

T.C.

171116

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİDROJEN ENERJİSİ
TEKNOLOJİLERİNİN BUGÜNÜ

İşılay ULUSOY
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Yrd. Doç.Dr. İlyas KANDEMİR

GEBZE
2005



**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ
ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU



İşıl YULUSOY'un tez çalışması, G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 25.07.2005 Tarih ve 2005/26 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Yrd. Doç. Dr. İlyas KANDEMİR

ÜYE

: Doç. Dr. Ali ATA

ÜYE

: Doç. Dr. AlpEr KONUKMAN

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 25.10.2005 Tarih ve 2005/37 sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR



ÖZET

Günümüzde dünya enerji gereksiniminin büyük bir çoğunluğu fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Fosil yakıt kullanımı dünya çevre sağlığını tehdit eden en büyük unsurlardan biridir. Fosil yakıt kullanımı çevre kirliliği, ozonun delinmesi ve asit yağmurları gibi sorunları da yanında getirmektedir. Gerek bu sorunlar, gerekse gelişen teknoloji ile fosil yakıt kullanımının artması ve rezervlerinin azalması nedeniyle alternatif enerji kaynakları giderek daha fazla araştırılmaya başlanmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda hidrojen enerjisi, çevre dostu özellikleri ve kullanım avantajları ile alternatif enerji kaynakları arasında en çok üzerinde durulan enerji kaynağı haline gelmiştir. Hidrojenin enerji hammaddesi olarak kullanımı dünyada hızla gelişen bir teknolojidir.

Bu çalışmada günümüzde kullanılan enerji kaynakları ele alınmış, petrolün alternatifi olarak görülen hidrojen enerjisi sisteminin Dünya'daki genel durumu incelenmiştir. Verimli bir enerji taşıyıcısı olarak görülen hidrojenin üretimi ve depolanması bu çalışmanın ana başlıkları arasında yer almaktadır. Ayrıca yakıt hücresi sistemi, çalışma prensibi ve taşıtlarda yakıt hücresi kullanımının bugünkü durumu literatürden derlenmiştir. Son olarak Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli incelenmiş ve Türkiye'de uygulanabilecek bir fotovoltaiik güneş-hidrojen üretim sistemi için maliyet hesabı yapılmış ve fosil yakıt kullanım maliyetiyle karşılaştırılmıştır.



SUMMARY

Nowadays most of the world energy demand is met by fossil fuels. The use of fossil fuels is one of the most important factors threatening the world's environmental health. Usage of fossil fuels also causes environmental pollution, acid rain and hole in the ozone layer. With the reasons of either these kind of problems or increase in the fossil fuel usage with the developing technology and decrease in the total reserve of fossil fuels, alternative energy sources have been investigated more than ever. As a result of the studies, hydrogen energy has been the most attractive one among the alternative energy sources due to its environmental friendly characteristics and its usage advantages. Using hydrogen as an energy raw material is the rapidly developing technology.

In this study, the used energy sources are discussed. Furthermore, hydrogen related energy, which is alternative to fossil fuels, in the world, in general, is examined. Production, storage and transportation of the most efficient energy carrier hydrogen systems are projected among main items. Fuel cell systems, their operating principles and fuel cell use in vehicles are presented based on the literature. Finally, land investments of a solar-hydrogen powered fuel-cell vehicle system is economically analyzed for use in Turkey.

TEŞEKKÜR



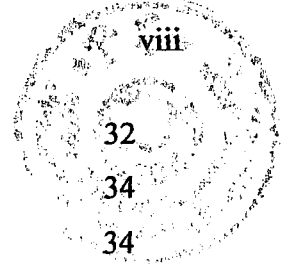
Tezimin hazırlanması sırasında bana yardımcı ve destek olan ve yüksek lisans eğitimim boyunca eğitimime önemli katkıları bulunan Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. İlyas KANDEMİR'e, bana her zaman yardımcı olan Araştırma Görevlisi arkadaşlarım Cihan GÖKÇÖL ve Bahtiyar DURSUN'a, çalışmalarımda büyük katkısı olan bölüm arkadaşım İlyas PARLAK ve iş arkadaşım Tolga YILMAZ'a, beni büyüten, yetiştiren ve desteklerini hep yanımda hissettiğim annem Sebiha BİLGİÇ ve babam Şemsettin BİLGİÇ'e, tez çalışmam süresince sabrını esirgemeyen, bana her zaman her konuda destek olan sevgili eşim Özgür ULUSOY'a teşekkürlerimi sunarım.

