluğu gibi iyi bir performansa sahiptir, ancak günümüzde maliyeti oldukça yüksektir. Son zamanlarda ise W.L. Gore ve çalışma arkadaşları çok iyi bir performansa sahip $20 \mu\text{m}$ kalınlığında bir zar geliştirmişlerdir (Liu et al.,1996; Vanderborgh et al., 1992; Ballard, 1990; Grot et al., 1992).

Günümüz proton değişim zarlı yakıt hücrelerinde kullanılan elektrolit zarlar pahalı olup sınırlı bir kalınlık aralığı ile özel bir iyonik iletkenlikte elde edilebilir. Proton değişim zarlarının maliyetini düşürme ve düşük direnç gösteren daha düşük maliyetli elektrolit zarlar araştırmaları vardır. Bu duruma istinaden ucuz zarlar düşük maliyetli proton değişim zarlı yakıt hücrelerini desteklerken, daha düşük dirence sahip ve daha ince zarlar ise yüksek güç yoğunluğunun elde edilmesini sağlamaktadır. Böylelikle elde edilebilecek hem düşük maliyetin hem de yüksek akım yoğunluğunun gerekli olduğu ulaşım sektöründeki kullanımı mümkün olacaktır (Buchi et al., 1992).

Elektrot özellikleri; çoğunlukla bir yakıt hücresi hakkındaki en önemli bilgidir. Performansının artırılması ve maliyetinin azaltılması için, katalizör tabakanın hazırlanışında, gözeneklere ve iletim tabaka yüzeyine veya doğrudan zar yüzeyine

çökertilmesi gibi değişik metotlar geliştirilmiş ve geliştirilmektedir. Standard platin yükü 4 mg/cm^2 olarak alınmasına rağmen oldukça maliyetli araştırmalar neticesinde elektrotların platin yükü 0.05 mg/cm^2 'de verimli çalışabilecek bir sonuca ulaşılmıştır. Günümüzde $0.3\text{-}0.4 \text{ mg/cm}^2$ 'lik platin yüklü elektrotlar mevcuttur (Liu et al.,1996; Wilson et al., 1992; Srinivasan et al., 1991; Taylor et al., 1992; Srinivasan et al., 1990).

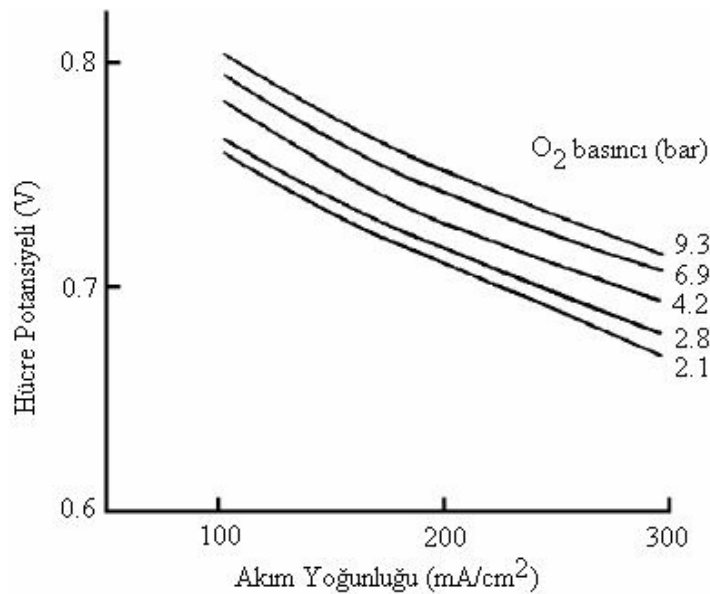
Elektrotlar ince filmler olarak dağıtılmakta ve elektrolit zara kaynaştırılmaktadır. "Ballard Power Systems" firmasında üretilip test edilen "Ballard Mark V" proton değişim zarlı yakıt hücresi yığınındaki düşük platin katalizör yüklü elektrotlar ($\leq 0.60 \text{ mg/cm}^2$ katot ve $\leq 0.25 \text{ mg/cm}^2$ anot) yüksek platin katalizör yüklü elektrotlara ($4.0 \text{ mg/cm}^2 - 8.0 \text{ mg/cm}^2$) nazaran daha iyi performans göstermiştir. Üretilen bu elektrotlar, 0.7 V potansiyele karşılık 600 mA/cm^2 akım yoğunluğu sağlamıştır. Platinin etkin kullanımını arttırmak için, sıvılaştırılmış proton değişim zarlı çözelti formu, gözenekli karbon yapının gözenekleri arasına sürülür. Bu elektro-katalizörler ile proton değişim zarlı elektrolit zar arasındaki proton iletimini artırır. Şekil 4.3'de iki farklı platin katalizör yüklerine göre elde edilmiş verilerin hücre potansiyeli - akım yoğunluğu grafiği verilmektedir (Ralph et al., 1997).



Şekil 4.3. Farklı platin katalizör yüklerine göre hücre potansiyeli - akım yoğunluğu grafiği.

Proton değişim zarlı yakıt hücresi üretimi için diğer bir yaklaşım en az 0.1 mg/cm^2 kadar düşük platin yüklü elektrotların seri üretimi için yapılmıştır. Elektrot yapısı, elektrolit ve platin birikintileri arasındaki iletim alanını arttırarak geliştirilmiştir. Bu yaklaşımın avantajları, üretilen 2 ila 3 mikronluk daha ince bir katalizör yüzeyi ile katalizörün homojen bir karışımı ve iyonomerdir. Üretilmiş olan 0.17 'den 0.13 mg/cm^2 platin yüklü proton değişim zarlı yakıt hücresi oksijen beslemeli haldeyken 0.4 V 'ta karşılık 3 A/cm^2 ve hava beslemeli haldeyken 0.65 V 'a karşılık 1 A/cm^2 elde edilmiştir. (Wilson et al., 1991; Derouin et al., 1992).

Katot ve anot basıncı; voltaj kazancına neden olabilmektedir. Bu nedenle bir yakıt hücresinin yüksek basınçta çalışması avantajlıdır. Çalışma basınçları genellikle hidrojen ve oksijen için sırasıyla 3 ve 5 bar'dır ki bunlar kolayca basınçlı gaz olarak uygulanabilir. Bununla birlikte oksitleyici olarak havanın doğal yapısında bulunan oksijen kullanılırsa voltaj kazancı açısından sıkıştırılması için bir miktar ek enerjiye ihtiyaç vardır. Oksijen basıncının proton değişim zarlı yakıt hücresi performansı üzerindeki etkisi Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Oksijen basıncında gerçekleştirilen bir artış hücre potansiyelinde bir artışa neden olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni oksijen basıncındaki artışın katotta polarizasyon azalması meydana getirmesidir. Ancak yine de atmosfer basınca yakın basınçlarda başarılı çalışmaların yapıldığı rapor edilmiştir (Liu et al., 1996; Lehman et al., 1994; LaConti et al., 1986).



Şekil 4.4. O_2 basıncının proton değişim zarlı yakıt hücresi performansı üzerindeki etkisi.

Uygun destekleyici yapı ve akım toplayıcıları kullanılarak, polimer elektrolit yakıt hücreleri ve elektroliz hücreleri 200 bar'a kadar olan basınçlarda ve 35 bar'a kadar olan diferansiyel basınçlarda çalışabilir hale getirilebilecektir (Grune,1992).

Sıcaklığın; yüksek olması, Tafel eğiminin ve proton iletim direncinin düşük olmasına, akım yoğunluğunun yüksek olmasına neden olmaktadır. Proton değişim zarlı yakıt hücresinin çalışma sıcaklığı genelde 80°C civarındadır, ayrıca 95°C'de iyi performansta çalıştığı rapor edilmiştir. Çalışma sıcaklığının proton değişim zarlı yakıt hücreleri üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Sıcaklıktaki bir artış elektrolitin omik direncini azaltarak hücrenin iç direncini düşürür. Sonuçta hücre performansında bir artış meydana gelir. Deneysel veriler her 1°C derecelik sıcaklık artışı için 1.1 mV ile 2.5 mV aralığında bir potansiyel kazanç olduğunu ortaya koymuştur (Liu et al., 1996; Srinivasan et al., 1991; Watkins, 1993; Amphlett, et al., 1998; Ledjeff et al., 1992).

Tepkime gazlarının nemliliği; proton değişim zarlarının proton iletim özelliklerini koruması için nemliliğini korumayı sürdürmelidir. Bu nedenle tepkime gazlar yakıt hücresine verilmeden önce nemlendirilmelidir. Ticianelli ve çalışma arkadaşları nemlilik için en uygun şartın hücre çalışma sıcaklığının 5-15°C üzerinde bir sıcaklıkta elde edildiği sonucuna varmıştır. Bu sonuca ek olarak Mosdale ve çalışma arkadaşları nemli olmayan proton değişim zarlı yakıt hücresinin performansı ile ilgili çalışmaları vardır. (Liu et al.,1996; Ticianelli et al., 1998; Mosdale et al., 1991).

Tepkime gazlarının saflığı; proton değişim zarlı yakıt hücresinin CO₂ gazı ile tepkimeye girmesiyle dolgu madde etkisi yapacağından önemlidir. Bunun yanı sıra CO gazı katalizöre boğulma etkisine yol açacağından yakıt hücre performansını özellikle düşük sıcaklıklarda ve basınçlarda önemli ölçüde etkilemektedir. Proton değişim zarlı yakıt hücreleri havanın doğal yapısındaki oksijen gazını oksitleyici olarak kullanabilir. Hava içersindeki oksijen oranı yalnızca %21 civarında olduğundan proton değişim zarlı yakıt hücresinin performansını etkileyen kısmi basıncıda ona göre düşürür. Böylelikle hücre potansiyelinin de azalma meydana gelir. Buna ilaveten azot gazı, oksijen gazının

elektrot-zar ara yüzeyine geçişini engellemektedir. Bu durum hücrede su tahliye problemlerini doğurur ve akım yoğunluğunu düşürmektedir (Liu et al., 1996).

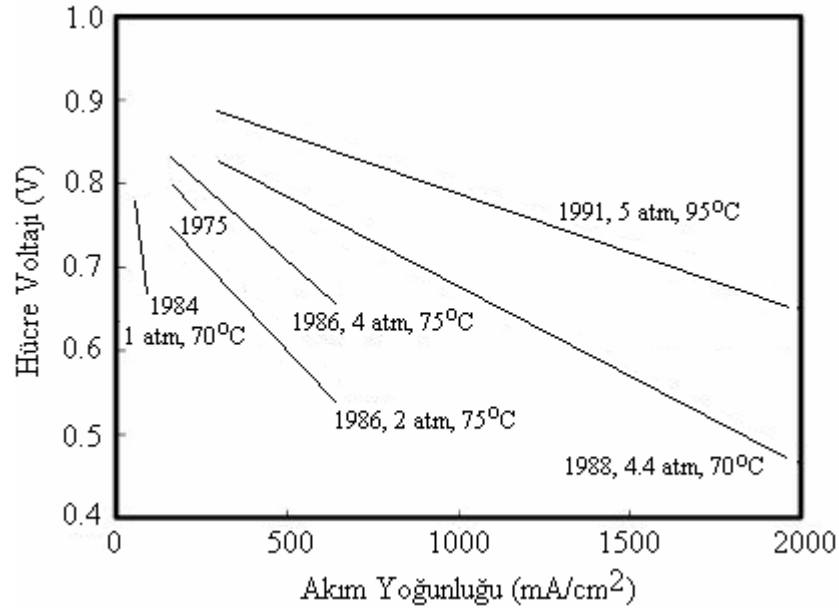
Su kontrolünün; hücre performansı üzerinde belirgin bir etkisi mevcuttur, çünkü yüksek akım yoğunluklarında su oluşumu ve dağılımı ile ilgili kütle taşınım özellikleri hücre verimini etkiler. Uygun su kontrolü olmadan, hücre içinde su üretimi ve buharlaşması arasında bir dengesizlik oluşacaktır. Tepkimeye girecek gazların su buharı ile seyrelmesini, elektrotların boğulmasını önleyeceği gibi proton değişim zarının hidrasyonunun da sağlamaktadır. Hidrasyon gerçekleşmezse, bir iletim köprüsü oluşturacak serbest bir sıvı elektrolit olmayacağından, proton değişim zarının elektroda karşı dayanımı olumsuz yönde etkilenecektir. Dolayısıyla elektrot ve elektrolit zar arasında yakın bir temas şarttır. Üretilen sudan daha fazlası buharlaşırsa, gelen gazın nemlendirilmesi önem kazanır. Bununla birlikte ortamda çok fazla nemlendirme olduğu takdirde de elektrot boğulur ki bu da gazın elektroda doğru difüzyonunu ile ilgili problemlere yol açar. Kapiler etki ile suyu hem azaltmak hem de desteklemek için zara bağlanmış fitil kullanarak hücre içindeki suyu kontrol etmek için çalışmalar vardır. Bir başka alternatif de gelen tepkime gazını nemlendirerek proton değişim zarlı yakıt hücresinin su dengesi kontrol edilebilir (Bernardi, 1990).

Proton değişim zarlı yakıt hücresi içerisinde su buhar olarak değil sıvı olarak üretilir. Elektrolit içerisinde yüksek iyonik iletkenliği sağlayabilmek için içerisinde yüksek oranda su miktarı sürdürülebilir kılınmalıdır. Elektrolit zar suya doymuş haldeyken iyonik iletkenliği daha büyük olup akıma karşı küçük bir direnç göstererek verimi artar. Zar içindeki su miktarı, su dengesi ile yani kimyasal tepkime süreci ile belirlenir. Su taşınmasına yardımcı faktörler, zar tarafından çekilen su, anottan verilen su ile nemlendirilmiş yakıt içerisindeki suyun difüzyonu ve kimyasal tepkime sonrası katotta oluşan suyun geri difüzyondur. Çekilen su, proton ile birlikte ozmotik olarak çekilen su miktarı anlamına gelmektedir. Her bir proton ile birlikte 1 ila 2.5 molekül su çekilir. Sonuç olarak, değiş tokuş edilen iyon hidratlaşmış proton, $H(H_2O)_n^+$ olarak görülebilir (Amphlett et al.,1991; Gottesfeld et al., 1993).

Proton değişim zarlı yakıt hücrelerinde yüksek bir enerji verimi elde edebilmek için aşağıdaki bazı şartlar yerine getirilmelidir (Watkins , 1993).

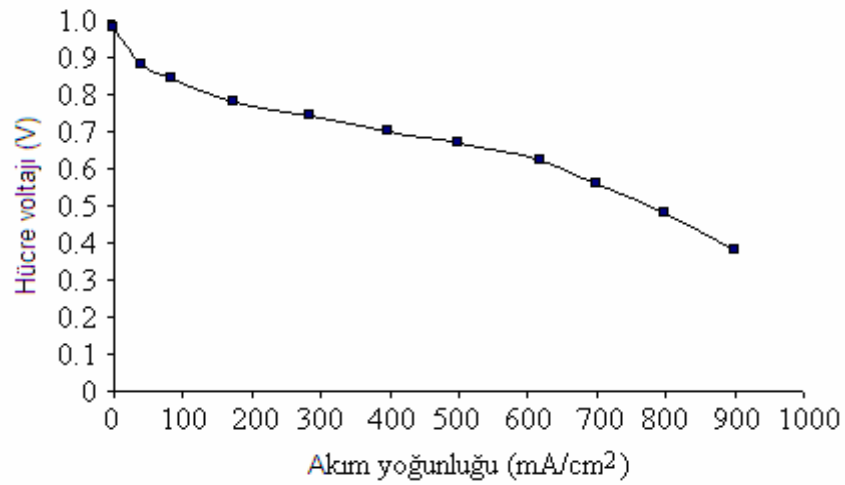
- Elektro-kimyasal tepkimenin meydana geldiği aktif yüzey alanını arttırmak, diğer bir ifadeyle platin gereksinimini asgari düzeyde tutmak.
- Tepkime gazlarının aktif bölgeye ve tepkime ürünlerinin aktif bölgeden tahliyesini hızlandırmak için elektrot yapısını iyileştirmek.
- Yüksek potansiyel karşısında düşük omik kayıp elde etmek. Buna  rnek olarak elektrolit tabakanın kalınlığının azaltılması ve yüksek proton iletkenli zarın kullanılması verilebilir.
- Uzun vadede kararlı performansın elde edilmesini sağlamak.

Proton değişim zarlı yakıt hücrelerinin performans değerleri basınç, sıcaklık, tepkime gazları gibi uygulama koşullarındaki farklılıklar nedeniyle geniş bir aralıkta elde edilebilir. Bu çeşit yakıt hücreleri ile elde edilmiş performans değerleri basın a ve çalışma sıcaklıklarına bağlı özellikleri şekil 4.5'te gösterilmiştir. “Los Alamos National Laboratory” ‘de üretilen proton değişim zarlı yakıt hücrelerinin yaklaşık 200 mA/cm^2 akım yoğunluğuna ve 780 mV potansiyele sahiptir. Üretilen bu yakıt hücresi 0.4 mg/cm^2 ‘lik platin yüküne sahip elektrotlardan ve iyonik iletkenliği sağlayacak zar olan Nafion™ ‘dan meydana getirilmiştir. Bu yakıt hücresi 3 bar hidrojen gazı ve 5 bar hava ile 80°C ‘lik çalışma sıcaklığında çalışmaktadır (LaConti et al., 1986).



Şekil 4.5. 1970'lerin ortalarından itibaren proton değişim zarlı yakıt hücrelerinin performans eğrileri.

“Energy Partner” şirketinin yakın zamanda ürettiği bir yakıt hücresinin performansı Şekil 4.6’te görülmektedir. Bu veriler, 3 bar basınç altındaki hidrojen gazı ve havanın doğal yapısındaki oksijen gazı beslemeli Gore Prime™ elektrolit zarına sahip 160 cm²’lik tek hücreli bir yakıt hücresinden elde edilmiştir. Benzer bir çalışma 780 cm² aktif alanlı bir üçlü hücre yığınıyla da elde edilmiştir (Liu et al., 1996).



Şekil 4.6. Proton değişim zarlı hidrojen/hava yakıt hücresinin performans eğrisi.

Yüksek bir enerji verimi elde edilmesi için proton değişim zarlı yakıt hücreleri düşük güç yoğunluğunda düşük akım yoğunluğu elde edecek şekilde çalıştırılmalıdır. Çünkü, yüksek enerji verimi ve yüksek güç yoğunluğunu her ikisini de aynı anda elde etmek zordur. Fakat iyi bir su ve ısı tahliyesi ile yüksek enerji verimi ve yüksek güç yoğunluğunu elde etmek mümkündür (Liu et al., 1996).

Çalışma ömrü yakıt hücresin performansının önemli bir parametresidir. Çalışma ömründeki değişimlerin nedenleri tam olarak anlaşılmış değildir. Fakat voltaj düşmesine yol açan sebepler kinetik yada aktivasyon kaybı, omik veya dirence bağlı kayıplar, madde transferi kaybı yada yakıtın iyileştirilme kaybıdır (Wilkinson et al., 1997).

Proton değişim zarlı yakıt hücrelerinin düşük çalışma sıcaklığı hem avantaj hem de dezavantaj doğurmaktadır. Normal ortam koşullarında özellikle saf hidrojen kullanıldığında proton değişim zarlı yakıt hücresinin çabucak çalışabilir olması avantajdır. Elektro-kimyasal tepkimenin gerçekleşmesi için platin katalizörlerin kullanımı gerekiyor olması ise dezavantajdır. Çünkü karbon monoksit (CO), 150°C 'nin altındaki sıcaklıklarda platine sıkıca bağlanır. Bu da hidrojenin ve elektro-oksidasyon için gerekli alanda azalmaya neden olur (Grubb, 1957; Gottesfeld et al., 1998).

CO miktarları platin katalizör yüzeyince soğurularak hidrojen gazı yakıtının platin katalizör ile tepkimeye girmesini engellemektedir. Yapılmış deneyler neticesinde, gaz akımı içerisinde 10 ppm'lik CO miktarı hücre performansını etkilemeye başladığını göstermektedir. Yakıt gazın iyileştirilmesi ile CO miktarını birkaç ppm'e indirgeyebilir, ancak bu durum sistem maliyetinin artmasına neden olur (Gottesfeld et al., 1993; Final Report, 1991; Wilkinson et al., 1997).

Süregelen araştırmaların birincil amacı hücrenin performansını arttırmak ve maliyetini azaltmaktır. İlerlemenin en önemli alanları hücre zarlarını geliştirmek, yakıt kaynağında CO'ı tutabilmek ve elektrot tasarımını iyileştirmektir (Wilkinson et al., 1997).

Proton değişim zarlı yakıt hücrelerinin daha verimli çalışmaları için katalizörün etkin kullanımı, hücre basıncının artırılması, proton değişim zarının iyonik iletkenliğinin iyileştirilmesi konularında çalışmalar yapılmaktadır (Sikari et al., 1992).

Proton değişim zarlı yakıt hücrelerinin çoğu halen, akımın toplanması, gaz akışının ve dağıtımının sağlanması için işlenmiş grafit tabakaları kullanılmaktadır. Araştırmalar aynı zamanda pahalı yüksek saflıklı grafit dipolar plakaların yerine kullanılabilecek düşük maliyetli, hafif grafit malzemeler üzerine yoğunlaşmıştır (Wilkinson et al., 1997; Peinecke et al., 1992).

Kararlı performans, 2.4/5.1 atmosfer, H₂/hava ve 80°C (4000 saat performansı 600 mA/cm²'de 0.5V'tu) koşullarında 0.13 mg Pt/cm² 'ye sahip Nafion zar ile 4000 saat için kanıtlanmıştır (Amphlett et al.,1991).

Kullanılan malzemelerin kendine özgü doğaları nedeniyle, yaklaşık 80°C 'lik düşük bir sıcaklıkta çalışabilmektedir. Yakıt gazının saf bir halde gönderilmesi proton değişim zarlı yakıt hücresi bileşenleri üzerinde bozulmaya yol açmamaktadır. Hücre aynı zamanda, çok yüksek akım yoğunluklarındaki çalışmalarda da işlemektedir. Bu avantajlar, hızlı başlangıç çalışma süresi ile hareketli parçasının bulunmayışı nedeniyle daha derli toplu, hafif ve sessiz çalışan bir yakıt hücresi yapabilme imkanı sağlamış olur (Amphlett et al., 1991; <http://yunus.hacettepe.edu.tr/~yilser/yakitpili.htm>; Gottesfeld et al., 1993).

4.5. Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücresinin Uygulama Alanları

Son birkaç yıl içerisinde proton değişim zarlı yakıt hücreleri üzerinde, hem maliyetin hem de performansın geliştirilmesi konusunda çalışmalar vardır. Bu alandaki gelişmeler, ticari kurumlar için tatmin edici noktaya kadar ulaşmıştır. Proton değişim zarlı yakıt hücresi teknolojisiyle ilgili kayda değer gelişmeler “Ballard Power Systems” tarafından gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde açık hava akımında, basınçlı hava akımına nazaran, yakıt gazın nemlendirilmesi yada sistemde aktif soğutma olmaksızın 6 hücreli proton değişim zarlı yakıt hücresi yığını için 25000 saatin üzerinde çalışabilme süresini ortaya koymuştur. Bu günümüz araştırmaları olan, güç

yoğunluğunun arttırılması, su idaresinin geliştirilmesi, maliyetinin azaltılması, normal şartlar altında çalıştırılması, geri dönüşümlü yakıt sağlaması ve hücre yığını ömrünün arttırılması çalışmaları üzerine yoğunlaştırılmıştır (Wilkinson et al., 1997).