İşlay ULUSOY

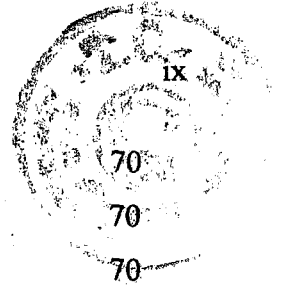
İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. ENERJİ KAYNAKLARI	3
2.1. Fosil Kökenli Enerji Kaynakları	3
2.2. Güneş Enerjisi	6
2.2.1. Termodinamik Sistemler	7
2.2.1.1. Pasif Güneş Sistemleri	7
2.2.1.2. Aktif Güneş Sistemleri	9
2.2.2. Fotovoltaik Sistemler	10
2.2.3. Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemleri	11
2.2.3.1. Parabolik Oluk	13
2.2.3.2. Parabolik Çanak	13
2.2.3.3. Merkezi Kule Sistemi	14
2.3. Rüzgâr Enerjisi	15
2.4. Jeotermal Enerji	18
2.5. Hidrolik Enerji	20
2.6. Nükleer Enerji	21
2.7. Biyokütle Enerjisi	24
2.8. Deniz Kökenli Enerji Kaynakları	25
2.9. Türkiye ve Enerji	25
2.10. Yeni Enerji Kaynaklarına Eğilim	28
2.11. Çözümde Hidrojenin Yeri	29
3. HİDROJEN ENERJİSİ	31
3.1. Hidrojen Enerjisinin Tarihsel Gelişimi	31
3.2. Hidrojen Üretimi	32



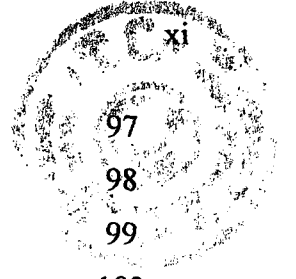
3.2.1. Metanın Buhar Dönüşümüyle Hidrojen Üretimi Yöntemi	32
3.2.2. Atıkgaz Saflaştırma Yöntemi	34
3.2.3. Foto Biyolojik Yöntemler	34
3.2.4. Güneş-Hidrojen Sistemleri	36
3.2.4.1. Foto-Elektro Kimyasal Yöntemler	38
3.2.4.2. Termokimyasal Yöntemler	40
3.2.4.3. Suyun Direkt Bozunması	41
3.2.4.4. Metal oksit dönüşümleri	45
3.2.4.5. Düşük Sıcaklık Dönüşümleri	48
3.2.5. Katı Atıklardan Hidrojen Üretimi	50
3.2.6. Magnetoliz Yöntemi	50
3.2.7. Magmaliz	51
3.2.8. Radyoliz	51
3.2.9. Rüzgar-Hidrojen Sistemi	51
3.2.10. Hidrojen Üretimi İçin Karadeniz'deki Hidrojen Sülfürün Kullanımı	53
3.3. Hidrojen Enerjisi Teknolojisinin Uygulama Alanları	54
3.3.1. Uzay Programlarında Hidrojen Yakıtının Kullanımı	54
3.3.1.1. Roket Yakıtı Olarak Hidrojen Kullanımı	54
3.3.2. Otomobillerde Hidrojen Kullanımı	55
3.4. Hidrojen Yakıtının Özellikleri	58
3.4.1. Motor Yakıtı Olma Özelliği	58
3.4.2. Kullanım Verimi	59
3.4.3. Çevresel Uygunluk	59
3.4.4. Emniyet	59
3.4.5. Maliyet	61
4. HİDROJEN İÇİN DEPOLAMA SEÇENEKLERİ	64
4.1. Karyojenik (Dondurulmuş) Sıvı Halinde Depolama	64
4.2. Basıncılı Gaz Halinde Depolama	65
4.3. Metal Hidritlerde Depolama	65
4.4. Nanotüplerde Depolama	68
4.5. Dağıtım Sisteminde Depolama	69
4.6. Alanatlarda Depolama	69