“Ballard Power Systems” proton değişim zarlı yakıt hücresi ve proton değişim zarlı yakıt hücresi yığını tasarımları ve üretim detayları sadece kurumca bilinmektedir. Ancak literatürde, proton değişim zarlı yakıt hücresi ve proton değişim zarlı yakıt hücresi yığını tasarımı ile ilgili sınırlı bilgiler sunulmuştur.

Tamamlanmış yakıt hücresi sistemleri, toplu taşıma otobüsleri ve kişisel otomobilleri de içeren sayılarca ulaşım uygulaması için yaygınlaştırma çalışmaları vardır (Wilkinson et al., 1997).

Proton değişim zarlı yakıt hücreleri, doğal gazı ve diğer hidrojen-zengini gazları kullanacak olan şebeke gücü uygulamaları için de düşünülmektedir. Ayrıca cep telefonlar, dizüstü bilgisayarlar, kesintisiz güç kaynakları gibi portatif alanlarda da uygulamaları vardır (Appleby et al., 1986).

5. PROTON DEĞİŞİM ZARLI YAKIT HÜCRESİ İMALATI

5.1. Giriş

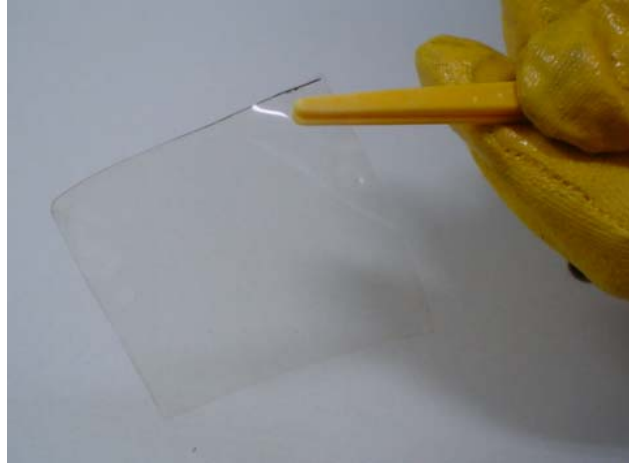
Proton değişim zarlı yakıt hücresi imalatı adlı bu bölümde farklı besleme türlerine göre proton değişim zarlı yakıt hücrelerin her bir bileşeninin nasıl üretilbileceği ve bir araya getirileceği konu edilerek bu üretim esnasında hangi zorluklarla karşılaşılabileceği incelenmiştir.

5.2. Proton Değişim Zarının Hazırlanması

İlk aşamada yakıt hücresinin aktif yüzey alanı olacak elektrot ebatlarının her bir kenarından yaklaşık birer cm daha geniş olacak şekilde proton değişim zarı kesilmiştir. Proton değişim zarının her bir kenarı 4 cm olacak biçimde kesilmiştir. Üzerinde işlem yapılan proton değişim zarı olarak 9 µm kalınlıklı Nafion™ N-1035 seçilmiştir. Kullanılan proton değişim zarının ticari hali ile işlemeye hazır ve kesilmiş hali sırasıyla Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de gösterilmektedir.

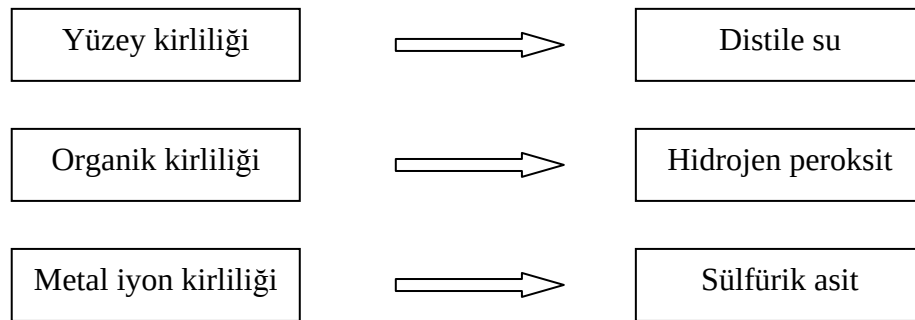


Şekil 5.1. Proton değişim zarı Nafion™ 'un ticari hali.



Şekil 5.2. Proton değişim zarı Nafion™ 'un işlemeye hazır kesilmiş hali.

Proton değişim zarının, yakıt hücresini oluşturacak diğer yakıt hücresi bileşenleriyle birlikte verimli şekilde kullanılabilmesi için zarın kirliliklerden arındırılması gerekmektedir. Proton değişim zarı üzerindeki olası kirlilikler yüzey kirliliği, organik kirlilik ve metal iyon kirliliğidir. Zar kirliliğine nelerin sebep olduğu ve kirliliğin hangi kimyasallarla temizlenebileceği Şekil 5.3'de verilmektedir.



Şekil 5.3. Proton değişim zarı kirliliği ve arındırma kimyasalları.

Oda sıcaklığından daha yüksek sıcaklık değerlerinde çözünürlük ve tepkime hızının daha iyi olması nedeniyle, kirliliklerin temizlenmesi için gerekli işlemler 80°C ortamında ve bir su banyosu eşliğinde yapılmıştır. Tüm bu kirlilik arındırma işlemi boyunca kullanılan Nüve™ NB5 tipi su banyosu Şekil 5.4'de gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Zar kirliliğinin temizlenmesinde kullanılan su banyosu.

Zar kirliliğinin temizlenmesindeki birinci aşamada, 80°C sıcaklık değerinde 150 ml saf su bulunan bir beher içerisinde, zar tamamen daldırılıp yaklaşık bir saat kadar bekletilmiştir. Bu süre içerisinde zarın yüzey kirliliği temizlenmiş olacaktır. İkinci aşamada ise saf su içerisinde bulunan zar, yine 80°C sıcaklık değerinde 150 ml hidrojen peroksit içerikli behere aktarılmış ve bu ortamda yaklaşık bir saat bekletilmiştir. Böylece zar yüzeyindeki organik kirliliğin temizlenmesi de sağlanmıştır. Üçüncü aşamada ise hidrojen peroksit içerisinde bulunan zar, yine 80°C sıcaklık değerine sahip 150 ml sülfürik asit bulunan bir behere aktarılmış ve burada yaklaşık olarak bir saat bekletilmiştir. Bu işlem neticesinde de zar metal iyon kirliliğinden arındırılmıştır. Dördüncü ve son aşamada ise zar, sülfürik asitten arındırmak ve hidrat etmek için yine 80°C sıcaklık değerinde 150 ml saf su bulunan beher içerisinde bir saat kadar bekletilmiştir. Bu son aşama bir veya iki kez tekrarlanmıştır. Proton değişim zarının hazırlanması aşamalarının tamamlanmasından sonrasında proton değişim zarı saf su bulunan bir beher içerisinde korumaya alınmıştır.

Yukarıda proton değişim zarı kirliliğinin temizlenmesinde bahsedilen aşamalar gerçekleştirilirken, proton değişim zarının her bir aşamada beher içerisinde bulunan sıvı kimyasallara tam olarak daldırılmış olmasına dikkat edilmelidir. Böylelikle zarın her iki yüzey alanı da işlem görmüş olacaktır. Aksi taktirde aşamalar amacına ulaşmayacaktır. Proton değişim zarının bir beherden diğerine alınması esnasında, zedelenmemesi için uçları yuvarlatılmış pürüzsüz çubuklar kullanılmalıdır. Kullanılacak bu çubukların kimyasallarla tepkimeye girmemeleri gerektiğinden, duruma göre ağaç, cam veya plastik çubuk kullanılmalıdır.

5.3. Elektrotların Hazırlanması

Elektrotların hazırlanmasının ilk aşamasında, elektrot olarak kullanılacak karbon dokumaların her bir kenarı 3 cm olacak şekilde kesilmiştir. Dokumanın kenarları kolaylıkla sökülüp ayrışabileceğinden bu noktaya özen gösterilmelidir. Bunun yanı sıra dikkat edilmesi gereken bir başka nokta, ortamda bulunan tozun ve parmaklardaki yağın karbon dokuma üzerine geçmesinin önlenmesi açısından, naylon eldiven ile mümkün olduğunca tozdan arındırılmış bir ortam içerisinde kesme işleminin gerçekleştirilmesidir. Karbon dokumanın kesilmiş hali Şekil 5.5’de gösterilmiştir. Karbon dokuma iletken ve yakıt ile oksitleyici gazları geçirebilir olması nedeniyle kullanılmıştır.



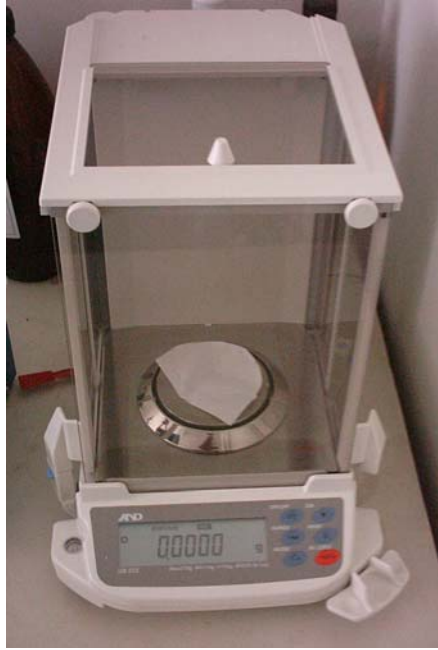
Şekil 5.5. Karbon dokumanın kesilmiş hali.

Elektrot olarak kullanılacak karbon dokumanın platinle kaplanabilmesi için bir takım kimyasal tepkime içerikli bir yol izlenmesi gerekmektedir. İzlenecek bu yolda kullanılacak kimyasallar “Ammonium Ferric (III) Oxalate” $[(\text{NH}_4)_3\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3 \times \text{H}_2\text{O}]$ ve “Potassium Tetrachloroplatinate (II)” $[\text{K}_2\text{PtCl}_6]$ 'dir. Bu kimyasallar toz halde bulunmaktadır.

İlk aşamada “Ammonium Ferric (III) Oxalate” kimyasalından %35'lik bir çözelti hazırlanmıştır. Bunun için 0.3 g “Ammonium Ferric (III) Oxalate” 0.85 ml saf su ile çözülmüştür. Bu tepkime yaklaşık 24 saat sürmektedir. Bu sürenin sonunda ikinci aşamada %35'lik “Potassium Tetrachloroplatinate (II)” çözeltisi hazırlanmıştır. Bunun içinde 0.2 g “Potassium Tetrachloroplatinate (II)” 0.37 ml saf su ile çözülmüştür. Çözülme işlemi 10 dakika kadar sürmektedir. Hazırlanan bu iki çözelti karıştırılarak tek bir çözelti elde edilmiştir.

Bu çözeltiler hazırlanırken kimyasallardan ilki olan “Ammonium Ferric (III) Oxalate” ışığa (morötesi) duyarlı bir kimyasal olması nedeniyle gerekli işlemler ışısız ortamda sarı ışık veya sodyum buharı lambasının yaydığı ışık altında yapılmalıdır. “Ammonium Ferric (III) Oxalate” 'ın morötesi ışığa maruz kalması neticesinde kimyasal yapısındaki “ferric oxalate” “ferrous” forma dönüşmektedir. Morötesi ışığa duyarlı olmasının yanı sıra “Ammonium Ferric (III) Oxalate” metal ile de kolay tepkimeye girebildiğinden gerekli tartım işlemlerinde kullanılan daranın ve spatulanın metal olmamasına dikkat edilmelidir. Bu nedenle plastik veya kağıt bir dara ve spatula kullanılmıştır.

Bu kimyasallardan ikincisi ile hazırlanan “Potassium Tetrachloroplatinate (II)” çözeltisi için tepkimenin gerçekleştiği ortam sıcaklığı 45-50°C aralığında olmalıdır. Bu sıcaklık değerlerinden düşük sıcaklıklarda çözelti “chloroplatinate” 'in değişik bir formuna dönüşmektedir. Ortam sıcaklığı aynı zamanda 60°C üzerine çıkacak olursa “Potassium Tetrachloroplatinate (II)” kimyasalının yapısı bozulmaya uğrayacaktır. Bu çözeltiler hazırlanırken kimyasalların tartım miktarlarının küçük olmaları nedeniyle tartım işlemi kapalı hassas bir terazi yardımıyla yapılmıştır. Bu tartım için kullanılan AND™ dijital terazi Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Kimyasal tartımlarda kullanılan kapalı dijital hassas terazi.

Elde edilen çözeltinin son halinin ışık, ısı gibi unsurlar nedeniyle bozulup bozulmadığını anlamak için bir miktar çözelti fırça yardımı ile beyaz bir kağıt üzerine uygulanır ve morötesi ışığa maruz bırakılır. Eğer kağıt üzerinde çözeltinin uygulanmış olduğu bölge siyaha dönüşürse hazırlanan çözelti istenilen formda oluşmuş demektir. Aksi taktirde sarımsı veya yeşilimsi bir renk almaktadır. Olumlu ve olumsuz deneme uygulamalarının tek bir kağıt üzerindeki görüntüsü Şekil 5.7’de gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Deneme uygulamalarının tek bir kağıt üzerindeki görüntüsü.

Son haldeki çözelti kullanılarak bir fırça yardımı ile anot ve katodu oluşturacak karbon dokumaların birer yüzeyleri kaplanmıştır. Karbon dokumaların yüzeyleri üzerinde boşluk kalmamasına dikkat edilmelidir. Aksi halde proton değişim zarlı yakıt hücresinin aktif yüzey alanı küçülmüş olacaktır. Kaplanan karbon dokumalar karanlık bir ortamda yaklaşık 4-5 saat kurumaya bırakıldıktan sonra fotokimyasal işleme tabi tutulmuştur. Fotokimyasal işlem, kaplanmış karbon dokumaların 6 saat süreyle morötesi ışığa maruz bırakılması esasına dayanmaktadır. Bunun için karbon dokumaların kaplı yüzeyleri doğrudan güneş ışığına maruz bırakılabileceği gibi Şekil 5.8’de gösterilen morötesi ışık lambası içeren bir cihaza yerleştirilerek morötesi ışığa da maruz bırakılabilmektedir.



Şekil 5.8. Morötesi ışık lambası içeren bir cihaz.

Karbon dokumaların morötesi ışığa maruz bırakılmalarındaki amaç kaplanan çözeltinin morötesi ışık etkisiyle “ferrous oxalate” ’e dönüşmesini sağlamaktır. Bunun sonucunda kaplanan çözelti içerisindeki platin açığa çıkmakta ve karbon dokumalara tutunmaktadır. Bu işlem sonrasında “ferrous oxalate” ’ı karbon dokumalar üzerinden almak için saf su ile çözülmelidir. Bunun için karbon dokumalar saf su içerisine daldırılarak yıkanmıştır. Yıkama işlemi karbon dokumalar üzerindeki platini sökebileceğinden en az kayıpla hassas bir şekilde yıkanmalıdır. Bunun için karbon dokumalar saf su içerisinde 2-3 dakika bekletilmiş ve sonra dikkatlice ikinci bir saf su yıkama işleminde yine 2-3 dakika kadar bekletilmiştir. Ardından karbon dokumalar dikkatlice “ferrous oxalate” ’ın çözüldüğü saf sudan çıkartılıp düz bir zemin üzerinde

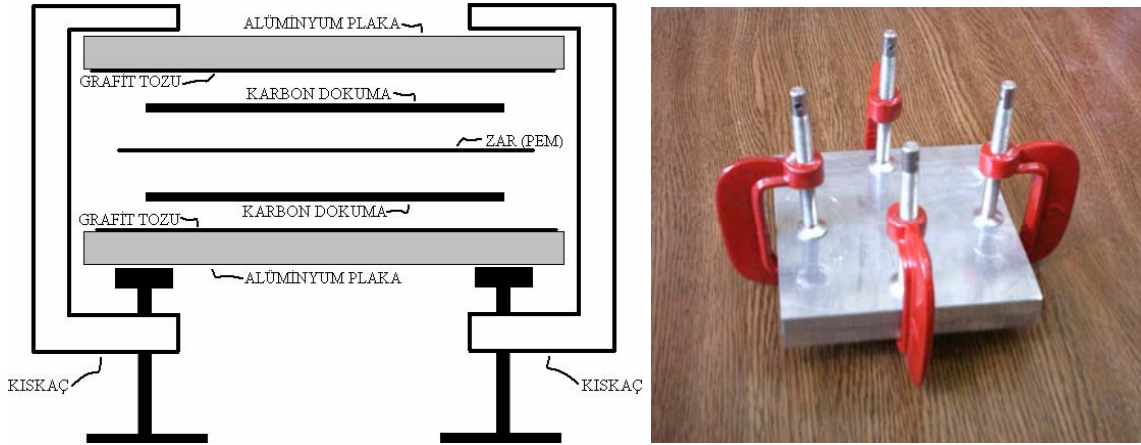
kurutulmuştur. Kurutma işlemi sonrasında karbon dokumalar dış etkenlerden korunulması için kapalı bir ortamda muhafaza altına alınmıştır.

Hazırlanan elektrotların platin yükü kullanılan kimyasalların miktarları doğrultusunda 3.97 mg/cm^2 kadardır. Yüklü platin, proton değişim zarlı yakıt hücresinin çalıştırılmasında katalizör görevi görmektedir.

5.4. Sıcak Pres ile Elektrot-Zar Yapısının Oluşturulması

Elektrot-zar yapısının elde edilmesi için platin katalizör yüklü karbon dokumanın proton değişim zarı ile kaynaşması sağlanmıştır. Bunun için her iki karbon dokumanın katalizör kaplı yüzeyleri sıvılaştırılmış proton değişim zarı ile kaplanmıştır. Ticari adı “perflourosulfonic acid Nafion™ 5% w/w” olan, sıvı haldeki proton değişim zarı çözeltisi ile kaplanan karbon dokumalar yaklaşık bir saat kadar kurumaya bırakılmıştır. Kurutma işlemi süresince sıvılaştırılmış proton değişim zarı çözeltisinin içerdiği alkol miktarının uçması sağlanmıştır.

Kuruma işleminden sonra dokumanın kaplanmamış yüzeyi alta gelecek şekilde, bir tarafı grafit tozu ile sıvanmış alüminyum bir plakanın sıvanmış yüzeyi üzerine konmuştur. Üzerine proton değişim zarı, karbon dokumanın dışarılarına taşacak şekilde ortalanarak yerleştirilmiştir. Onun üzerine de karbon dokumanın diğer parçası, kaplanmamış yüzey yukarı gelecek biçimde ve bir önceki karbon dokuma ile simetri oluşturacak şekilde proton değişim zarının üzerine konmuştur. Son olarak yine bir tarafı grafit tozu ile sıvanmış, ikinci bir alüminyum plaka, sıvanmış kısım alta gelecek şekilde diğerlerinin üzerine konarak kısıpçılarla sıkıştırılmıştır. Elektrot-zar yapısının sıcak pres işlem öncesi sandviçin şematik hali ve fotoğrafı Şekil 5.9’da gösterilmektedir.



Şekil 5.9. Sandviç yapının şematik hali ve fotoğrafı.

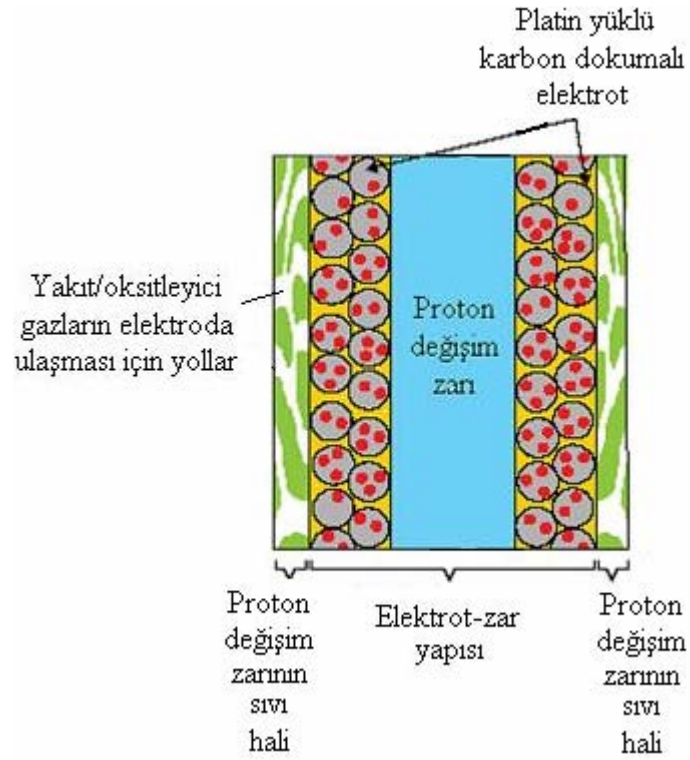
Sandviç yapının sıcak pres işlemi kolaylık açısından Şekil 5.10'da gösterilen, 1800°C 'ye kadar çıkabilen Nabertherm marka sıcaklık değeri ayarlanabilir ve programlanabilir bir fırın aracılığı ile yapılmıştır.



Şekil 5.10. Sıcaklık değeri ayarlanabilir ve programlanabilir fırın.

Fırınlama işlemde, sandviç yapı, önceden 90°C'ye ısıtılmış fırına yerleştirilmiş ve bir saat bu sıcaklıkta tutulmuştur. Sonra fırının sıcaklığı kademeli olarak yarım saatlik bir süre içerisinde 130°C'ye çıkartılmıştır. Bu sıcaklık değeri sıvılaştırılmış proton değişim zarına ait camı geçiş sıcaklığıdır. Bu işlem esnasında karbon dokumalar

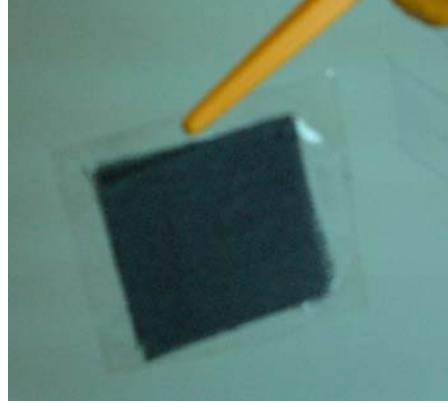
üzerinde ince bir film tabakası halindeki sıvılaştırılmış proton değişim zarı çözeltisi içerisinde bulunan su buharlaşarak katı haldeki proton değişim zarının yapısını alır. Sıvılaştırılmış proton değişim zarı çözeltisindeki su miktarının azalması sonucunda, karbon dokumalar üzerinde kapladığı alan sabit kalacağından film üzerinde çatlaklar oluşacaktır. Bu çatlaklar yakıt/oksitleyici gazların elektrot-zar ara yüzeyine ulaşmasını sağlayacaktır. Elde edilecek olan proton değişim zarlı yakıt hücresinin elektrot-zar yapısının şematik görünümü Şekil 5.11’de gösterilmiştir.



Şekil 5.11. Elektrot-zar yapısının şematik görünümü.

Camsı geçiş sıcaklığı esnasında uygulanacak bir basınç ile elektrot-zar yapısının iyice kaynaşması sağlanmakla birlikte mobilitesi de artmaktadır. Uygulanacak bu basınç değeri 70 N/m^2 kadardır. Bu süre sonunda sandviç yapı fırından çıkartılarak klipsler gevşetilmiş ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Soğuma işlemi bir buçuk ile iki saat gibi bir süreyi bulmuştur. Soğuduktan sonra alüminyum plakalar sökülerek

Şekil 5.12’de gösterilen, proton değişim zarlı yakıt hücresinin kalbini teşkil edecek olan elektrot-zar yapısı elde edilmiştir.



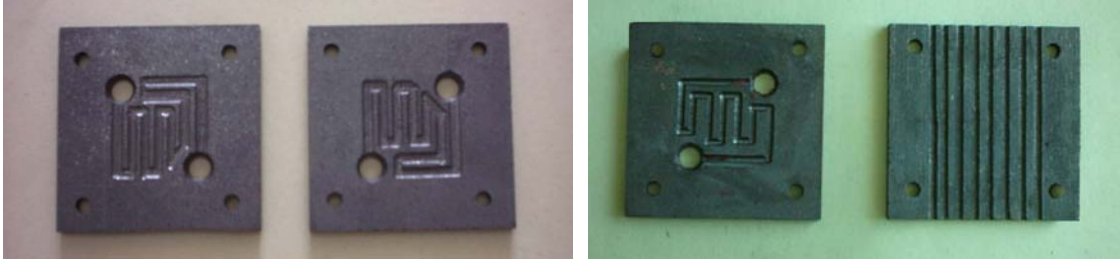
Şekil 5.12. Elektrot-zar yapısı.

Elektrolit-zar yapısının sandviç yapısında kullanılan alüminyum plakalar esneme yapabilme ihtimaline karşılık kalın seçilmeli veya dış yüzeyler alüminyumdan daha sert yapıda olan plakalarla takviye edilmelidir. Alüminyum plakaların grafit tozu ile sıvanmasındaki amaç sıcak pres işlemi boyunca elektrot-zar yapısında kullanılan malzemelerin alüminyuma yapışmasını önlemektir.

5.5. Gaz Akış Plakalarının Hazırlanması

Elde edilen elektrot zar yapısının kapalı bir sistem içerisinde yer alabilmesi ve gazların elektrot yüzeylere ulaşabilmesi için yeteri kalınlıkta iki grafit levhanın birer yüzlerine gaz akış kanallarının açılması gerekmektedir. Grafit levhalar 7.5 cm x 7.5 cm ebatlarında ve 0.5 cm kalınlığında seçilmiştir. Grafit levha üzerine açılan gaz akış kanalları 0.2 cm derinliğe ve 0.3 cm genişliğe sahiptir. Açılan gaz akış kanallarının başlangıç ve bitim noktalarında grafit levhalar diğer yüzeye doğru delinerek gaz girişleri bu açılan deliklerden sağlanmıştır. Bu levhaların sistem içerisinde bir arada tutulabilmesi için her bir köşelerine vida delikleri de açılmıştır. Farklı türdeki proton

değişim zarlı yakıt hücrelerinde kullanılan grafit levhaların hazırlanmış halleri Şekil 5.13'te verilmiştir.



Şekil 5.13. Grafit levhaların işlenmiş hali.

Grafit levhaların kırılgan bir yapıya sahip olmaları nedeniyle; kesilmesi, yiv açılması ve delinmesi işlemleri büyük bir dikkatle yapılmalıdır. Grafit levhalar üzerinde yapılacak tüm bu işlemler aynı zamanda grafitin kolay işlenebilir olması nedeniyle Şekil 5.14'de gösterilen basit bir el matkabıyla kendi tezgahı üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.14. Delme ve yiv açma işlemlerinin gerçekleştirildiği el matkabı.

5.6. Dış Devre ve Gaz Giriş/Çıkış Hortum Bağlantılarının Oluşturulması

Proton değişim zarlı yakıt hücresinin dış devre bağlantısını proton değişim zarlı yakıt hücresini bir arada tutacak tutucuların birer kenarlarına monte edilmiş soket yuvalarında bulunan metal folyolar sağlamaktadır. Şekil 5.15’de tutucular üzerine monte edilecek soket yuvalarına tutturulmuş bu metal folyo gösterilmektedir.



Şekil 5.15. Soket yuvalarına tutturulmuş metal folyolar.

5.7. Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücresinin Birleştirilmesi

Proton değişim zarlı yakıt hücresini oluşturacak bileşenlerin bir arada tutulmasını sağlayacak tutucular kullanılmıştır. Bu tutucular 7 cm x 7 cm ebatlarında ve 1 cm kalınlığında, esnemesi zayıf, iletken olmayan fiberglas malzemeden seçilmiştir. Şekil 5.16’da tutucuların üzerine açılmış hidrojen/oksijen beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresini bir arada tutacak vida delikleri, yakıt/oksitleyici gaz giriş/çıkış delikleri, ve dış devre bağlantısını sağlayacak metal folyolu soket yuvaları görülürken Şekil 5.17’de hidrojen/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresini bir arada tutacak vida delikleri, yakıt/oksitleyici gaz giriş/çıkış delikleri, ve dış devre bağlantısını sağlayacak metal folyolu soket yuvaları görülmektedir.



Şekil 5.16. Hidrojen/oksijen beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresi tutucuları.

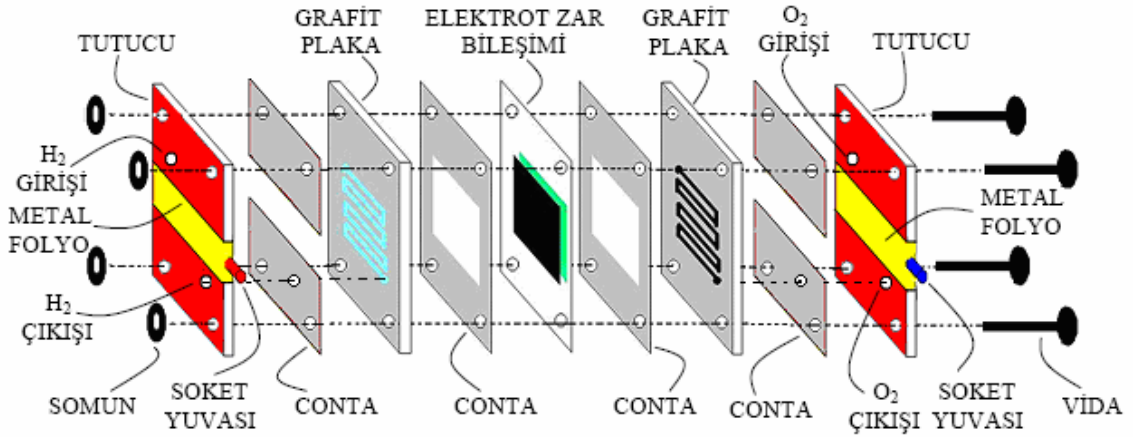


Şekil 5.17. Hidrojen/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresi tutucuları.

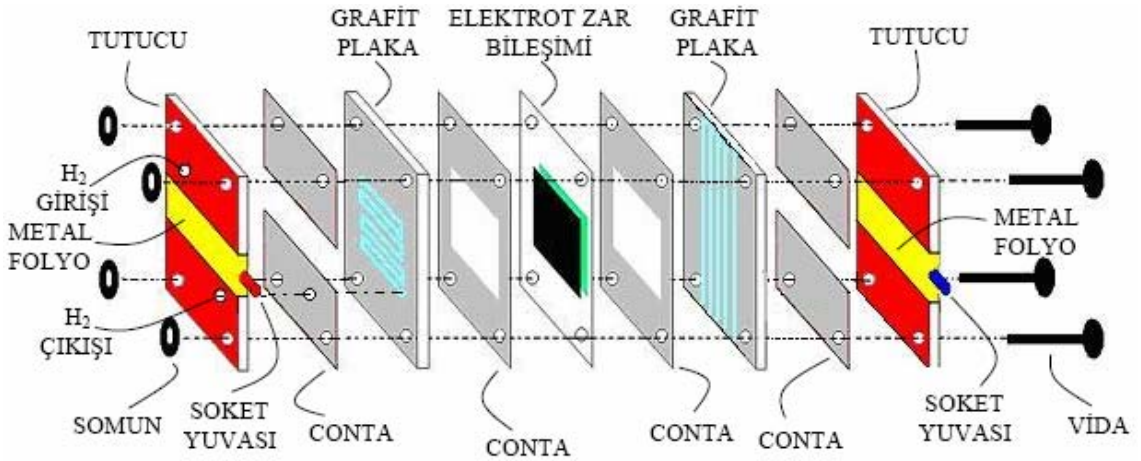
Proton değişim zarlı yakıt hücresini oluşturacak bileşenler bir araya getirilerek vidalar ve somunlarla tutturulmuştur. Elektrotlar arası kısa devreyi önlemek açısından vidalar izole edilerek kullanılmıştır. İzolasyon için streç film kullanılmıştır. Bunun yanında proton değişim zarlı yakıt hücresi bileşenleri arasına oluşabilecek gaz sızıntısını önlemek için aralarına uygun kalınlık ve ebatlarda contalar kullanılmış ve gereken yerler gaz sızıntısı önleyici bir yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır.

Bu bir araya getirilecek proton değişim zarlı yakıt hücresi hidrojen/oksijen beslemeli olabileceği gibi hidrojen/hava beslemeli de olabilir. Yakıt/oksitleyici ve

yakıt/hava beslemeli oluşturulacak proton değişim zarlı yakıt hücreleri bileşenlerinin birleşim şemaları sırasıyla Şekil 5.18 ve Şekil 5.19’da gösterilmiştir.

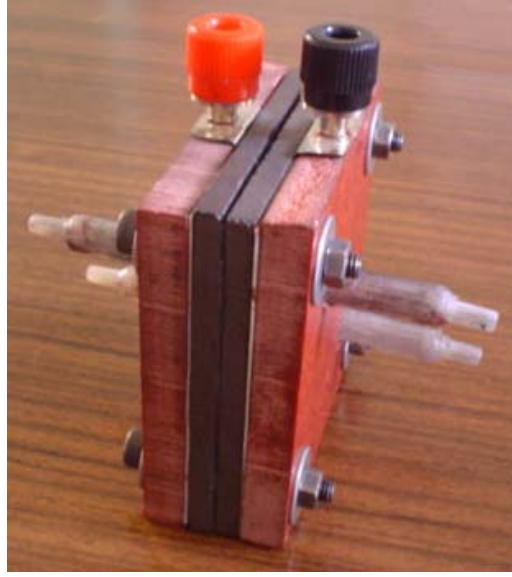


Şekil 5.18. Hidrojen/oksijen beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin birleşim şeması.

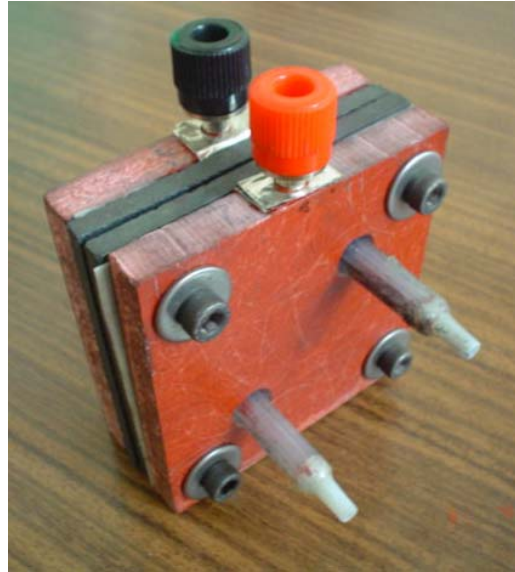


Şekil 5.19. Hidrojen/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin birleşim şeması.

Gerek yakıt/oksitleyici gerekse yakıt/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücrelerinin imal edilmiş haldeki fotoğrafları sırasıyla Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’de verilmiştir.



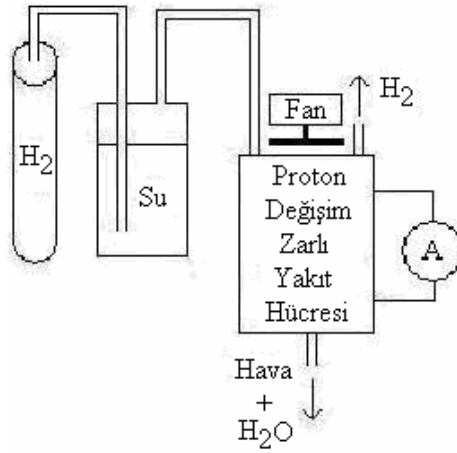
Şekil 5.20. Hidrojen/oksijen beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin fotoğrafı.



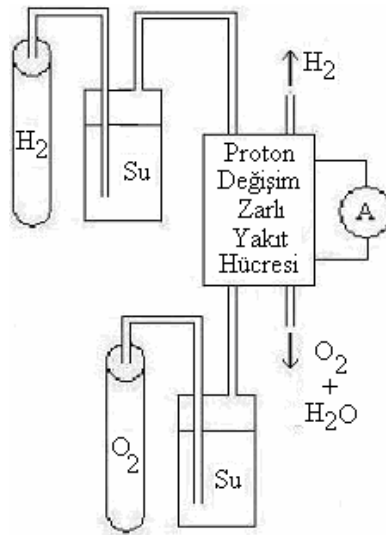
Şekil 5.21. Hidrojen/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin fotoğrafı.

5.8. Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücresinin Çalıştırılması

İmal edilen proton değişim zarlı yakıt hücrelerinin çalıştırılması gaz giriş/çıkış kanallarının hidrojen/hava veya hidrojen/oksijen gazları ile beslenmesiyle mümkündür. Çalıştırılan hidrojen/hava ve hidrojen/oksijen beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücrelerinin şematik gösterimleri sırasıyla Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'te gösterilmiştir.

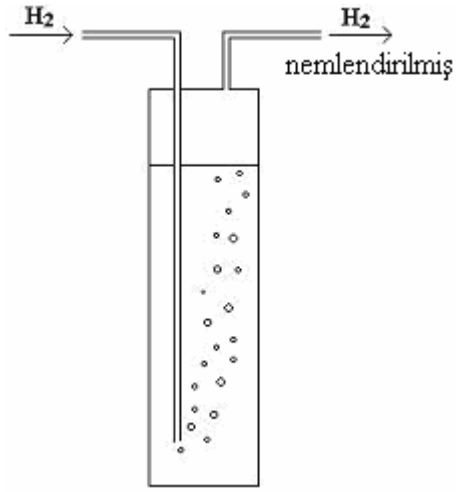


Şekil 5.22. Çalıştırılan hidrojen/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin şematik gösterimi.



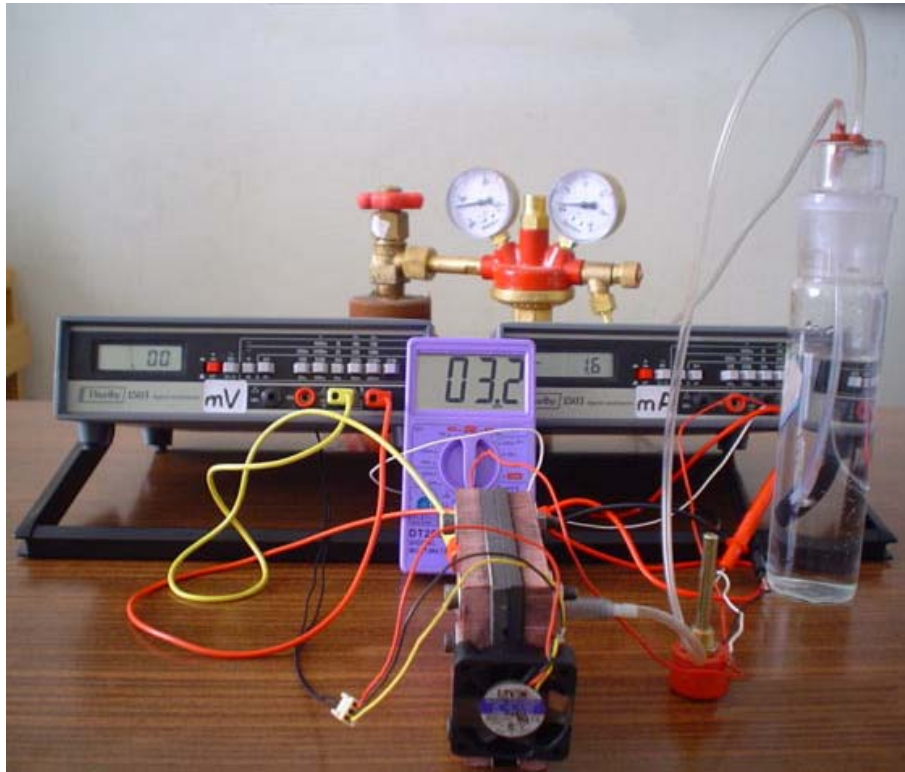
Şekil 5.23. Çalıştırılan hidrojen/oksijen beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin şematik gösterimi.

Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'te görüldüğü üzere gerek yakıt gerekse oksitleyici olsun proton değişim zarlı yakıt hücresine verilmeden önce bir ara ünite olan nargile ünitesinden geçmektedir. Bu nargile ünitesinin amacı beslemesi yapılan gazların nemlendirilmesidir. Bunun sonucunda proton değişim zarı iletim özelliğini koruduğu gibi katot tarafından gerçekleştirilecek oluşan suyun osmozunu engellemiş olunacaktır. Proton değişim zarlı yakıt hücre sisteminde kullanılan nargile ünitesinin şematik gösterimi ve fotoğrafı Şekil 5.24'te gösterilmiştir.



Şekil 5.24. Nargile ünitesinin şematik gösterimi ve fotoğrafı.

Proton değişim zarlı yakıt hücresinin hidrojen/hava ve hidrojen/oksijen beslemeli özelliklerine göre bağlı diğer üniteleriyle birlikteki çalışır halinin fotoğrafları sırasıyla Şekil 5.25 ve Şekil 5.26’te verilmiştir.



Şekil 5.25. Çalıştırılan hidrojen/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin fotoğrafı.



Şekil 5.26. Çalıştırılan hidrojen/oksijen beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin fotoğrafı.

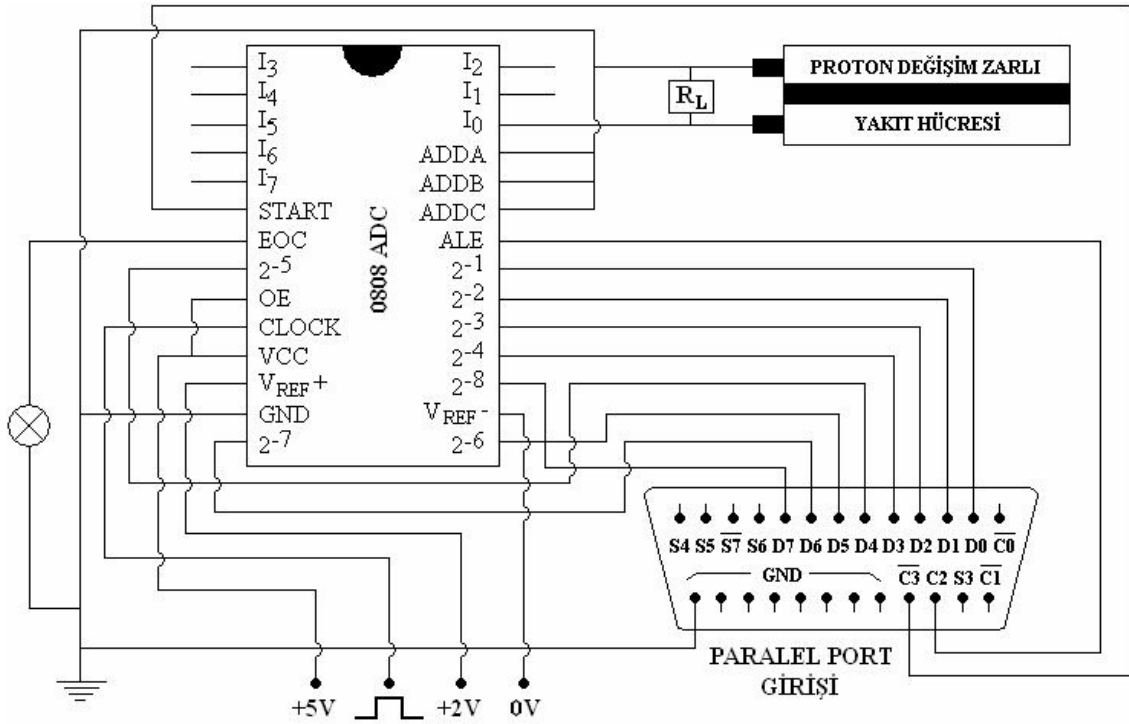
6. YAZILIM

6.1. Giriş

Proton değişim zarlı yakıt hücresi; yakıt olarak hidrojen gazını, oksitleyici olarak ise oksijen gazını kullanarak bunların kimyasal enerjilerini doğru akım elektrik enerjisine dönüştürebilen elektro-kimyasal bir düzendir. Proton değişim zarlı yakıt hücresinin çalıştırılması sonucunda terminallerinde oluşan akım ve voltaj sinyallerinin analog olması sebebiyle, bu sinyaller bir analog dijital dönüştürücü entegre olan 0808ADC yardımıyla dijitalle dönüştürölüp bilgisayarın paralel port girişine verilebilmektedir. Bunun neticesinde Turbo Pascal 7.0 ile hazırlanan bir bilgisayar program yazılımı yardımıyla bilgisayara gelen sinyallerin uygun dönüşümü ve işlemleri gerçekleştirilerek okunmakta ve proton değişim zarlı yakıt hücresinin değişik bazı ortam şartlarına göre voltaj-zaman grafiklerinin çizilmesi sağlanmaktadır.

6.2. Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücresinin Bilgisayar Bağlantısı

Sistemde DOS tabanında çalışabilen bir programlama dilinin ve yeterli donanım özelliklerine sahip bir bilgisayarın kullanılması yeterli olacaktır. Programlama dili olarak Turbo Pascal 7.0 versiyonu kullanılmıştır. Programın yazılmasında ve sistemin kurulmasında P166-MMX bilgisayar kullanılmıştır. Proton değişim zarlı yakıt hücresinin ürettiği sinyallerin analog olması nedeniyle bu sinyallerin dijitalle dönüştürülebilmesi için bir analog dijital dönüştürücü bilgisayara eklenmiştir. Analog sinyali dijital sinyale dönüştüren entegre olarak 0808ADC entegresi seçilmiştir. 0808ADC entegresinin bağlantı şeması Şekil 6.1’de verilmiştir. Dijitalle dönüştürülen sinyaller paralel port girişinden bilgisayara aktarılmaktadır. Böylece, alınan sinyaller, program adımlarıyla işlendikten sonra ekrana eş-zamanlı grafik çizim görüntüsünü saniyede bir olmak üzere noktalarla oluşturmaktadır. Yazılım programının akış şeması Şekil 6.2’de, ekran görüntüleri ise Şekil 6.3, Şekil 6.4, Şekil 6.5, Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de verilmiştir (Altınbaşak et al., 2000; Akgöbek, 2000; <http://www.electronic-circuits-diagrams.com/computersimages/computersckt2.shtml>).



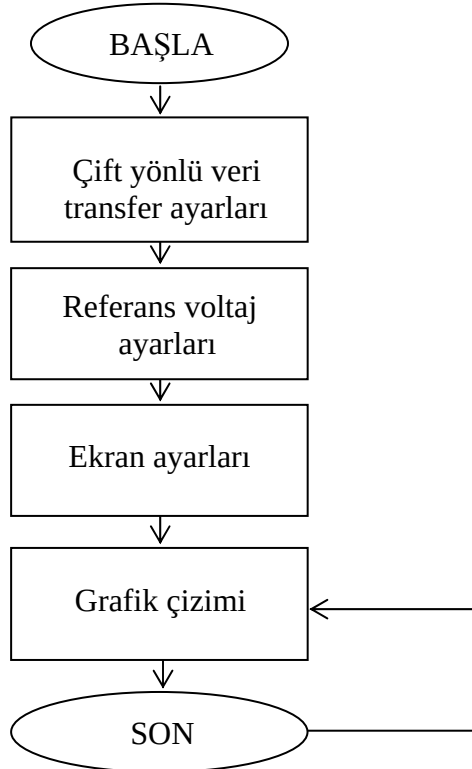
Şekil 6.1. 0808ADC entegresinin bağlantı şeması.

0808ADC entegresinin V_{cc} ile GND bacakları sırasıyla entegre besleme voltajı olan +5V'a ve toprağa bağlanarak entegrenin beslenmesi sağlanmaktadır. Proton değişim zarlı yakıt hücresinden gelen analog sinyalleri I0 bacağına verilmektedir. I0 bacağının aktif olabilmesi için ADDA, ADDB ve ADDC bacaklarının her üçüne de 0 sinyali verilmiştir. ADDA, ADDB ve ADDC bacaklarına verilen sinyal durumlarına göre aktif olacak bacaklar Çizelge 6.1'de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere sekiz ayrı giriş gerçekleştirilebilmektedir. Bu durum 0808ADC yapısında bulunan karıştırıcı ile sağlanmaktadır (<http://www2.ac-lyon.fr/enseigne/electronique/sujets/pilote99/an11.html>).

Çizelge 6.1. ADDA, ADDB ve ADDC bacaklarının kodları.

	I0	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
ADDA	0	1	0	1	0	1	0	1
ADDB	0	0	1	1	0	0	1	1
ADDC	0	0	0	0	1	1	1	1

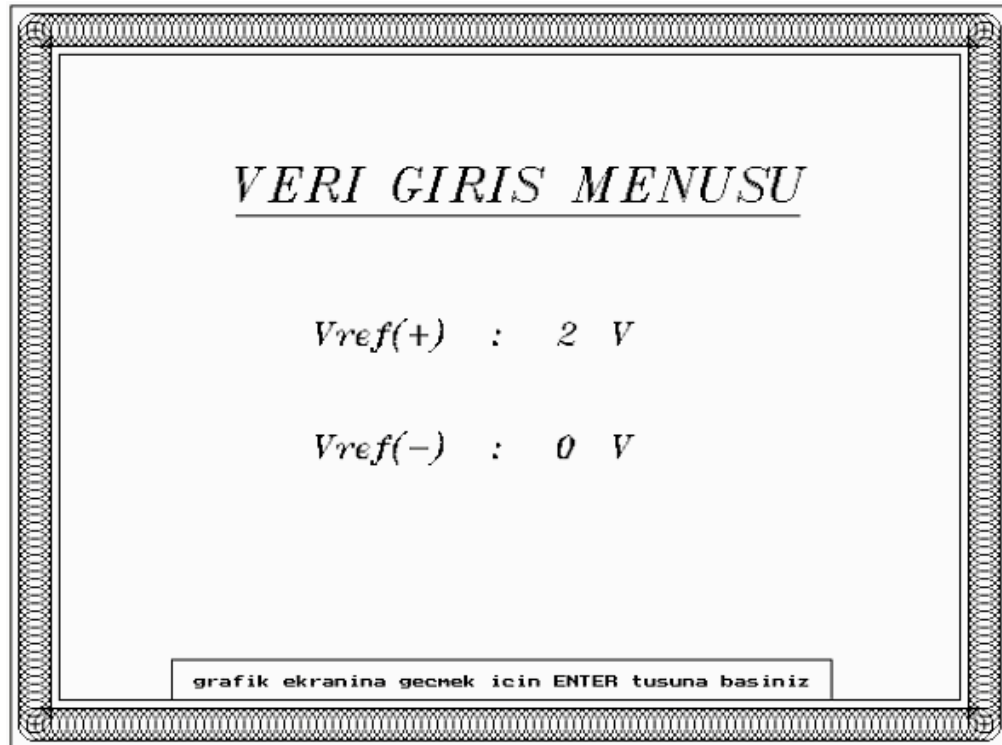
0808ADC entegresine verilecek analog sinyal 0-2V aralığında olacak şekilde ayarlandığından V_{ref+} ve V_{ref-} bacaklarına sırasıyla 2V ve 0V verilmiştir. Gelen analog sinyallerin entegre tarafından okunmakta ve dijital sinyale karşılık gelen sinyaller “data” portundaki sekiz bitlik çıkış bacaklarına gönderilmektedir. Bu sinyaller RS-232 paralel veri kablosuyla bilgisayarın paralel port girişine gönderilmiştir. Bilgisayarların ilk açılışında paralel port yalnızca çıkış için ayarlı olduğundan bu paralel portun aynı zamanda giriş portu olarak çalışması sağlanmalıdır. Bu durum yazılımın yapıldığı Turbo Pascal 7.0 programlama diliyle ayarlanmıştır. ALE ve START bacaklarının kontrolü paralel port çıkışının “control” portlarından yapılmıştır. 0808ADC entegresine CLOCK bacağından kare dalga saat sinyali gönderilmesiyle birlikte ALE bacağına gönderilen 1 sinyali ile çok girişli analog bacaklarının seçim işlemi gerçekleştirilirken, START bacağına gönderilen 1 sinyali ile de analog sinyalin entegre tarafından okunması başlatılmaktadır. OE bacağına gönderilen 1 sinyali dijital çıkışın aktif olmasını sağlarken her bir dönüşüm çevriminin tamamlanmasıyla EOC bacağı 0 sinyalinden 1 sinyaline, 1 sinyalinden 0 sinyaline dönmektedir. Bu durum EOC bacağına bağlanan bir LED ile gözlemlenebilmektedir (<http://www.electronic-circuits-diagrams.com/computersimages/computersckt2.shtml>).



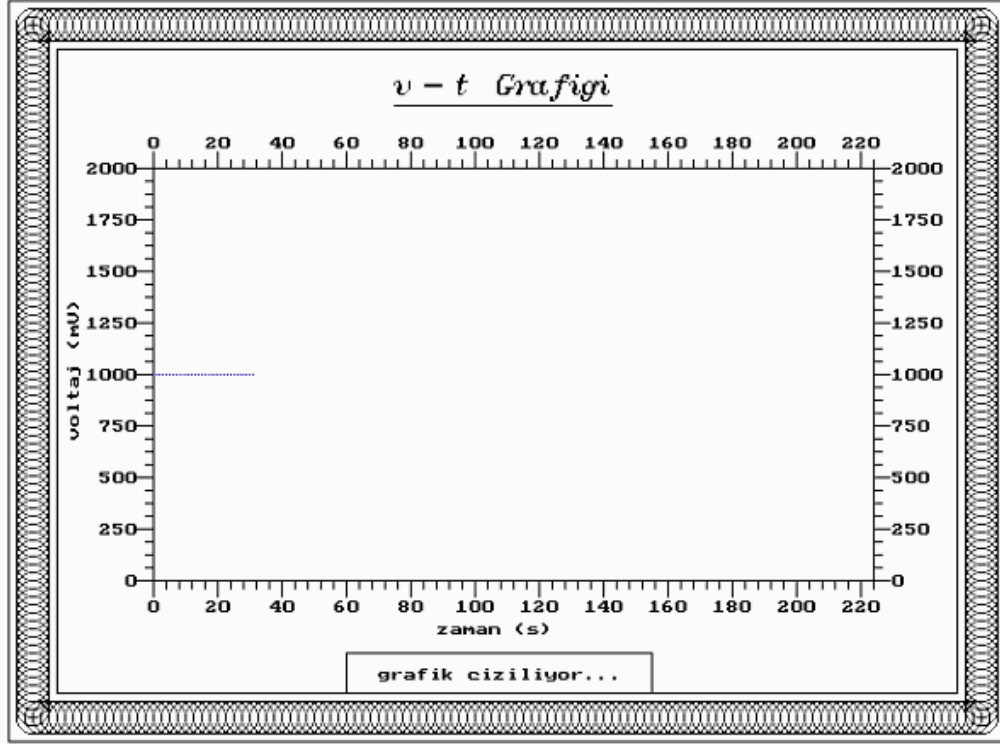
Şekil 6.2. Akış şeması.



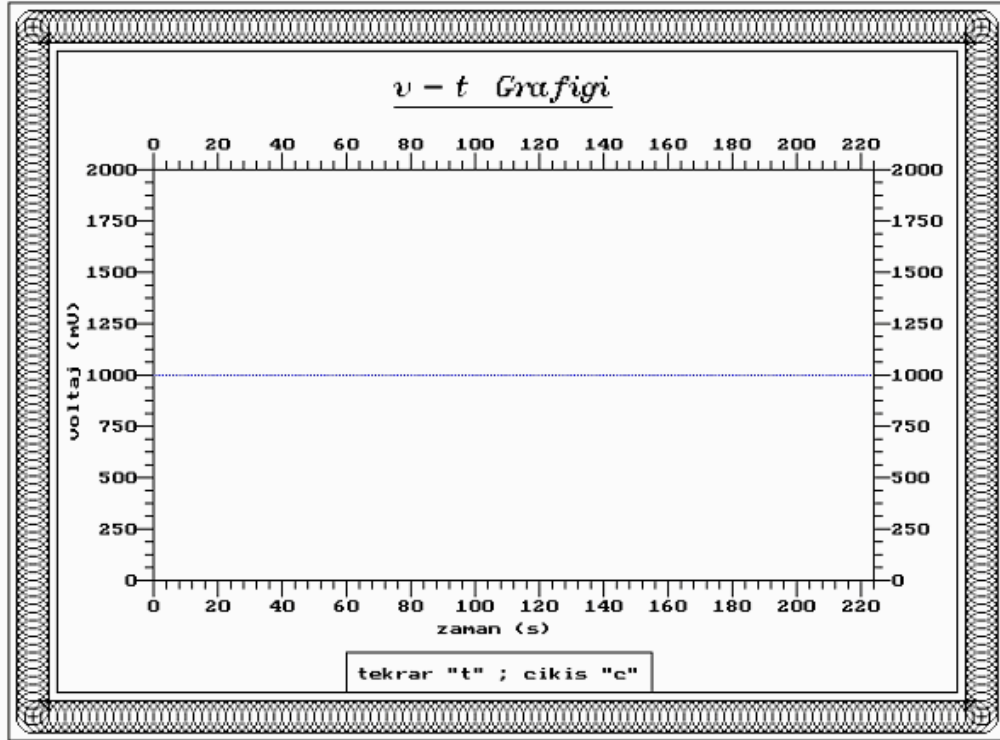
Şekil 6.3. Yazılımın ilk ekran görüntüsü.



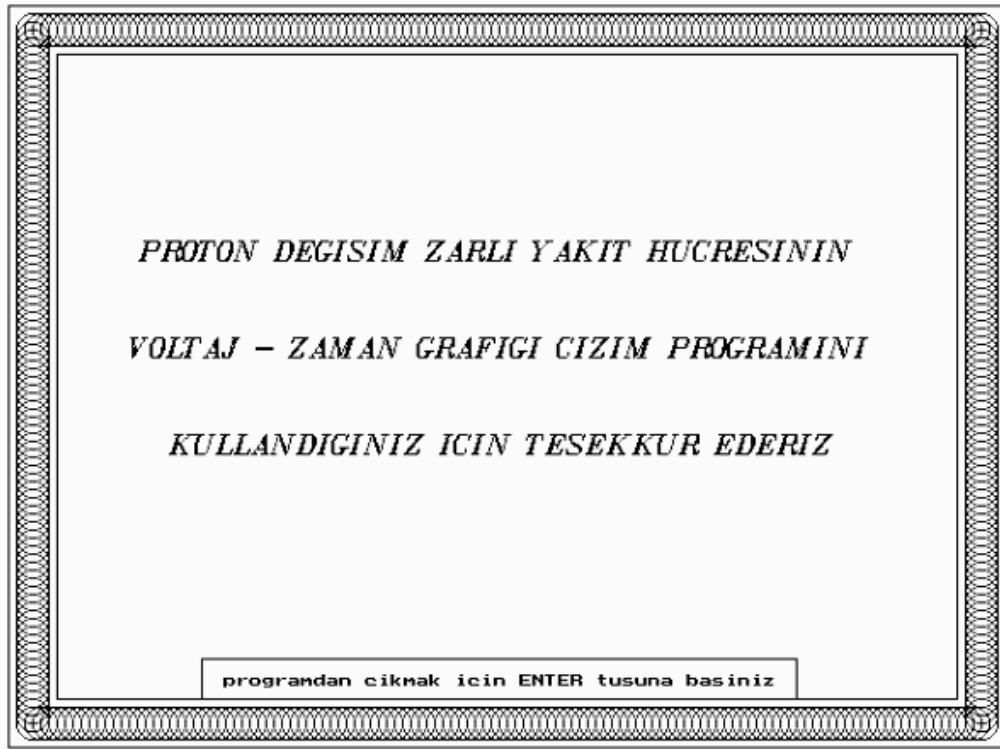
Şekil 6.4 Yazılımın veri giriş ekran görüntüsü.



Şekil 6.5. Yazılımın grafik çizimi sırasındaki ekran görüntüsü.



Şekil 6.6. Yazılımın grafik çiziminin tamamladığı ekran görüntüsü.



Şekil 6.7. Yazılımın programdan çıkış ekran görüntüsü.

6.3. Yazılım

(Turbo Pascal 7.0 programlama diliyle hazırlanmış program aşağıda verilmiştir)

```

program Proton_Degisim_Zarli_Yakit_Hucresinin_Voltaj_Zaman_Grafigi;

uses crt,graph;

var
    gs,gm,a,b,c,e,y,i,f,g,k,m,min,pos,sayac,sayac1,sayac2,sayac3:integer;
    tus,ch:char;
    s,t,o:string;

label
    tekrar,tekrar1,neu5,grafik_cizimi,vz,cikis;
label
    dongu,dongu1,dongu2,dongu3;
label
    geri,geri1,geri2,geri3,geri36,geri37,geri38,geri39;
label
    geri44,geri45,geri46,geri47,geri48,geri49,geri50,geri51;

```

```

begin
    detectgraph(gs,gm);
    initgraph(gs,gm,"");
    setbkcolor(0);
    setcolor(15);
    rectangle(10,10,630,470);
    rectangle(40,40,600,440);

    a:=25;

    geri:
        begin
            circle(a,25,10);
            a:=a+5;
            if a<616 then goto geri;
        end;

        b:=25;

    geri1:
        begin
            circle(b,455,10);
            b:=b+5;
            if b<616 then goto geri1;
        end;

        c:=25;

    geri2:
        begin
            circle(25,c,10);
            c:=c+5;
            if c<456 then goto geri2;
        end;

        e:=25;

    geri3:
        begin
            circle(615,e,10);
            e:=e+5;
            if e<456 then goto geri3;
        end;

    settextstyle(8,0,5);
    outtextxy(75,70,'OGU - FIZIK BOLUMU');

```

```

settextstyle(3,0,3);
outtextxy(97,180,'PROTON DEGISIM ZARLI YAKIT HUCRESININ');
outtextxy(90,230,'VOLTAJ - ZAMAN GRAFIGI CIZIM PROGRAMI');

```

```

settextstyle(7,0,1);
outtextxy(150,320,'HAZIRLAYAN : MURAT KELLEGOZ');

```

```

settextstyle(0,0,0);
outtextxy(250,360,'ESKISEHIR - 2004');

```

```

line(150,343,275,343);
line(150,440,150,415);
line(480,440,480,415);
line(150,415,480,415);

```

```

setcolor(15);
outtextxy(160,425,' devam etmek icin ENTER tusuna basiniz ');

```

```

ch:=readkey;
if ch=#13 then goto grafik_cizimi;

```

grafik_cizimi:

```

cleardevice;
setbkcolor(0);
setcolor(15);
rectangle(10,10,630,470);
rectangle(40,40,600,440);

```

```

a:=25;

```

geri44:

```

begin
    circle(a,25,10);
    a:=a+5;
    if a<616 then goto geri44;
end;

b:=25;

```

geri45:

```

begin
    circle(b,455,10);
    b:=b+5;
    if b<616 then goto geri45;
end;

```

```

        c:=25;

geri46:
    begin
        circle(25,c,10);
        c:=c+5;
        if c<456 then goto geri46;
    end;

    e:=25;

geri47:
    begin
        circle(615,e,10);
        e:=e+5;
        if e<456 then goto geri47;
    end;

settextstyle(7,0,4);
outtextxy(150,100,'VERI GIRIS MENUSU');
line(150,140,500,140);
settextstyle(7,0,2);

outtextxy(200,200,'Vref(+) :    V');
readln(pos);
str(pos:4,s);
outtextxy(320,200,s);

outtextxy(200,270,'Vref(-) :    V');
readln(min);
str(min:4,t);
outtextxy(320,270,t);

line(110,440,110,415);
line(520,440,520,415);
line(110,415,520,415);

settextstyle(0,0,0);
setcolor(15);
outtextxy(116,425,' grafik ekranina gecmek icin ENTER tusuna basiniz ');

ch:=readkey;
if ch=#13 then goto tekrar1;

tekrar1:
    cleardevice;
    setbkcolor(0);

```



```

setcolor(15);
rectangle(10,10,630,470);
rectangle(40,40,600,440);

a:=25;

geri48:
begin
    circle(a,25,10);
    a:=a+5;
    if a<616 then goto geri48;
end;

b:=25;

geri49:
begin
    circle(b,455,10);
    b:=b+5;
    if b<616 then goto geri49;
end;

c:=25;

geri50:
begin
    circle(25,c,10);
    c:=c+5;
    if c<456 then goto geri50;
end;

e:=25;

geri51:
begin
    circle(615,e,10);
    e:=e+5;
    if e<456 then goto geri51;
end;

settextstyle(7,0,1);
outtextxy(250,50,'v - t Grafigi');
line(250,75,385,75);
rectangle(100,370,548,114);
settextstyle(0,1,0);
outtextxy(55,195,'voltaj (mV)');
settextstyle(0,0,0);

```

```

outtextxy(277,397,'zaman (s)');
sayac:=0;

dongu:
begin
    line(100+sayac,370,100+sayac,375);
    line(100+sayac,114,100+sayac,109);
    sayac:=sayac+8;
    delay(50);
    if sayac<449 then goto dongu;
end;

sayac1:=0;

dongu1:
begin
    line(100,370-sayac1,95,370-sayac1);
    line(548,370-sayac1,553,370-sayac1);
    sayac1:=sayac1+8;
    delay(50);
    if sayac1<257 then goto dongu1;
end;

sayac2:=0;

dongu2:
begin
    line(100+sayac2,370,100+sayac2,380);
    line(100+sayac2,114,100+sayac2,104);
    sayac2:=sayac2+40;
    if sayac2<441 then goto dongu2;
end;

sayac3:=0;

dongu3:
begin
    line(100,370-sayac3,90,370-sayac3);
    line(548,370-sayac3,558,370-sayac3);
    sayac3:=sayac3+32;
    if sayac3<280 then goto dongu3;
end;

outtextxy(97,383,'0');outtextxy(97,95,'0');
outtextxy(133,383,'20');outtextxy(133,95,'20');
outtextxy(173,383,'40');outtextxy(173,95,'40');
outtextxy(213,383,'60');outtextxy(213,95,'60');

```

```

outtextxy(253,383,'80');outtextxy(253,95,'80');
outtextxy(289,383,'100');outtextxy(289,95,'100');
outtextxy(329,383,'120');outtextxy(329,95,'120');
outtextxy(369,383,'140');outtextxy(369,95,'140');
outtextxy(409,383,'160');outtextxy(409,95,'160');
outtextxy(449,383,'180');outtextxy(449,95,'180');
outtextxy(489,383,'200');outtextxy(489,95,'200');
outtextxy(529,383,'220');outtextxy(529,95,'220');

```

```

val(s,g,k);
val(t,f,k);

```

```

m:=0;str(m,o);outtextxy(83,367,o);outtextxy(560,367,o);
m:=(g-f)*125;str(m:3,o);outtextxy(67,335,o);outtextxy(560,335,o);
m:=(g-f)*250;str(m:3,o);outtextxy(67,303,o);outtextxy(560,303,o);
m:=(g-f)*375;str(m:3,o);outtextxy(67,271,o);outtextxy(560,271,o);
m:=(g-f)*500;str(m:4,o);outtextxy(59,239,o);outtextxy(560,239,o);
m:=((g-f)*625);str(m:4,o);outtextxy(59,207,o);outtextxy(560,207,o);
m:=((g-f)*750);str(m:4,o);outtextxy(59,175,o);outtextxy(560,175,o);
m:=((g-f)*875);str(m:4,o);outtextxy(59,143,o);outtextxy(560,143,o);
m:=((g-f)*1000);str(m:4,o);outtextxy(59,111,o);outtextxy(560,111,o);

```

```

line(220,440,220,415);
line(410,440,410,415);
line(220,415,410,415);

```

```

settextstyle(0,0,0);
setcolor(15);
outtextxy(240,425,'grafik çiziliyor...');

```

```

y:=0;

```

```

tekrar:

```

```

    begin

```

```

        port[$37a]:=$fb;delay(5);
        port[$37a]:=$ff;delay(5);
        port[$37a]:=$f7;delay(5);
        port[$37a]:=$f3;delay(5);
        port[$37a]:=$fb;delay(5);
        i:=port[$378];
        putpixel(100+y,370-i,14);
        delay(6783);
        y:=y+2;
        if y<448 then goto tekrar;

```

```

    end;

```

```

        setcolor(15);
        setfillstyle(1,0);
        bar(100,415,529,439);

        line(220,440,220,415);
        line(410,440,410,415);
        line(220,415,410,415);

        setcolor(15);
        outtextxy(227,425,'tekrar "t" ; cikis "c"');

        repeat
            tus:=readkey;
        until tus in ['t','c'];

        case tus of
            't':goto tekrar1;
            'c':goto cikis;
        end;
        readln;

cikis:
    cleardevice;
    setbkcolor(0);
    setcolor(15);
    rectangle(10,10,630,470);
    rectangle(40,40,600,440);

    a:=25;

    geri36:
        begin
            circle(a,25,10);
            a:=a+5;
            if a<616 then goto geri36;
        end;

        b:=25;

    geri37:
        begin
            circle(b,455,10);
            b:=b+5;
            if b<616 then goto geri37;
        end;

        c:=25;

```

```

geri38:
    begin
        circle(25,c,10);
        c:=c+5;
        if c<456 then goto geri38;
    end;

    e:=25;

geri39:
    begin
        circle(615,e,10);
        e:=e+5;
        if e<456 then goto geri39;
    end;

settextstyle(7,0,1);
outtextxy(91,150,'PROTON DEGISIM ZARLI YAKIT HUCRESININ');
outtextxy(86,210,'VOLTAJ - ZAMAN GRAFIGI CIZIM PROGRAMINI');
outtextxy(110,270,'KULLANDIGINIZ ICIN TESEKKUR EDERIZ');
line(130,440,130,415);
line(500,440,500,415);
line(130,415,500,415);

settextstyle(0,0,0);
setcolor(15);
outtextxy(136,425,'(programdan cikmak icin ENTER tusuna basiniz)');

ch:=readkey;
if ch=#13 then goto neu5;

neu5:
    closegraph;

end.

```

7. ÖLÇÜM SONUÇLARI İLE VERİM VE MALİYET HESABI

7.1. Giriş

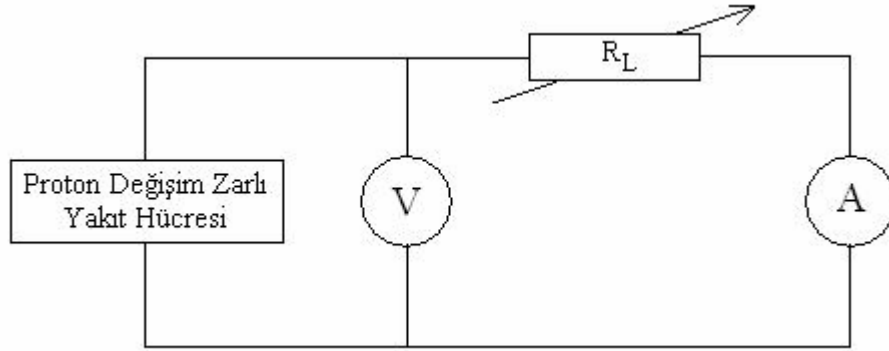
Proton değişim zarlı yakıt hücresi hidrojen gazı ve oksijen gazı olarak depolanmış kimyasal enerjiyi doğru akım elektrik enerjisine dönüştüren bir düzendir. Hidrojen gazı ve oksijen gazı su oluşturacak şekilde tepkimeye sokulmaktadır. Bunun neticesinde elektrik ve ısı elde edilebilmektedir.

Proton değişim zarlı yakıt hücresinden çekilecek güç devredeki R_L yük direncine bağlıdır. Ölçümdeki amaç azami güç eldesini verecek direncin ve bu dirence bağlı akımın belirlenmesidir. Alınan ölçümler “Microcal Origin 6.0” grafik çizim programıyla değerlendirilirken bunun yanında “Turbo Pascal 7.0” programlama dili ile yazılan ve saniyede bir ölçüm (yazılıma küçük bir müdahaleyle süresi değiştirilebilir) alabilen yazılımla, proton değişim zarlı yakıt hücresinden elde edilen voltajın zamana göre proton değişim zarlı yakıt hücresinin açılışı, hidrojen gazı beslemesi, oksitleyici olarak hava kullanan proton değişim zarlı yakıt hücresi çeşidinin fanının devreye sokulması ve kapanışı karşısında gösterdiği davranışların grafikleri elde edilmiştir.

Proton değişim zarlı yakıt hücresinin ölçüm değerleri kullanılarak proton değişim zarlı yakıt hücresinin verim hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Buna ilaveten proton değişim zarlı yakıt hücresinin ürettiği güç başına maliyetine de yer verilmiştir.

7.2. Ölçüm Alımı ve Ölçüm Sonuçları

Ölçüm devresinin kurulması için üretilen proton değişim zarlı yakıt hücresi Şekil 7.1’de gösterildiği gibi ampermetre, voltmetre ve değişken bir yük direnci ile birlikte bağlanmıştır. Yük direnci olarak 0-100 Ω aralıklı değişken direnç kullanılmıştır.



Şekil 7.1. Proton değişim zarlı yakıt hücresinin ölçüm devre düzeneği.

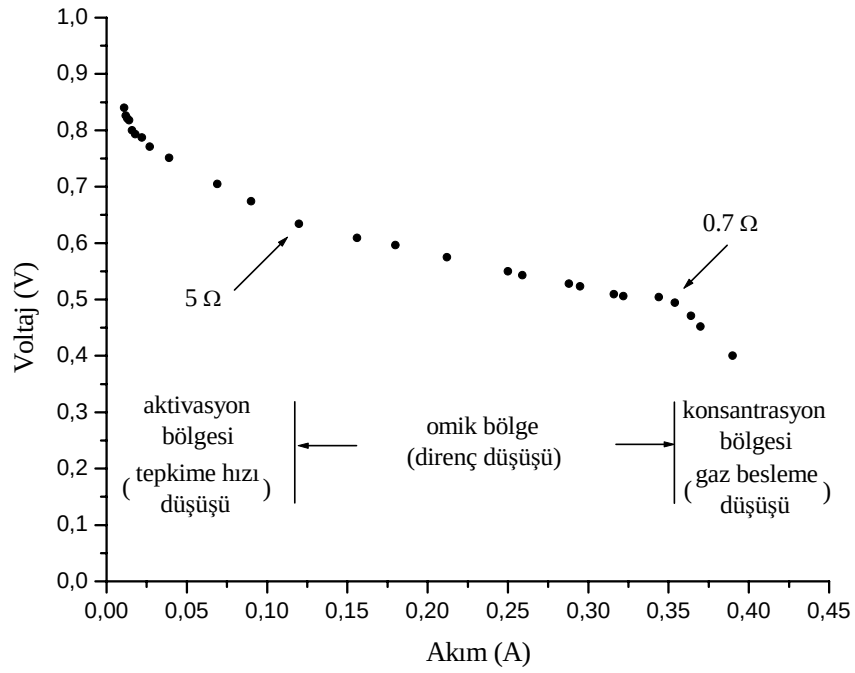
Ölçüm alımları R_L yük direncinin en yüksek direnç seviyesi olan 100Ω 'a ayarlanarak başlanmıştır. R_L direnci Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2'de verildiği gibi azaltılarak voltaj ve akım ölçümleri alınmıştır. Bu değerler kullanılarak Eşitlik (7.1)'de verilen güç denklemi kullanılarak hesaplama yoluyla o anki R_L yük direncine göre farklı tipteki proton değişim zarlı yakıt hücresinin gücü elde edilmiştir. Çizelge 7.1'deki veriler kullanılarak hidrojen/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin Şekil 7.2'deki voltaj-akım ve Şekil 7.3'teki güç-akım grafikleri çizilirken, Çizelge 7.2'deki veriler kullanılarak ta hidrojen/oksijen beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin Şekil 7.4'deki voltaj-akım ve Şekil 7.5'teki güç-akım grafikleri çizilmiştir.

$$P = VI \quad (7.1)$$

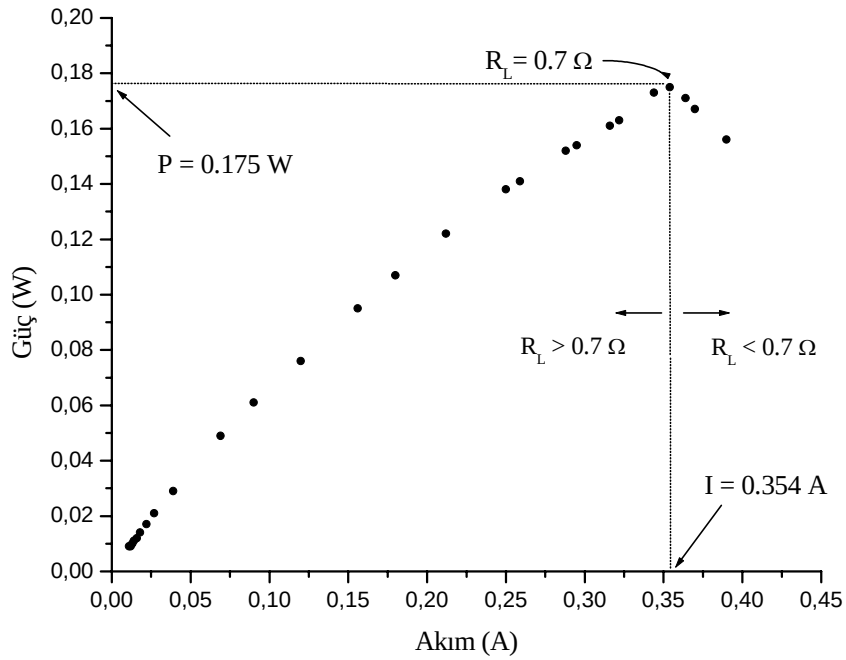
Ölçüm alımlarında R_L yük direnci bu defada sabit tutularak voltajda meydana getirilen değişimin akıma nasıl yansıdığının verileri Çizelge 7.3'de verilmiştir. Bu veriler kullanılarak Şekil 7.6, Şekil 7.7 ve Şekil 7.8'teki voltaj-akım grafikleri çizilmiştir.

Çizelge 7.1. Hidrojen/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin farklı yük dirençlerindeki voltaj, akım ve güç değerleri.

R_L (Ω)	Voltaj (V)	Akım (A)	Güç (W)
∞	0.907	0	0
100	0.84	0.011	0.009
90	0.826	0.012	0.0095
80	0.821	0.013	0.0103
70	0.818	0.014	0.0115
60	0.8	0.016	0.0124
50	0.793	0.018	0.0144
40	0.787	0.022	0.017
30	0.771	0.027	0.021
20	0.751	0.039	0.029
10	0.705	0.069	0.0489
7.0	0.674	0.09	0.0608
5.0	0.634	0.12	0.0761
3.3	0.609	0.156	0.095
2.7	0.607	0.18	0.1093
2.1	0.582	0.212	0.1234
2.0	0.55	0.25	0.1375
1.5	0.539	0.259	0.1396
1.2	0.528	0.288	0.1521
1.1	0.523	0.295	0.1543
1.0	0.509	0.316	0.1608
0.9	0.506	0.322	0.1629
0.8	0.504	0.344	0.1734
0.7	0.494	0.354	0.1749
0.6	0.471	0.364	0.1714
0.5	0.452	0.37	0.1672
0.3	0.4	0.39	0.156



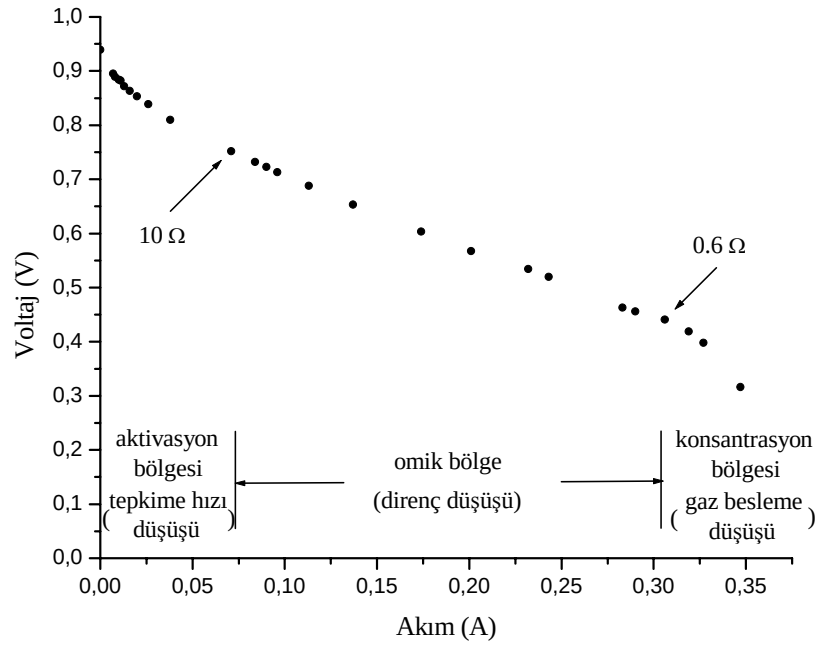
Şekil 7.2. Hidrojen/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin voltaj-akım grafiği.



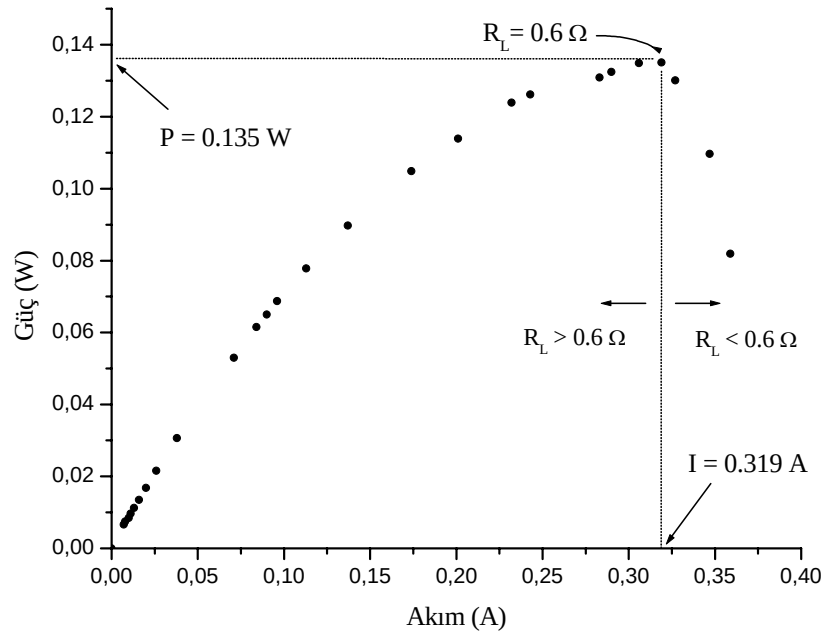
Şekil 7.3. Hidrojen/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin güç-akım grafiği.

Çizelge 7.2. Hidrojen/oksijen beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin farklı yük dirençlerindeki voltaj, akım ve güç değerleri.

R_L (Ω)	Voltaj (V)	Akım (A)	Güç (W)
∞	0.939	0	0
100	0.895	0.007	0.0066
90	0.889	0.008	0.0075
80	0.884	0.010	0.0084
70	0.882	0.011	0.0097
60	0.872	0.013	0.0112
50	0.863	0.016	0.0135
40	0.853	0.020	0.0168
30	0.839	0.026	0.0216
20	0.810	0.038	0.0306
10	0.752	0.071	0.0530
7.9	0.732	0.084	0.0615
7.2	0.723	0.090	0.0650
6.6	0.713	0.096	0.0687
5.3	0.688	0.113	0.0788
4.0	0.653	0.137	0.0897
2.8	0.603	0.174	0.1048
2.1	0.567	0.201	0.1139
1.5	0.534	0.232	0.1239
1.3	0.520	0.243	0.1262
1.0	0.463	0.283	0.1309
0.8	0.456	0.290	0.1324
0.7	0.441	0.306	0.1349
0.6	0.424	0.319	0.1350
0.5	0.398	0.327	0.1301
0.4	0.316	0.347	0.1096
0.2	0.228	0.359	0.0819



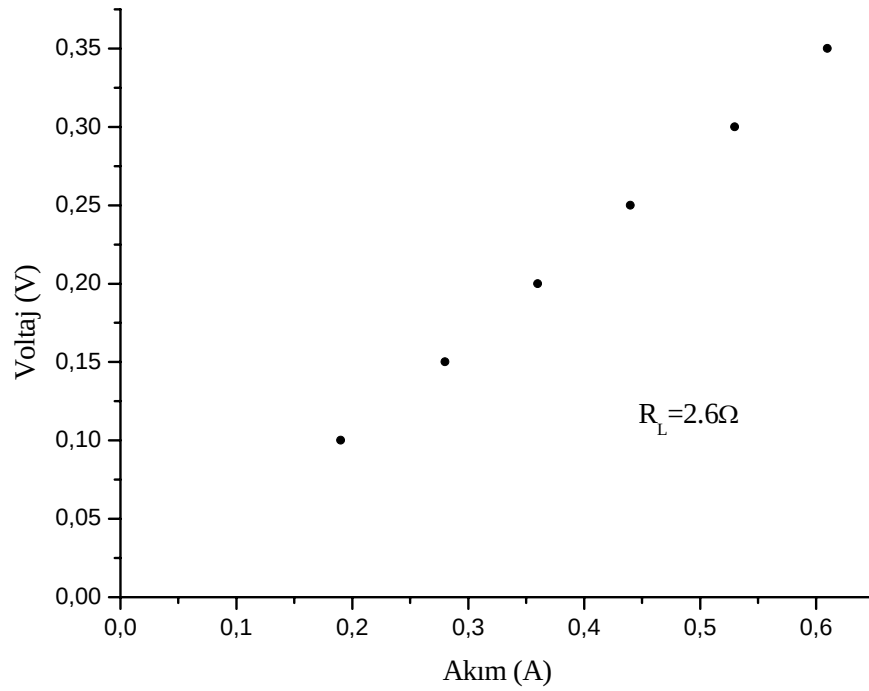
Şekil 7.4. Hidrojen/oksijen beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin voltaj-akım grafiği.



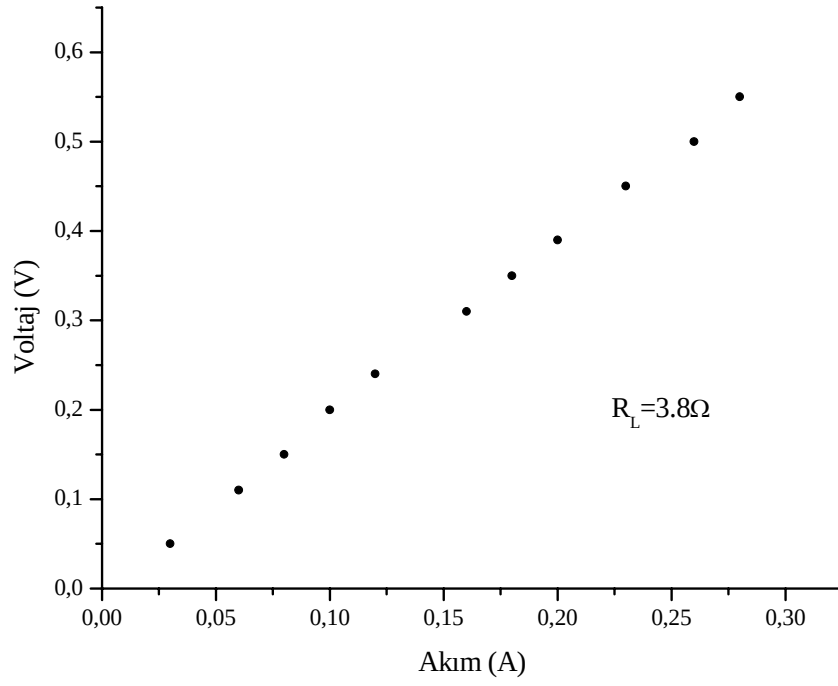
Şekil 7.5. Hidrojen/oksijen beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin güç-akım grafiği.

Çizelge 7.3. Sabit yük dirençlerindeki voltaj ve akım değerleri.

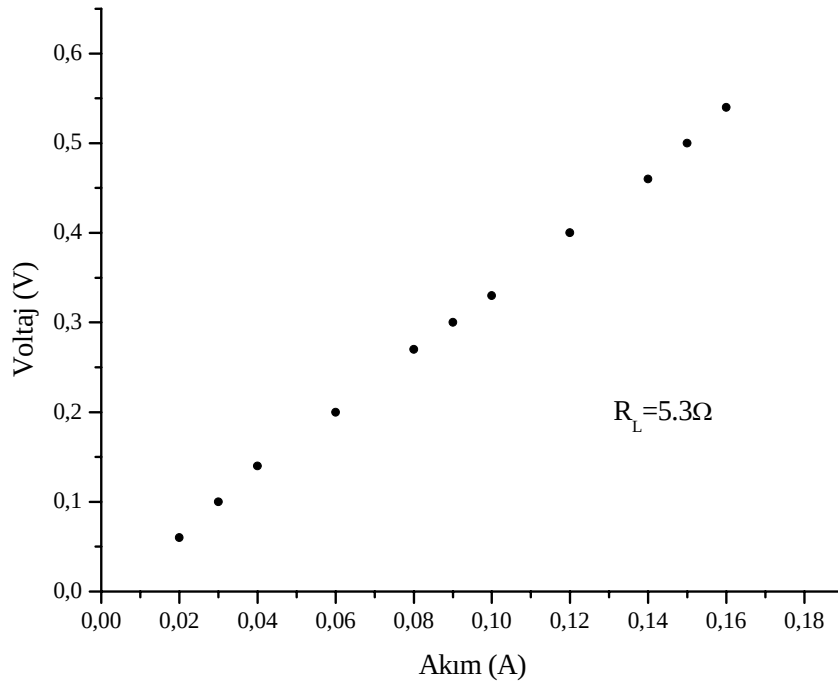
R_L 2.6Ω	Voltaj (V)	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.3	-	-	-	-	-
	Akım (A)	0.19	0.28	0.36	0.44	0.53	0.61	-	-	-	-	-
R_L 3.8Ω	Voltaj (V)	0.05	0.11	0.15	0.2	0.24	0.31	0.35	0.39	0.45	0.5	0.55
	Akım (A)	0.03	0.06	0.08	0.1	0.12	0.16	0.18	0.2	0.23	0.26	0.28
R_L 5.3Ω	Voltaj (V)	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08	0.09	0.1	0.12	0.14	0.15	0.16
	Akım (A)	0.06	0.1	0.14	0.2	0.27	0.3	0.33	0.4	0.46	0.5	0.54



Şekil 7.6. R_L=2.6Ω durumunda proton değişim zarlı yakıt hücresinin voltaj-akım grafiği.



Şekil 7.7. $R_L = 3.8 \Omega$ durumunda proton değişim zarlı yakıt hücresinin voltaj-akım grafiği.



Şekil 7.8. $R_L = 5.3 \Omega$ durumunda proton değişim zarlı yakıt hücresinin voltaj-akım grafiği.

Proton değişim zarlı yakıt hücresinden elde edilebilecek azami çıkış gücünün akım değeri açıkça Şekil 7.3 ve Şekil 7.5'teki güç-akım grafiklerindeki güç eğrisinden görölmektedir. Azami güç hidrojen/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinde 0.7 Ω 'luk yük direncinde elde edilen 0.354 A akım değerine sahip 0.175 W olarak bulunmuştur. Hidrojen/oksijen beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinde ise 0.6 Ω 'luk yük direncinde elde edilen 0.319 A akım değerine sahip 0.135 W olarak bulunmuştur.

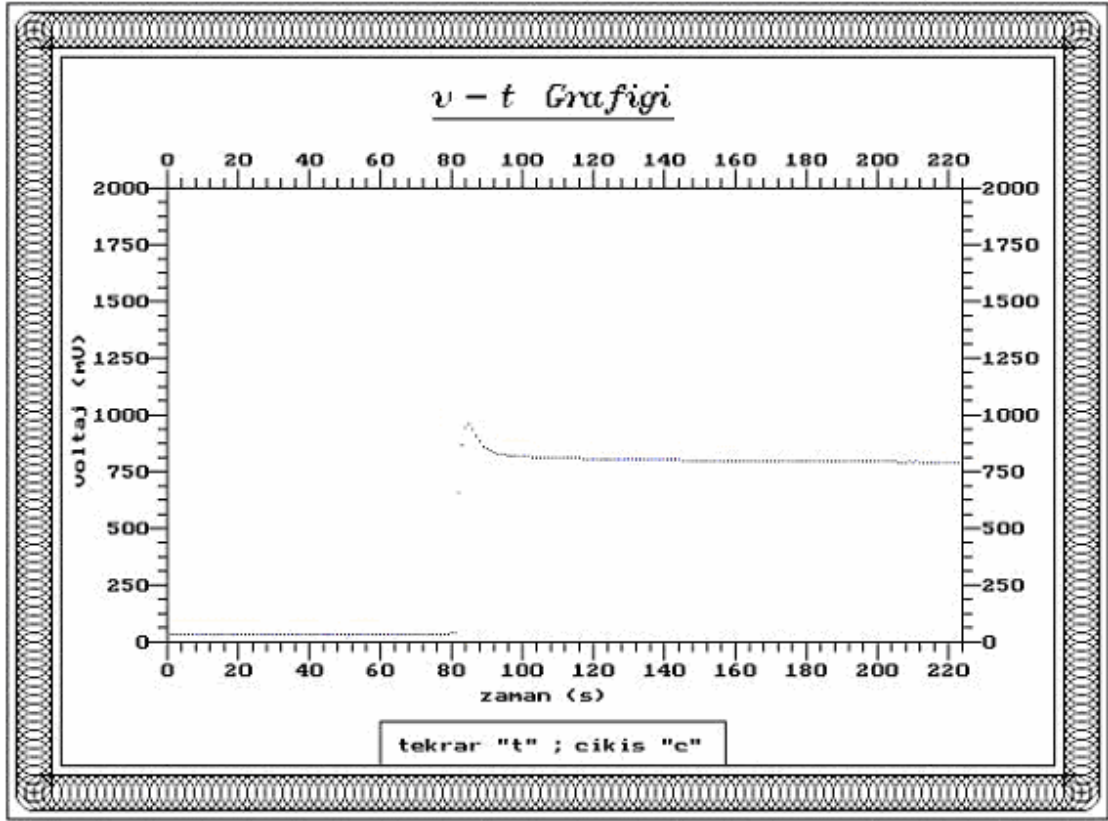
Aktivasyon bölgesi kaybının oluşumu; elektro-kimyasal tepkime ile ilgilidir. Yük direncinin yüksek olması nedeniyle bölgede oluşan tepkime hızında düşüş meydana gelmekte ve dolayısıyla akımda azalma oluşmaktadır. Ancak bölgede elektrotlar arası potansiyel farkının artmasıyla voltajda artış gözlenmektedir.

Ohmik bölge kaybının oluşumu; elektrolit içerisindeki hidrojen atomu iyonları akışına ve elektrotlar üzerindeki elektronların akışına karşı gösterilen direnç ile ilgilidir. Bu bölge ohm yasasına uygun davrandığından ohmik bölge adını almıştır. Yük direnci azaldıkça ohm yasasına uygun olarak akım değeri artarken voltaj değerleri de azalmaktadır.

Konsantrasyon bölgesi kaybının oluşumu, tepkimeye giren gazların elektro-kimyasal tepkimelerinin çevresinde meydana getirdiğı konsantrasyon değişiminin bir sonucudur. Bu konsantrasyon değişimine; elektro-kimyasal tepkime sonrasında su oluşumunun hızlı bir şekilde bölgeden tahliyesinin sağlanamaması, bunun sonucunda tepkime gazların elektrot içerisindeki difüzyonunun hızının düşmesi ve tepkime gazlarının ayrışmasının/birleşmesinin yavaşlaması neden olmaktadır. Konsantrasyon azalması sonucunda elektrot potansiyelinde hızlı bir azalma gözlenmektedir.

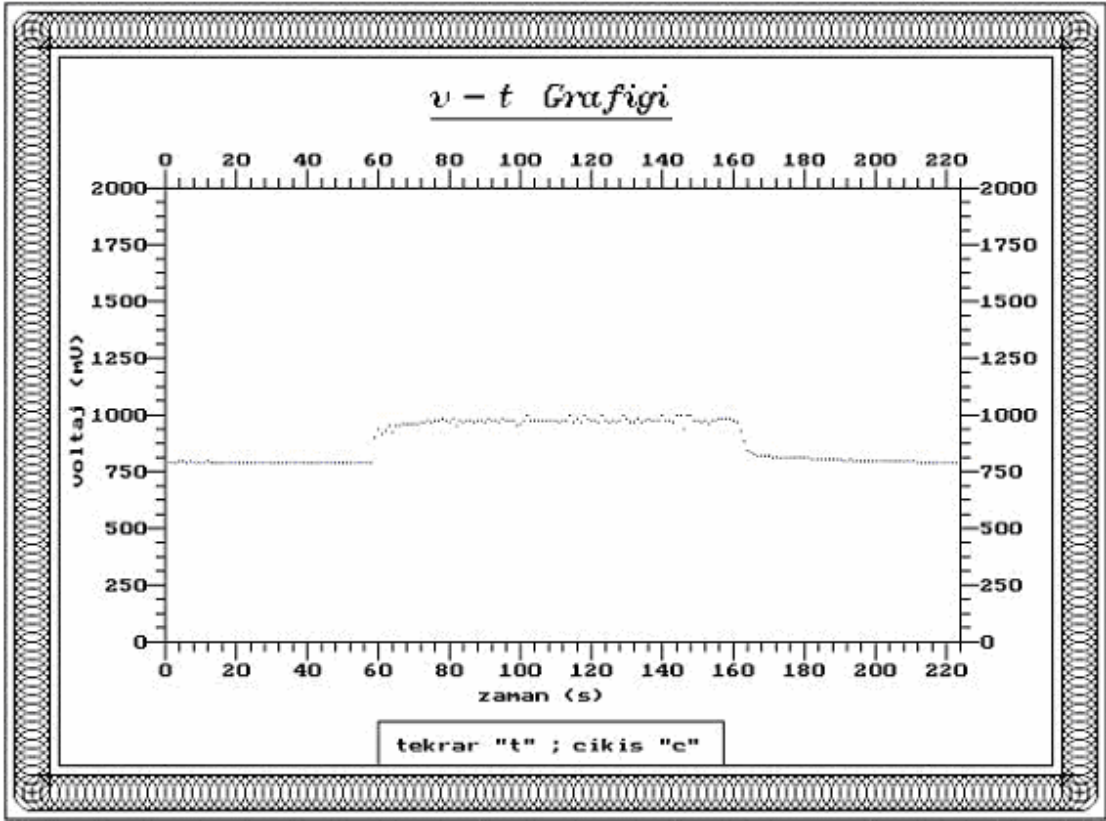
Şekil 7.6, Şekil 7.7 ve Şekil 7.8’te verilen sabit R_L yük direnç değerindeki voltaj-akım grafiklerinin ohm yasasına uyduğu ve ohmik davranış sergilediği gözlenmektedir.

Turbo Pascal 7.0 programlama dilinde yazılmış olan programla hidrojen/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin farklı çalışma şartları karşısında voltajın zamana göre değişim grafiklerinin çizimleri elde edilmiştir. Şekil 7.9’da proton değişim zarlı yakıt hücresine hidrojen gazı yakıtının verilmesiyle voltajın zamana göre değişim grafiğinin ekran görüntüsü verilmiştir. Görüleceği üzere bilgisayar programı çalıştırıldıktan 80 s sonra proton değişim zarlı yakıt hücresi hidrojen gazı ile beslenmiştir. Hidrojen gazının anot-zar ara yüzeyi ile temasa geçmesiyle, gerek anot-zar ara yüzeyindeki gerekse katot-zar ara yüzeyindeki tepkimeler hızlı bir şekilde başlamıştır. Bunun sonucunda voltajda hızlı bir artış olup 6 s gibi kısa bir sürede pik değerine ulaşmıştır. Arkasından yine 6 s gibi bir sürede voltajda küçük bir düşüşle sabit bir voltaj değerine ulaşmıştır. Proton değişim zarlı yakıt hücresinin pik voltaj seviyesi 970 mV, sabit voltaj seviyesi 790 mV civarında elde edilmiştir. İlk çalıştırılmaya başlamasındaki pik voltaj seviyesinden aşağı bir voltaj seviyesine düşmesindeki neden katottaki gaz akış kanallarındaki oksijen konsantrasyonunun ilk başta, ilerleyen zamana göre, daha yüksek oluşudur. Oluşan tepkimeyle birlikte ilerleyen zamanda havanın oksijen konsantrasyonunda azalma olsada, katot tarafında dış ortama açık olan gaz akış kanallarından havanın difüzyon etmesiyle yeterli gelen havanın oksijen konsantrasyonu belli bir seviyenin altına düşmemektedir. Böylece proton değişim zarlı yakıt hücresinden okunan voltaj değeri sabit kalmaktadır.



Şekil 7.9. Hidrojen gazı verilmesiyle elde edilen voltaj-zaman grafiği.

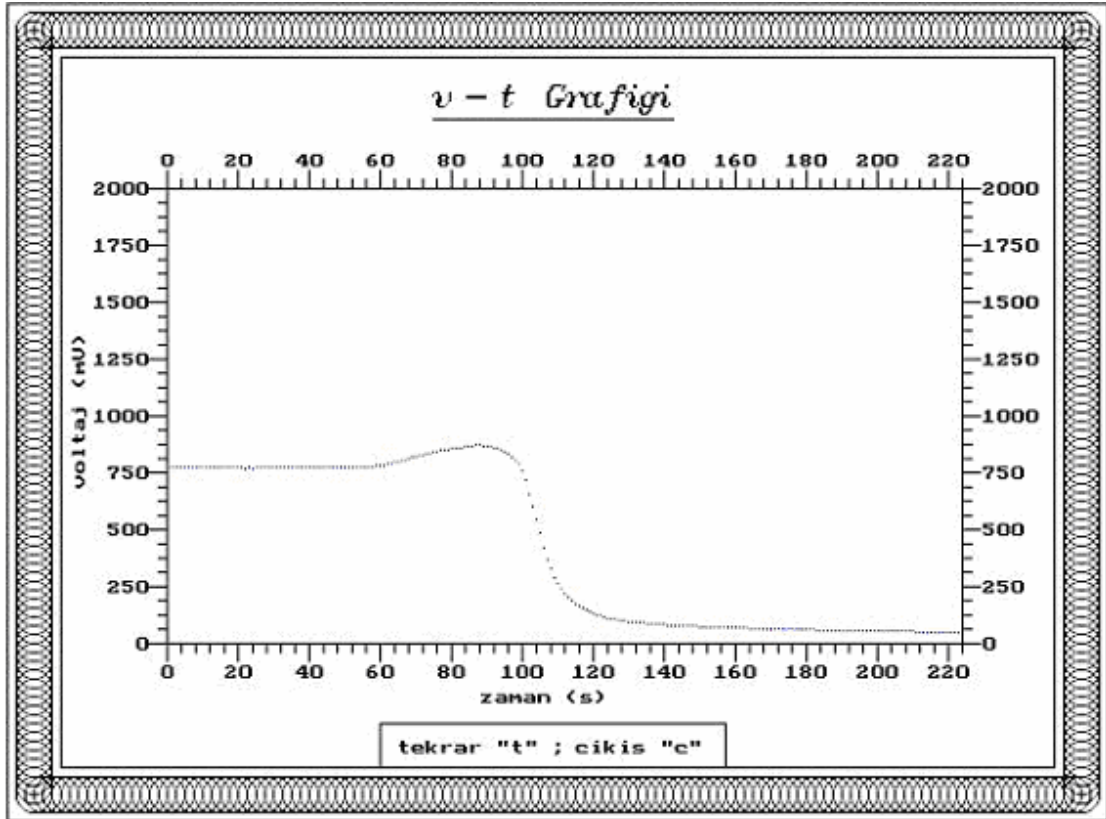
Oksitleyici olarak havanın kullanıldığı proton değişim zarlı yakıt hücresine dış ortama açık olan katot tarafındaki gaz akış kanallarının bir fan ile hava üflenebilmektedir. Anodun Hidrojen gazı ile beslenmesinin yanı sıra katoda bağlı fanın çalıştırılmasıyla elde edilen voltaj-zaman grafiğinin ekran görüntüsü Şekil 7.10’da verilmiştir. Görüleceği gibi 790 mV civarındaki sabit voltaj değeri okunurken 60.saniyede fanın çalıştırılmasıyla voltaj seviyesi 940-1000 mV aralığında değişim göstermektedir. Böylece fanın çalıştırılmasıyla birlikte proton değişim zarlı yakıt hücresinin voltaj seviyesinde %19-26 aralığında değişen artış meydana gelmiştir. Katot tarafındaki havanın oksijen konsantrasyonunun azalmasına bağlı olup çalıştırılan fanla birlikte katottaki konsantrasyon artmaktadır.



Şekil 7.10. Fanın çalıştırılmasıyla birlikte elde edilen voltaj-zaman grafiği.

Proton değişim zarlı yakıt hücresine hidrojen gazı yakıtının girişi kesildiğinde, voltajın zamana göre değişim grafiğinin ekran görüntüsü Şekil 7.11’de verilmiştir. Görüleceği üzere sabit voltaj seviyesine sahipken 60. saniyede hidrojen gazı girişi kesilmektedir. Hidrojen gazı yakıtının kesilmesiyle birlikte 30 s süreyle voltaj seviyesinde bir artış gözlenirken 90. saniyeden sonra 120. saniyeye kadar hızlı bir düşüş gözlenmektedir. Voltaj seviyesindeki ilk artış anottaki tepkime miktarının azalmasıyla birlikte katottaki oksijen kullanımı azalmaktadır ve bunun sonucunda oksijenin dış ortamdan difüzyon miktarı, tüketilen oksijenin gazı miktarının yerini daha hızlı doldurur hale geleceğinden oksijen gazı miktarı artacaktır. Ancak kısa bir süre sonra artan oksijen konsantrasyonu hidrojen gazı olmadığından bir anlam ifade etmeyecek olup anotta azalan tepkime miktarıyla orantılı olarak katottaki tepkime miktarı da azalacaktır. Voltajın tam olarak sıfır seviyesine inmemesinin nedeni hidrojen kapalı bir ortamda proton değişim zarlı yakıt hücresine verilmesinden halen ortamda azda olsa hidrojen

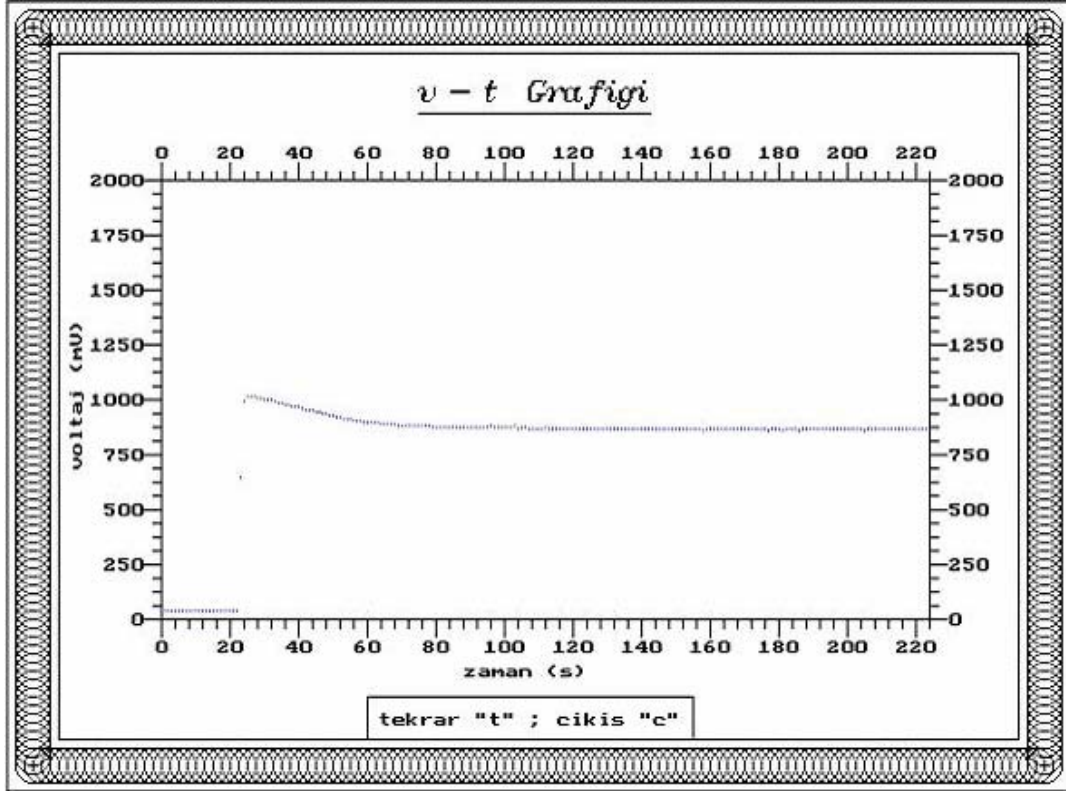
gazının varlığından kaynaklanmaktadır. Voltajın sıfır seviyesine inmesi saatler sürebilmektedir.



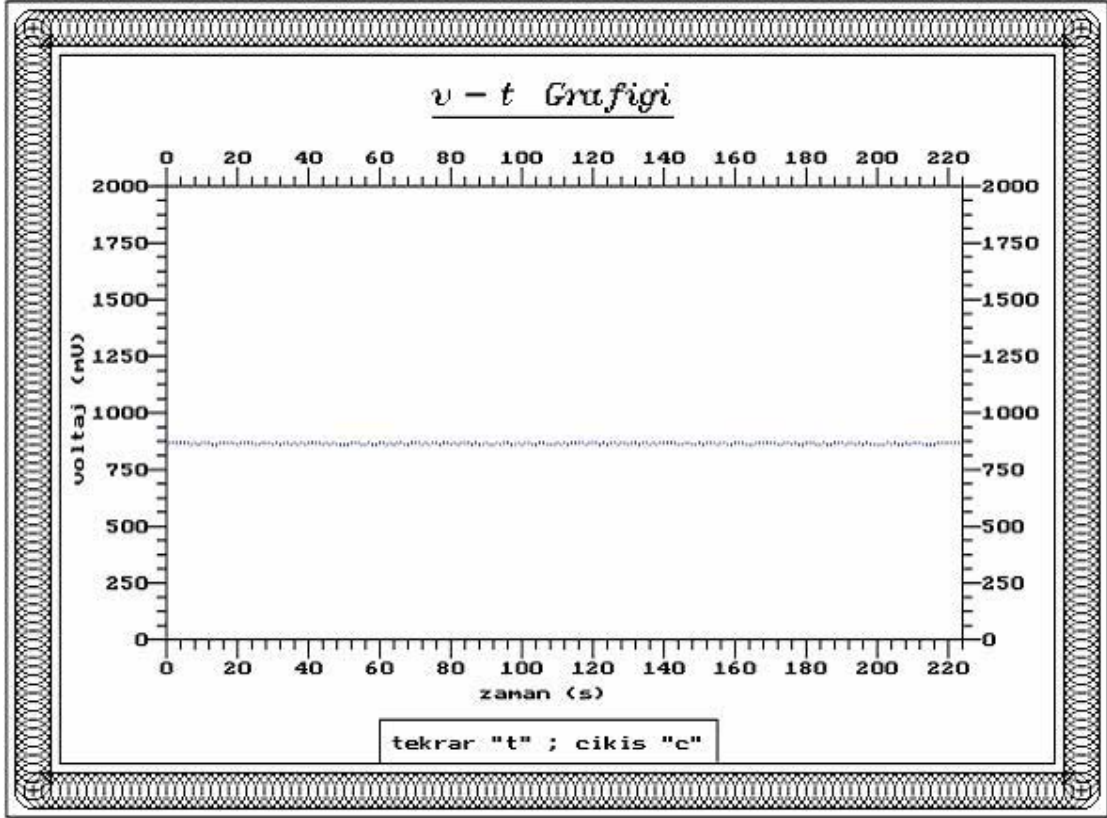
Şekil 7.11. Hidrojen gazının kesilmesiyle elde edilen voltaj-zaman grafiği.

Hidrojen/oksijen beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin farklı çalışma şartları karşısında voltajın zamana göre değişim grafiklerinin çizimlerinde ise aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 7.12’de proton değişim zarlı yakıt hücresine hidrojen gazı yakıtının ve oksitleyici olarak oksijenin verilmesiyle voltajın zamana göre değişim grafiğinin ekran görüntüsü verilmiştir. Bilgisayar programı çalıştırıldıktan 20 s sonra proton değişim zarlı yakıt hücresi hidrojen gazı ile beslenmiştir. Hidrojen gazının anot-zar ara yüzeyi ile temasa geçmesiyle, gerek anot-zar ara yüzeyindeki gerekse katot-zar ara

yüzeyindeki tepkimeler hızlı bir şekilde başlamıştır. Bunun sonucunda voltajda hızlı bir artış olup 5-6 s gibi kısa bir sürede pik değerine ulaşmıştır. Arkasından yine 20-25 s gibi bir sürede voltajda küçük bir düşüşle sabit bir voltaj değerine ulaşmıştır. Proton değişim zarlı yakıt hücresinin pik voltaj seviyesi 1010 mV, sabit voltaj seviyesi 875 mV civarında elde edilmiştir. Bu voltaj değerleri 0.6Ω 'luk bir yük direnci altında alınmıştır. İlk çalıştırılmaya başlamasındaki pik voltaj seviyesinden aşağı bir voltaj seviyesine düşmesindeki neden katottaki gaz akış kanallarındaki oksijen konsantrasyonunun ilk başta, ilerleyen zamana göre, daha yüksek oluşudur. Oluşan tepkimeyle birlikte ilerleyen zamanda oksijen konsantrasyonunda azalma olsada, yeterli miktardaki oksijen konsantrasyonu belli bir seviyenin altına düşmemektedir. Hidrojen gazı ile 1 saat süreyle beslenmesi sonrasında alınan voltaj ölçümü, voltaj seviyesinin sabitlenmesindeki voltaj değeriyle aynı kararlılığı gösterdiği Şekil 7.13'te verilmiştir.

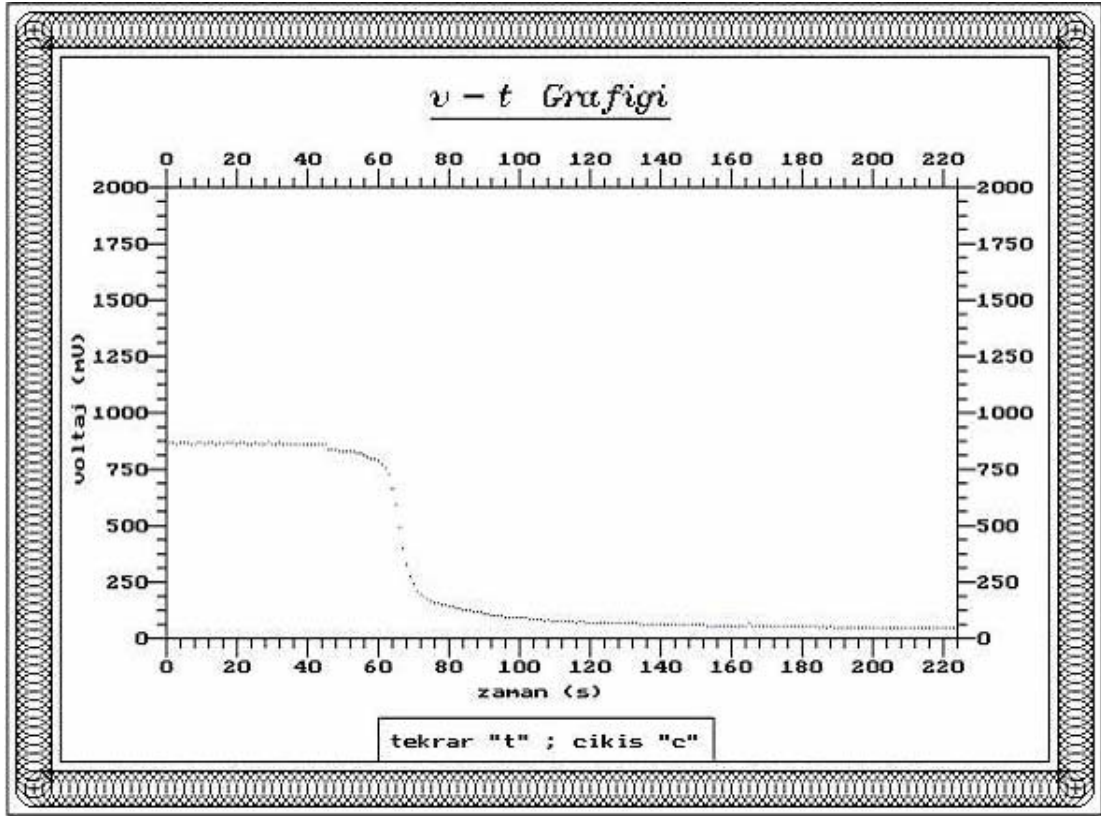


Şekil 7.12. Hidrojen gazı verilmesiyle elde edilen voltaj-zaman grafiği.



Şekil 7.13. Hidrojen gazı ile 1 saat süreyle beslenmesi sonrasındaki voltaj-zaman grafiği.

Proton değişim zarlı yakıt hücresine hidrojen gazı yakıtının girişi kesildiğinde, voltajın zamana göre değişim grafiğinin ekran görüntüsü Şekil 7.14'te verilmiştir. Görüleceği üzere sabit bir voltaj seviyesine sahipken 40.saniyede hidrojen gazı girişi kesilmektedir. Hidrojen gazı yakıtının kesilmesiyle birlikte 20 s kadar yavaş bir azalma gözlenirken 60. saniyeden sonra 70. saniyeye kadar hızlı bir düşüş gözlenmektedir. Daha sonra 70. saniyeden itibaren voltajdaki düşüş azalarak sifıra doğru inmektedir. Voltajın sıfır seviyesine inmesi saatler sürebilmektedir.



Şekil 7.14. Hidrojen gazının kesilmesiyle elde edilen voltaj-zaman grafiği.

7.3. Verim Hesabı

Proton değişim zarlı yakıt hücresinin hidrojen gazı ve oksijen gazı ile beslenmesiyle meydana gelen kimyasal tepkime sonrasında gerçekleşen su oluşumunun yanı sıra elektrik ve ısı enerjileri meydana gelmektedir. 60 s boyunca proton değişim zarlı yakıt hücresi çalıştırılıp, Çizelge 7.2’de verilmiş olan proton değişim zarlı yakıt hücresinden elde edilen ve hesaplanan veriler kullanılarak Eşitlik 7.1 ile elektrik enerjisi verimi hesaplanmıştır. Hidrojen gazının ısı değeri $10.8 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3$ olup proton değişim zarlı yakıt hücresinin 60 s ’lik çalışma süresi içerisinde harcanan hidrojen gazı miktarı $2.35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ kadardır.

$$\eta_{\text{elektrik}} = \frac{E_{\text{elektrik}}}{E_{\text{hidrojen}}} = \frac{V \cdot I \cdot t}{V_{H_2} \cdot H_{H_2}} = \frac{0.463(V) \cdot 0.283(A) \cdot 60(s)}{2.35 \cdot 10^{-6}(\text{m}^3) \cdot 10.8 \cdot 10^6(\frac{\text{J}}{\text{m}^3})} = 0.309 \cong \%31 \quad (7.1)$$

Yakıt hücreleri elektrik enerjisinin yanı sıra ısı enerjisi de üretmektedir. Eğer bu enerji kullanılmaz, sadece elektrik enerjisinin kullanılırsa, kayıp enerji olarak ortaya çıkmaktadır. Isı enerjisinin de göz önünde bulundurulmasıyla Çizelge 7.4'deki su oluşumundaki entalpi ve entropi değişim değerlerinin kullanımıyla proton değişim zarlı yakıt hücresinin verimi Eşitlik 7.2'de hesaplanmıştır. Ortam sıcaklığı 298 K olup 1 atm basınç altında gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 7.4. Su oluşum tepkimesindeki entalpi ve entropi değişimleri.

	H_2	$\frac{1}{2} O_2$	H_2O	Değişim
Entalpi ΔH $(\frac{J}{mol})$	0	0	-285830	-285830
Entropi ΔS $(\frac{J}{K \cdot mol})$	130.68	$0.5 \cdot 205.14$	69.91	-163.34

$$\eta_{st} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{\Delta H - T \cdot \Delta S}{\Delta H} = 1 - \frac{T \cdot \Delta S}{\Delta H} = 1 - \frac{298(K) \cdot (-163.34)(\frac{J}{K \cdot mol})}{(-285830)(\frac{J}{mol})} = 0.8297 \cong \%83 \quad (7.2)$$

Yakıt hücresinde Faraday verimi yakıt hücresinin elektrik gücünden hesaplanan gaz hacmi ile yakıt hücresinin tükettiği gazın hacmi ile ilişkili olup proton değişim zarlı yakıt hücresinin oluşturduğu akımdan tüketilen hidrojen gazı hacminin hesaplanması Eşitlik (7.3)'te verilmiştir.

$$\eta = \frac{V_{H_2}(\text{hesaplanan})}{V_{H_2}(\text{tüketilen})} = \frac{\frac{R \cdot I \cdot T \cdot t}{F \cdot P \cdot z}}{\frac{V_{H_2}}{P}} = \frac{\frac{8.314(\frac{J}{mol \cdot K}) \cdot 0.283(A) \cdot 293(K) \cdot 60(s)}{96485(\frac{C}{mol}) \cdot 1.013 \cdot 10^5(Pa) \cdot 2}}{2.35 \cdot 10^{-6}(m^3)} = 0.9004 \cong \%90 \quad (7.3)$$

7.4. Maliyet Hesabı

Proton değişim zarlı yakıt hücresinin maliyet hesabı ürettiği güce göre yapılmıştır. İmalat için kullanılan demirbaş ve sarf malzemelerin listeleri sırasıyla Çizelge 7.5 ve Çizelge 7.6’da verilmiştir.

Çizelge 7.5. Kullanılan demirbaş malzemelerin listesi.

Malzeme adı	Maliyeti (YTL)
İşkence	56.00
Matkap	130.00
Matkap tezgahı	75.00
Profil açma tablosu	57.35
Matkap uçları	10.00
Su banyosu	646.64
Dijital terazi	3,357.10
Koruyucu gözlük	41.30
Alüminyum levha	6.70
Fan	6.50
Spatula	2.95
Pens	3.54
Eldiven	5.90
Pipet	1.42
Pipet pompası	11.56
Pleksiglas çalışma yüzeyi	5.90
Pleksiglas kurutma ortamı	21.24
Cam çubuk	2.36
Toplam	4,441.46

Çizelge 7.6. Kullanılan sarf malzemelerin listesi.

Malzeme adı	Maliyeti (YTL)
Nafion™ N-1035	48.92
Karbon örgü	7.35
Grafit levha	101.42
Tutucu	62.87
Metal folyo	34.51
Perflourosulfonic acid Nafion™ 5% w/w	11.47
Sülfürik asit	0.35
Hidrojen peroksit	0.35
Test tüpü ve tıpası	1.33
Potassium Tetrachloroplatinate (II)	30.54
Ammonium Ferric (III) Oxalate	0.57
Silikon conta ve dolgu maddesi	25.75
Grafit tozu	4.65
Hortum bağlantıları	16.52
Fan	3.25
Soket	2.00
Vida takımı	2.00
Yapıştırıcı	5.00
Toplam	337.68

Çizelge 7.5 ve Çizelge 7.6’da görüldüğü gibi proton değişim zarlı yakıt hücresinin üretiminde kullanılan demirbaş cihaz ve malzemelerin maliyeti 4,441.46 YTL iken kullanılan sarf malzemelerin maliyeti 337.68 YTL’dir. İmalatı gerçekleştirilen hidrojen/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin gücü 0.175 W olduğunda üretim maliyeti 1929.60 YTL/W olmuştur.

8. TARTIŞMA VE SONUÇ

8.1. Tartışma

Bu çalışmada, farklı besleme türlerine sahip proton değişim zarlı yakıt hücrelerinin imalatı için kullanılan bileşenlerinin üretimi, bunların üretiminde karşılaşılabilecek zorlukları, bileşenlerinin bir araya getirilerek monte edilmeleri, ölçümler sonucu performanslarının belirlenmesi ve üretim maliyetleri konu edilmiş ve incelenmiştir.

Proton değişim zarlı yakıt hücresinin imalatında kullanılan proton değişim zarı olarak Nafion™ N-1035 tipi zar kullanılmıştır. Bu zar 0.09 mm kalınlığında olup 4x4cm ebatlı hazırlanmıştır. Proton değişim zarı üzerindeki olası kirlilikler sülfürik asit, hidrojen peroksit ve saf su kullanılarak kirliliklerinden arındırılmıştır. Arındırılma işlemi 80°C sıcaklıktaki bir ortamda gerçekleştirilmiştir. Bu ortam bir su banyosu ile sağlanmıştır.

Proton değişim zarlı yakıt hücresinin kalbini teşkil edecek elektrot-zar yapısının oluşturulmasında proton değişim zarının yanı sıra elektrot olarak platin yüklü karbon dokumalar kullanılmıştır. Karbon dokumaların platin ile yüklenmesinde “Ammonium Ferric (III) Oxalate” ile “Potassium Tetrachloroplatinate (II)” kimyasalları kullanılarak fotokimyasal yöntem kullanılmıştır. Elektrot üzerindeki katalizör görevi görmekte olan platinin yüzeyce yoğunluğu 3.97 mg/cm² olarak elde edilmiştir.

Proton değişim zarı ile elektrotların kaynaştırılmasında ağırlıkça %5’lik “Nafion™ perflourosulfonic acid” kullanılmıştır. Bu madde proton değişim zarının su oranı artırılarak sıvılaştırılmış ve alkol içerikli halidir. Kullanılan bu “perflourosulfonic acid” miktarı imalatı gerçekleştirilen proton değişim zarlı yakıt hücresinin performansını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Isıl işlem ile birlikte kullanılan “perflourosulfonic acid” ’in azlığı proton değişim zar ile elektrotun kaynaşmasını sağlamazken kullanılan “perflourosulfonic acid” ’in fazlalığı proton değişim zarlı yakıt hücresinin çalıştırılmasında kullanılan gazların elektrot-zar ara yüzeylerine ulaşmasına

neden olacak çatlakları oluşturmuştur. Bu çatlakların sıklığı proton değişim zarlı yakıt hücresinin performansını etkilemiştir.

Oluşturulan elektrot-zar yapısının kapalı bir sistem içerisinde yer alması için üzerine gaz akış kanalları açılmış grafit levhalar kullanılmıştır. Grafit levhaların işlenmesinin kolay olmasının yanı sıra aynı zamanda kırılma olmaları proton değişim zarlı yakıt hücresinin bir araya getirilmesinde esneme özelliği düşük tutucular kullanılmıştır. Birleştirme aşamasında gaz sızıntılarını önlemek amacıyla silikon içerikli yapıştırıcı kullanılmıştır.

Proton değişim zarlı yakıt hücresine yakıtın ve oksitleyicinin verilmeden önce bir ara ünite olan nargile ünitesi hazırlanmıştır. Bu nargile ünitesinin amacı, proton değişim zarlı yakıt hücresinin beslenmesinde kullanılan gazların nemlendirilmesidir. Bu sayede proton değişim zarının iletim özelliği korunmuş ve elektro-kimyasal tepkimeler sonrasında oluşan suyun osmozu engellenmiştir.

Turbo Pascal 7.0 programlama diliyle yazılmış olan bir yazılım yardımıyla proton değişim zarlı yakıt hücresinden elde edilen sinyaller incelenmiş, sinyallerin analog olması nedeniyle bilgisayarın paralel port girişine verilmeden önce dijital sinyallere dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm için 0808ADC entegresi kullanılmıştır. Bilgisayara aktarılan dijital sinyaller yazılım desteği ile işlenerek farklı çalışma şartlarına göre voltaj-zaman grafikleri elde edilmiştir.

İmalatları gerçekleştirilen proton değişim zarlı yakıt hücrelerinin hidrojen/hava veya hidrojen/oksijen ile beslenmeleri sonrasında elde edilen ölçüm sonuçları değerlendirilerek çalışma şartlarına bağlı voltaj-akım, güç-akım, voltaj-zaman değişimleri gözlenmiştir. Bu gözlemler, multimetre, “Turbo Pascal 7.0” programla dilinde yazılmış bir yazılım kullanımıyla sağlanmıştır. Elde edilen ölçümler “Turbo Pascal 7.0” programlama dilin yazılmış yazılımın dışında “Microcal Origin 6.0” grafik çizim programında kullanılarak grafik çizimleri elde edilmiştir.

Proton değişim zarlı yakıt hücresine bağlı yük direncinin değiştirilmesi sonucu ölçülen akım ve voltaj değerleri ohm yasasına uyduğu gözlenirken, yük direncinin alt ve üst sınır değerler dışına çıkartılması durumunda ise ölçülen akım ve voltaj değerleri ohm yasasına uymamaktadır. Yük direncindeki alt ve üst sınır değerler, hidrojen/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresi için $0.7\Omega - 5\Omega$ bulunurken, hidrojen/oksijen beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinde $0.6\Omega - 10\Omega$ bulunmuştur. Proton değişim zarlı yakıt hücresine bağlı değiştirilebilir yük direncinin ayarlanabilir aralığı olan $0-100\Omega$ arası direnç değerlerindeki voltaj, akım verileri ile çizilen voltaj-akım grafiklerinden yük direncinin büyük olduğu bölgede akım geçişinin zayıflamış olduğu görölmüştür. Elektro-kimyasal tepkime zinciri hızında azalma oluşturan bu akım düşüşü, proton değişim zarlı yakıt hücrelerinin yakıt ve oksitleyici gazların besleme bölgeleri arasındaki voltajda, tepkime hızının düşüşü nedeniyle, artış gözlenmiştir. Bunun yanında yük direncinin düşük olduğu bölgede ise akım geçişinin artmış olduğu gözlenmiştir. Bu duruma bağlı olarak elektro-kimyasal tepkime zinciri hızındaki artış, oluşan su miktarının fazlalaőması ve suyun tahliye hızının yeteri kadar hızlı olmaması, yakıt ve oksitleyici gazların besleme bölgeleri arasındaki voltajda düşüş gözlenmiştir. Böylece ölçümlerin, proton değişim zarlı yakıt hücrelerine bağlı yük direncine, hücreyi besleyen hidrojen gazının konsantrasyonuna, oksitleyici olarak kullanılan hava veya oksijen gazının konsantrasyonuna sıkı sıkıya bağlı olduğu anlaşılmıştır.

Proton değişim zarlı yakıt hücresinden elde edilen verilerle çizilen voltaj-güç grafiğinde hidrojen/oksijen beslemeli yakıt hücresinden elde edilebilen azami güç $0.135W$ iken hidrojen/hava beslemeli yakıt hücresinden elde edilen azami güç $0.175W$ olduğu görölmüştür. Hidrojen/oksijen beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinde elde edilmesi gereken güç, hidrojen/hava beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresine nazaran, daha büyük elde edilmesi gerekirken, daha düşük çıkmasının nedeni, elektrotların platin ile yüklenmesi esnasında kullanılan platin miktarının farklı oluőları, sıvı haldeki proton değişim zarı miktarının aynı seviyede olmamalarından kaynaklanmıştır. Platin miktarının azlığı hidrojen gazı molekülünün ayrışma miktarını azaltırken sıvı haldeki proton değişim zarı miktarı proton değişim zarlı yakıt hücresinin

çalıştırılmasında kullanılan gazların elektrot-zar ara yüzeye ulaşmasını sağlayan çatlakların çokluğu ve genişliğini belirlemiştir.

Proton değişim zarlı yakıt hücresinin çalışma şartlarına bağlı olarak elektrotlar arası elde edilen ölçüm sonuçlarından çizilen voltaj-zaman grafikleri çizilmiştir. Gerek hidrojen/hava beslemeli gerekse hidrojen/oksijen beslemeli proton değişim zarlı yakıt hücresinin voltaj-zaman grafiğinden yakıt ve oksitleyici gazların hücreye verilmesiyle hızlı bir çalışma özelliğine sahip olduğu gözlenmiştir. Bunun yanı sıra kısa sürede sabit bir değerde uzun süre sabit bir voltaj değerine sahip olduğu da görülmüştür.

Üretilen proton değişim zarlı yakıt hücresinden elde edilen ölçümlerden bu tür yakıt hücresinin verimini %31 gibi oldukça yüksek sayılabilecek bir verime sahip olduğu sonucuna varılabilir. Bu %31'lük verim proton değişim zarlı yakıt hücresinden elde edilebilen elektriksel verimdir. Bunun yanı sıra inceleme konumuz dahilinde olmayan termodinamik verimi de mevcuttur. Proton değişim zarlı yakıt hücresi sisteminde meydana gelmiş verim kayıpları elde olmayan gaz sızıntılarının hiç kullanamaması ve kimyasal tepkimelerin ekzotermik olması nedeniyle çevreye ısı olarak açığa çıkmasıdır. Oluşan ısı enerjisinden faydalanılması neticesinde proton değişim zarlı yakıt hücresinden yararlanma oranı daha da artacaktır.

Konu ile ilgili literatürde yer alan proton değişim zarlı yakıt hücresinin verimi %40-60 civarında olduğu binmektedir. Ürettiğimiz yakıt hücresi veriminin bu verim aralığının altında çıkmasının nedeni kalbini teşkil eden bileşenler olan elektrot ve zarın yakıt hücresi üretimi için hazırlanması üretim şartlarına uygun bir ortamda gerçekleştirilememiş olmasındandır. Çünkü bu bileşenlerin hazırlanmasında çevre kontaminantlarından (toz ve diğer yabancı maddeler) uzak olunması gerekir. Buna için üniversitemizde tozdan arındırılmış bir odamızın (clean room) olmaması neden olmuştur.

Proton değişim zarlı yakıt hücresinin üretilmesi için gerekli demirbaş malzemelerin maliyeti 4441.46YTL olmuştur. 1W'lık yakıt hücresi yığınının üretilmesi için gerekli sarf malzemelerin maliyeti ise 1929.60YTL dir. Bu üretim maliyetinin

yüksekliği gerekli malzemelerin bulunması ve alınmasındaki aksaklık ile ülkemizin yurt dışı alım mevzuatının uygun olmamasından kaynaklanmıştır. Bu maliyet malzeme alımlarının daha uygun bir şekilde yapılması sonrasında 1W'lık bir yakıt hücresi yığınının çok daha aşağı olan 200 YTL gibi bir maliyete kadar düşeceğini yaptığımız küçük bir araştırmayla gördük. Buna ek olarak tüm dünyada yakıt hücreleri el ile üretilmektedir. Bu durum doğal olarak maliyeti de yükseltmektedir. Gelecekte yakıt hücrelerinin kullanımı yaygınlaştıkça sonrasında otomasyona geçileceğinden maliyeti daha da düşecektir.

8.2. Sonuç

Yapılan voltaj, akım ve güç ölçümleri neticesinde yüksek değerler elde edilebileceği görülmüştür. Buna bağlı olarak üretilecek çok sayıda proton değişim zarlı yakıt hücresini uygun şekilde bir araya getirmek suretiyle ve uygun dönüşüm sağlanarak çok amaçlı elektrik üretici olarak kullanılabilir. Kullanım alanları sabit istasyonlar olabileceği gibi sabit olmayan (mobil) istasyonlarda da kullanılabilir. Sabit istasyonlardaki uygulaması elektrik üretim santralleri olabilecekken, sabit olmayan istasyonlardaki uygulaması, içten yanmalı motorların elektrik motorlara dönüştürülmesiyle birlikte araçlar, taşınabilir (dizüstü) bilgisayarlar, cep telefonları olabilir.

Proton değişim zarlı yakıt hücresinde kullanılan elektrolit katı olmasından dolayı sızıntı söz konusu olmayıp düşük sıcaklıkta çalışması birçok uygulama için büyük avantajdır. Düşük güçlerde dahi verimli olmaları, sessiz çalışmaları, basit yapıları ve hafiflikleri ile çevre dostu olmaları nedeniyle ideal bir enerji dönüştürücüdür. Bu enerji dönüştürücülerinin uygulanabilir alan yelpazesinin geniş olması, üzerinde araştırma ve geliştirme çalışmalarının artmasına yol açmakta olup, yakında birçok sektörde ticari kullanımı başlayacaktır.

Sonuç olarak; bu alanda yapılacak çalışmalar, uygulama alanlarının genişletilmesinin yanı sıra, üretilen yakıt hücresinin daha verimli ve daha ekonomik olması yönünde de ilerlemeler kaydedilmelidir. Dünyada bu alanda sergilenen çalışma

ve çaba karşısında ÷lkemiz de sağlam devlet kuruluşlarınca desteklenecek devlet ve özel sektörlerce çalışmalar hızlandırılmalı, tükenmekte olan fosil kökenli yakıtların yerini alabilecek teknolojik uygulamalara ve onların geliştirilmesine ağırlık vermelidirler.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Abaoud, H., Steeb, H., 1998, “The German-Saudi HYSOLAR Program”, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 23, p. 445-449.

Akgöbek, Ö., 2000, “Turbo Pascal ve Programlama Sanatı (4.0-5.0-6.0-7.0)”, Beta Yayınları, İstanbul.

Altınbaşak, O., Taşbaşı, A., 2000, “Turbo Pascal”, aktaş Yayınları, İstanbul.

Amphlett, L.C., Farahani, M., Mann, R.F., Pepley, B.A., Roberge, P.R., 1991, “Proceedings of the 26th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference”, Volume 3, Conversion Technologies/Electrochemical Conversion, American Nuclear Society, La Grange, Illinois, p.624.

Amphlett, L.C., vça, 1998, “The Operation of a Solid Polymer Fuel Cell: A Parametric Model”, Royal Military College of Canada.

Anabritanica, Volume 17 p. 54 ve Volume 11, p.37.

Anonim, 1992, Bmft, Renewable Energy, Germany.

Appleby, A.J., Yeager E.B., “Energy”, p.11, 137, 1986.

Ar, F.F., 1998, “Yakıt Hücreleri”, Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü (EİE).

Aydemir, S., 1998, “Enerji Kaynağı Olarak Hidrojen Üretim Yöntemlerinin İncelenmesi”, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, p.129.

Ballard, 1990, Journal of Power Sources, p.239-250, 1990.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Barbir, F., 2000, "Review of Hydrogen Conversion Technologies", www.iahe.org.

Bernardi, D.M., Journal of Electrochemical Society, p.137, 3344, 1990.

Bilici, U., 2004, "Enerji Taşıyıcısı Hidrojen, Hidrojen Taşıyıcısı Sodyum Bor hidrür", http://www.maden.org.tr/e_bulten/sayi_goster.asp?sayi=67&yazi_sira_no=33

Bockris, J.O'M; Veziroğlu, T.N; Smith, D.; çev.: Noyan Ö.F., 2002, "Geleceğin enerjisi güneş ve hidrojen", Kaynak yayınları, İzmir.

Bockris, J.O'M., 2002, "The Origin of Ideas on a Hydrogen Economy and its Solution to the Decay of the Environment", International Journal of Hydrogen Energy, Volume 27, p.731-740.

Boersma, R.J., Sammes, N.M., 1997, "Distribution of Gas Flow in Internally Manifolded Solid Oxide Fuel-Cell Stacks", Journal of Power Sources, Volume 66, p.41-45.

Booth, D., 1993, "Understanding Fuel Cells", Home Power#35.

Buchi, F.N., Gupta, B., Rouilly, M., Hauser, P.C., Chapiro, A., Scherer, G.G., 1992, "Proceedings in 27th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference", Volume 3, Conversion Technologies/Electrochemical Conversions, San Diego, CA, p.419.

Derouin, C., Springer, T., Uribe, F., Valerio, J., Wilson, M., Zawodzinski, T., Gottesfeld, S., 1992, "1992 Fuel Cell Seminar Program and Abstracts", Fuel Cell Organizing Committee, Tucson, Arizona, p.615.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Dincer, I., 2002, "Technical, Environmental and Exergetic Aspects of Hydrogen Energy Systems", International Journal of Hydrogen Energy, Volume 27, p.265-285.
- Dooley, J.J., 1999, "Energy R&D in Japan", Pacific Northwest National Laboratory.
- Dooley, J.J., 1999, "Energy R&D in United States", Pacific Northwest National Laboratory.
- Ekmekçi, İ ve Ermiş, K., 2002, "Yakıt Hücrelerinin Temiz Enerji Kaynağı Olarak Önemi ve Uygulama Alanları", IV.Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, İstanbul.
- Eral, M., 1998, (Koordinatör), Tübitak-TTGV Bilim-Teknoloji-Sanayi Tartışmaları Platformu, Enerji Teknolojileri Politikası Çalışma Grubu Raporu, Ankara.
- Ergül, M., Türker, L., Eroğlu, I., 1997, "An Investigation on the Performance Optimization of an Alkaline Fuel Cell", International Journal of Hydrogen Energy, Volume 22, No 5, p.1039-1045.
- Evans, M., 1999, "Energy R&D in Italy", Pacific Northwest National Laboratory.
- Final Report, "Investigation of Design and Manufacturing Methods for Low-Cost Fabrication of High Efficiency, High Power Density PEM Fuel Cell Power Plant", 1991, International Fuel Cells, FCR-11320A, South Windsor, Connecticut.
- Gottesfeld, S., 1993, "Polymer Electrolyte Fuel Cells: Potential Transportation and Stationary Applications", An EPRI/GRI Fuel Cell Workshop on Technology Research and Development, Stonehart Associates, Madison, Connecticut, No.10.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Gottesfeld, S., Zawodzinski, T., 1998, “PEMFC”, Advances in Electrochemical Science and Engineering, Volume 5, edited by R. Alkire, H. Gerisher, D. Kolb, C. Tobias, p.197-301.

Gregory, D.P., 1972, “A Hydrogen Energy System”, Institute of Gas Technology, USA.

Grot, W.G.F., Munn, G.E., Walmsley, P.N., 1992, “Abstract No. 154”, 141st National Meeting of the Electrochemical Society, Inc., Houston, TX.

Grubb, W.T., 1957, “Proccedings of the 11th Annual Battery and Development Conference”, PSC Publications Committee, Red Bank, NJ, p.5.

Grune, H., 1992, “1992 Fuel Cell Seminar Program and Abstracts”, The Fuel Cell Seminar Organizing Committee, Tucson, Arizona, p.161.

Grune, H., 1992, “1992 Fuel Cell Seminar Program and Abstracts”, The Fuel Cell Seminar Organizing Committee, Tucson, Arizona, p.161.

Gürsoy, U., 1999, “Dikensiz Gül Temiz Enerji-Doğu Akdeniz Çevrecileri Temiz ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Raporu”, İskenderun Çevre Koruma Derneği Yayını, ISBN 975-96916-0-4, p.283.

Güvendiren, M., 2003, “Enerji Kaynağı Olarak Hidrojen Ve Hidrojen Depolama”, Mühendis ve Makina, cilt: 44, sayı: 523.

Hijikata, T., 2002, “Research and Development of International Clean Energy Network Using Hydrogen Energy (WE-NET)”, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 27, p.115-129.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Hishinuma, Y., Kunikata, M., 1997, “Molten Carbonate Fuel Cell Power Generation System”, Energy Conversion & Managment, Volume 38, p.1237-1247.
- Hurley, P., 2002, “Build Your Own Fuel Cells”, Wheelock, p.329.
- Karaosmanoğlu, F. ve Çetinkaya, M., 2002, “Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pilleri”, IV.Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu.
- Koca, A., 1998, “Hidrojen Üretimi ve Enerji Kaynağı Olarak Kullanımı”, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 89s., İstanbul.
- LaConti, A., Smarz, G., Sribnik, F., 1986, “New Membrane-Catalyst for Solid Polymer Electrolyte Systems”, Hamilton Standard for Los Alamos National Laboratory, Contact No.9-X53-D6272-1.
- Lehman, P.A., Chamberlin, C.E., Herron, T.G., Reid, R.M., 1994, “Use of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell of Standby Power in a Stand-Alone Energy System”, International Conference on Fuel Cells, Long Beach, CA.
- Ledjeff, K., et al., 1992, “Low Cost Membrane Fuel Cell for Low Power Applications”, Fraunhofer-Institute for Solar Energy Systems, Program and Abstracts.
- Liu, H.T., Barbir, F., Kazım, A., Kakaç, S., 1996, “Fuel Cells – The Clean Energy Converter”, Proceedings of the First International Energy and Environment Symposium, Karadeniz Technical University, Trabzon, p.3-16.
- Momirlan, M. ve Veziroğlu, T.N., 2002, “Current Status of Hydrogen Energy”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 6, p.141-179.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Mosdale, R., Stevens, P., Novel-Cattin, F., Loppinet, B., Gebel, G., Aldebert, P., Pineri, M., 1991, "Water Management in a Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell", Proceedings of the European Space Power Conference, Florence, ESA-SP-320, p.479-483.
- Nguyen, Q., Minh, 1993, "Ceramic Fuel Cells", Journal of American Ceramic Society, Volume 76, No 3, p.563-568.
- Peinecke, V., Ledjeff, K., Heinzl, A., 1992, "1992 Fuel Cell Seminar Program and Abstracts", Fuel Cell Seminar Organization Committee, Tucson, Arizona, p.171.
- Pohl, H.W. vça, 1997, "Hydrogen in Future Aviation", International Journal of Hydrogen Energy", Volume 22, p.1061.
- Prater, K.B., 1992, "Solid Polymer Fuel Cell Developments at Ballard", Journal of Power Sources, Volume 37, p.181-182.
- Pyle, W., Spivak A., Cortez R., Healy J., 1993, "Making Electricity with Hydrojen", Home Power#35.
- Ralph, T., Hards, G., Keating, J., Campbell, S., Wilkinson, D., Davis, M., Pierre, J.St., Johnson, M., 1997, "Low Cost Electrodes for Proton Exchange Membrane Fuel Cell: Performance in Single Cells and Ballard Stacks", Journal of Electrochemical Society", Volume 144, No.11.
- Runci, P.J., 1999, "Energy R&D in Germany", Pacific Northwest National Laboratory.
- Sherif, S. et al., 1997, "Liquid Hydrogen: Potential, Problems and a Research Program", International Journal of Hydrogen Energy, Volume 22, (7), 683.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Sikari, K., Tsurumi, K., Kawaguchi, S., Watanabe, M., Storehart, P., 1992, “Fuel Cell Seminar Program and Abstracts”, Fuel Cell Organizing Committee, Tucson, AZ, p.153.
- Srinivasan, S., Manko, D.J., Koch, H., Enayetullah, M.A., Appleby, A.L., 1990, “Recent Advances in Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell Technology with Low Platinum Loading Electrodes”, Journal of Power Sources, Volume 29, p.367-387.
- Srinivasan, S., Velez, O.A., Parthasarthy, A., Manko, D.J., Appleby, A.J., 1991, “High Energy Efficiency and High Power Density Proton Exchange Membrane Fuel Cells – Electrode Kinetics and Mass Transport”, NASA Conf. Publ. 3125 (Space Electrochemical Res. Technology), p.101-122.
- Taylor, E.J., Anderson, E.B., Vilanbi, N.R.K., 1992, “Preparation of High-Platinum Utilization Gas Diffusion Electrodes for Proton Exchange Membrane Fuel Cells”, Journal of Electrochemical Society, Volume 139, No. 5, p.L45-L46.
- Temelci, F.E., 2000, “Taşıtlarda Alternatif Yakıt Olarak Hidrojen Kullanımı”, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 59s, İstanbul.
- Ticianelli, E.A., Deroulin, C.R., Reddondo, A., Srinivasan, S., 1998, “Methods to Advance Technology of Proton Exchange Membrane Fuel Cells”, Journal of Electrochemical Society, Volume 135, No 9, p.2209-2214.
- Tübitak, “Hidrojen Enerjisi”, Çevre dostu ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile ilgili Teknolojiler Alt Grup Raporu, TTGV Bilim-Teknoloji-Sanayi tartışmaları platformu, <http://www.tubitak.gov.tr/btpd/btspd/platform/enerji/altgrup/cevre/bolum8.pdf>.
- Türe, İ.E., 2001, “Hidrojen Enerjisi”, Temiz Enerji Vakfı Yayınları, Ankara.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

U.S. Department of Energy, 1992, "Phosphoric Acid Fuel Cells", DE93000003.

U.S.Department of Energy, 1992, "Proton Exchange Membrane Fuel Cell Program", DE93000009.

Ültanır, M.Ö., 1996, "21.Yüzyılın Yakıtı Hidrojen", Bilim ve Teknik Dergisi, Sayı: 344, p.58.

Ültanır, M.Ö., 1998, "21. Yüzyıla Girerken Türkiye'nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi", Türk Sanayiciler ve İşadamları Derneği Raporu, www.tusiad.org.

Ün, Ü.T., 2003, "Enerji Kaynağı Olarak Hidrojen", <http://www.eksenotomasyon.com.tr/ARSIV/86/cevre.htm>.

Ün, Ü.T., 2003, "21. Yüzyılın Enerjisi: Hidrojen", Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, İzmir.

Ün, Ü.T., 2003, "Hidrojen Enerjisi:Depolanması, Güvenliği, Çevresel Etkisi ve Dünyadaki Durumu", Mühendis ve Makina, Cilt: 44, Sayı: 525.

Vanderborgh, N.E., Kimble, M.C., Huff, J.R., Hedstrom, J.C., 1992, "Proceedings in 27th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference", Volume 3, Conversion Technologies/Electrochemical Conversions, San Diego, CA.

Veziroğlu, N., 1991, "Hidrojen Enerjisi, Modern Fizik" AÖF Yayını No:117, Eskişehir.

Veziroğlu, T.N., 2000, "Quarter Century of Hydrogen Movement 1974-2000", International Journal of Hydrogen Energy, Volume 25, p.1143-1150.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Veziroğlu, T.N., 2003, “Hydrogen Energy System:A Permanent Solution To Global Problems”, www.iahe.org.

Watkins, D.S., 1993, “Research, Development and Demonstration of Solid Polymer Fuel Cell Systems”, Fuel Cell Systems, Plenum Press, New York.

Wilkinson, D., Steck, A., 1997, “New Materials for Fuel Cell and Modern Battery Systems”, Proceedings of the Second International Symposium, Montreal, Quebec, Canada.

Wilkinson, D., Thompsett, D., 1997, “Materials and Approaches for CO and CO₂ Toerance for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells”, Proceedings of the Second International Symposium on New Materials for Fuel Cell and Modern Battery Systems, Montreal-Quebec, Canada, p.266-285.

Wilson, M.S., Springer, T.E., Zawodzinski, T.A., Gottesfeld, S., 1991, “Proceeding in 26th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference”, Volume 3, Conversion Technologies/Electrochemical Conversion, Boston, Massachusetts, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, PA.

Wilson, M.S., Gottesfeld, S., 1992, “High Performans Catalyzed Membranes of Ultra-Low Pt Loadings for Polymer Electrolyte Fuel Cells”, Journal of Electrochemical Society, Volume 139, No 2, p.L28-L30.

<http://yunus.hacettepe.edu.tr/~yilser/yakitpili.htm>

http://www.bos.com.tr/tedarik_sivi.htm

<http://www.eksnotomasyon.com.tr/ARSIV/85/cevre.htm> , “Hidrojen Enerjisi”, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Teknoloji Dairesi Raporu.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

<http://www.electronic-circuits-diagrams.com/computersimages/computersckt2.shtml>

<http://www.enerji.gov.tr/detay.asp?id=63>

<http://www.h-tec.com>, “Experiments with PEM fuel cell”

http://www.hidrojenforumu.com/kongre2konusma/ozet_incieroglu.htm

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/electrol.html>

<http://www.pertas.net/PERLITMADENI.html>

<http://www.taek.gov.tr/taek/td/html/hidro.htm>, Hidrojen Enerjisi.

<http://www.tusiad.org/turkish/rapor/enerji/html/sec14.html#Heading3>, Hidrojen Enerjisi.

<http://www.youthforhab.org.tr/tr/yayinlar/enerji/hidrojen/idealthid.html>

<http://www.youthforhab.org.tr/tr/yayinlar/enerji/hidrojen/trcalismalar.html>

<http://www.youthforhab.org.tr>, 2004, “Yakıt Olarak Hidrojen”, Youth for Habitat-Türkiye Web Sayfası.

<http://www2.ac-lyon.fr/enseigne/electronique/sujets/pilote99/an11.html>

ÖZGEÇMİŞ – CV



Adı Soyadı : Murat KELLEGÖZ
Doğum tarihi : 4 Haziran 1971
Doğum yeri : Langenfeld - Almanya
Medeni durumu : Evli, bir çocuk
Mesleği : Öğretim Yardımcısı Fizikçi
Ünvanı : Araştırma Görevlisi Doktor

Ev adresi : Gültepe mahallesi
 Üniversite evleri
 C-8 Blok Kat:6 Daire:25
 26040 Eskişehir - Türkiye

İş adresi : Osmangazi Üniversitesi
 Fen - Edebiyat Fakültesi
 Fizik Bölümü
 26480 Eskişehir - Türkiye

e – mail adresi : murke@ogu.edu.tr
mkellegoz@hotmail.com
mkellegoz@yahoo.com
mkellegoz@gmail.com

Web Sayfası : www.ogu.edu.tr/~murke

Telefon : +90 222 2490980 (ev)
 +90 542 6738601 (cep1) (Telsim-TR)
 +90 535 5608633 (cep2) (Turkcell-TR)
 +49 160 90 27 64 35 (cep 3) (T-Mobil-DE)
 +90 222 2290433 / 2330 (iş)

Fax : +90 222 2393578

Eğitimi

: (1977 - 1981)

Am Brükentor Grundschule

Langenfeld - Almanya

(1981 - 1983)

Käthe Kollwitz Schule

Langenfeld - Almanya

(1983 - 1985)

Fahlerweg Schule

Langenfeld - Almanya

(1985 - 1988)

Özel Ortadoğu Lisesi (alman dilinde eğitim)

Yakacık - Kartal - İstanbul - Türkiye

(1989 - 1991)

Hacettepe Üniversitesi

Yabancı Diller Yüksek Okulu (ingilizce hazırlık)

Beytepe - Ankara - Türkiye

(1991 - 1993) (ailevi nedenlerden devam edemedim)

Hacettepe Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi

Hidrojeoloji Mühendisliği

Beytepe - Ankara - Türkiye

(1994 - 1998)

Osmangazi Üniversitesi

Fen - Edebiyat Fakültesi

Fizik Bölümü (lisans)

Eskişehir - Türkiye

(1998 - 2000)

Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim dalı

Atom ve Molekül Fiziği Bilim Dalı (Master)

Eskişehir - Türkiye

(2000 - 2005)

Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim dalı

Genel Fizik Bilim Dalı (Doktora)

Eskişehir - Türkiye

İşe başlama tarihi

12 Ağustos 1999

Akademik çalışmaları

: *Fizikte lisans*

Yrd.Doç.Dr. İsmail ÖZKAN'ın gözetiminde

“8085 Mikroişlemci ve Mikrobilgisayar”

Osmangazi Üniversitesi

Fen - Edebiyat Fakültesi

Fizik Bölümü

Fizikte master

Yrd.Doç.Dr. İsmail ÖZKAN'ın gözetiminde

“Mikroişlemci Kontrollü X-Işınları Ölçüm Sistemi”

Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Bölümü

Fizikte doktora

Yrd.Doç.Dr. İsmail ÖZKAN'ın gözetiminde

“Farklı özelliklerdeki Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücreleri Tasarımı ve Ölçümleri”

Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Bölümü

Bilimsel çalışmaları : (Tezler)

“8085 Mikro işlemciler ve Uygulamaları”

Osmangazi Üniversitesi

Fen - Edebiyat Fakültesi

Fizik Bölümü

Lisans Tezi - Haziran 1998

Eskişehir – Türkiye

“Mikro işlemci Kontrollü X-ışınları Ölçüm Sistem”

Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Atom ve Molekül Fiziği Bilim dalı;

Yükseklisans tezi – 2000

Eskişehir – Türkiye

“Farklı Özelliklerdeki Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücresi Tasarımı ve Ölçümleri”

Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Genel Fizik bilim Dalı

Doktora tezi

Eskişehir – Türkiye

(Semineler)

KELLEGÖZ , Murat

“Radyasyonun Biyolojik Etkileri”

Osmangazi Üniversitesi

Fen - Edebiyat Fakültesi

Fizik Bölümü - 24 Mayıs 1999

Eskişehir – TÜRKİYE

(Makaleler)

KELLEGÖZ, Murat ve ÖZKAN, İsmail

“Mikrobilgisayar Kontrollü X-ışınları Ölçüm Sistemi”

Süleyman Demirel Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 8.2 ; 2004

ÖZKAN, İsmail - KELLEGÖZ, Murat - BAŞAR, Bekir

“Photovoltaic-Home System Design for Eskişehir”

Turkish Journal of Engineering and Environmental Science

(hakem kurulunda)

(Projeler)

ÖZKAN, İsmail – KELLEGÖZ, Murat

“PC Kontrollü Hidrojen ve Oksijen Beslemeli PEM

(Proton Değişim Zarlı) Yakıt Hücresi Tasarımı”

Osmangazi Üniversitesi - Proje Araştırmacısı - 2005

Kongreler

: II.Ulusal Ölçüm bilim Kongresi ; *Dinleyici* ; ESO, 1998

Eskişehir – Türkiye

TFD-21 Kongresi ; *Mikrobilgisayar Kontrollü X-ışınları Ölçüm Sistem* ; Sözlü bildiri ; Süleyman Demirel Üniversitesi ; 11-14 Eylül 2002 ; Isparta – TÜRKİYE

II. Ulusal Ege Enerji Sempozyumu ; *Dünyamızda Enerji Kullanımının Dünü ve Bugünü* ; Sözlü bildiri ; Dumlupınar Üniversitesi ; 26-28 Mayıs 2004 ; Kütahya – Türkiye

II. Ulusal Ege Enerji Sempozyumu ; *Hidrojenin Gelecekteki Alternatif Enerji Kaynağı Olmasındaki Önemi* ; Sözlü bildiri ; Dumlupınar Üniversitesi ; 26-28 Mayıs 2004 ; Kütahya – Türkiye

II. Ulusal Ege Enerji Sempozyumu ; *PEM(Proton Değişim Zarlı) Yakıt Hücresinin Çalışma İlkesi ve Uygulama Alanları* ; Sözlü bildiri ; Dumlupınar Üniversitesi ; 26-28 Mayıs 2004 ; Kütahya – Türkiye

V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu ; *Fosil Kökenli Yakıt Emisyonunun Çevreye Etkileri* ; Sözlü bildiri ; İGDAŞ Genel Merkez Binası ; 26-28 Mayıs 2004 ; İstanbul – Türkiye

V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu ; *PEM Yakıt Hücresinin; Üretim Aşamaları, Performansa Etkileri ve Karşılaşılabilecek Zorluklar ile Diğer Yakıt Hücrelere Nazaran Avantaj ve Dezavantajları* ; Sözlü bildiri ; İGDAŞ Genel Merkez Binası; 26-28 Mayıs 2004 ; İstanbul – Türkiye

Teknik Geziler

: Bilkent Üniversitesi

Entegre Hazırlama Laboratuvarı, 1999

Ankara – Türkiye

TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)

Araştırma laboratuvarları, 2003

Gebze – İzmit – Türkiye

- Bilgisayarla ilişkisi :**
- Web tasarımı (FrontPage)
 - Turbo Pascal
 - GWBasic
 - MultiSim
 - Microcal Origin
 - Microsoft Office
 - Delphi
 - Visual Basic
 - CoralDraw

- Sertifika ve ehliyetnameler :**
- Microsoft Sertifikası (1999)
 - LKS (Logo Klasik Seri) Muhasebe Programı Sertifikası (1999)
 - MEB (Milli Eğitim Bakanlığı) Bilgisayar Sertifikası (1999)
 - Sürücü Ehliyeti (2002)
 - Amatör Kaptanlık (Deniz Müsteşarlığı) (2004)
 - Amatör Telsiz Operatörlük (Deniz Müsteşarlığı) (2004)

Düzenleme tarihi : 11 Haziran 2005