4.7. Alkali Metal Hidrürlerde Depolama	70
4.8. Metanol Olarak Depolama	70
4.9. Amonyak Olarak Depolama	70
4.10. Hidrojenin Taşınması	71
5. HİDROJEN TAŞIYICISI OLARAK BOR	72
5.1. Bor Madeni	72
5.2. Dünya Bor Rezervi Dağılımı	75
5.3. Türkiye Bor Rezervi Dağılımı	76
5.4. Enerji Hammaddesi Olarak Bor	78
5.4.1. Sodyum Bor Hidrür	79
5.4.2. Kullanım Alanları	80
5.4.3. Sodyum Bor Hidrürün Yakıt Hücresinde Kullanılması	80
6. YAKIT HÜCRESİ	82
6.1. Yakıt Hücresi Çeşitleri	82
6.1.1. Proton Geçirgen Membranlı Yakıt Hücresi (PEMYH)	86
6.1.2. Fosforik Asit Yakıt Hücresi (FAYH)	89
6.1.3. Alkali Yakıt Hücresi (AYH)	90
6.1.4. Ergimiş Karbonat Yakıt Hücresi (EKYH)	92
6.1.5. Katı Oksit Yakıt Hücresi (KOYH)	93
6.1.6. Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Hücresi (DMYH)	95
6.2. Yakıt Hücresi Sistemi	96
6.3. Taşıtlarda Yakıt Hücresi Kullanımı	98
6.4. Hidrojen ve Yakıt Hücresi Maliyeti	100
7. HİDROJEN ENERJİSİNİN DÜNYA'DAKİ GELİŞİMİ	102
8. TÜRKİYE VE GÜNEŞ ENERJİSİ	106
8.1 Güneş-Hidrojen Enerjisi Maliyetleri	107
8.2 Güneş-Hidrojen Sistemi Uygulaması	109
9. SONUÇ	112
KAYNAKLAR	114
ÖZGEÇMİŞ	122

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Direkt Toplayıcı Sistem	8
2.2. Trombe Wall Sistemi	8
2.3. Fotovoltaik Sitem	11
2.4. Parabolik Oluk Sistemi	13
2.5. Parabolik Oluk Sistemi	13
2.6. Parabolik Çanak Sistemi	14
2.7. Parabolik Çanak Sistemi	14
2.8. Merkezi Kule Sistemi	15
2.9. Merkezi Kule Sistemi	15
2.10. Darrieus tipi, dikey eksenli rüzgâr türbini	17
2.11. Yatay eksenli, iki kanatlı rüzgâr türbini	17
3.1. Metanın Buhar Dönüşümü ile Hidrojen Üretimi	33
3.2. p-tipi foto katot, metal anot içeren fotoelektrokimyasal su ayrıştırma sistemi	39
3.3. Foto-elektrokimyasal Pilin Yapısı	39
3.4. Parabolik Çanak Şeklindeki Solar Yoğunlaştırıcı	41
3.5. Solar Yoğunlaştırıcı Sistem	49
3.6. Avrupa için 2005 yılı rüzgar hidrojen sistemi yatırım değerleri	52
3.7. Roket Yakıt Sistemi	55
3.8. Hidrojenin katalitik yanması	58
5.1. Bor'un Kristal Yapısı	73
5.2. Türkiye Bor Madenleri	77
5.3. Boraks'ın Mineral Şekli	77
6.1. Yakıt Hücresi Şematik Diyagramı	84
6.2. PEM Yakıt Hücresi Çalışma Prensibi	87
6.3. PEM Yakıt Hücresi	88
6.4. FAYH Kesit Katot Görünüşü	90
6.5. AYH Çalışma Prensibi	91
6.6. EKYH Çalışma Prensibi	93
6.7. Katı Oksit Yakıt Hücresi	94
6.8. KOYH Çalışma Prensibi	95



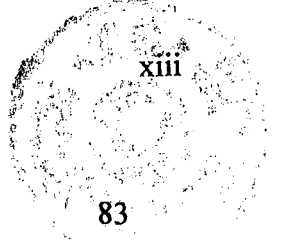
6.8. Yakıt Hücresi Birimleri	97
6.9. Farklı tip yakıt hücrelerinin çalışma prensibi	98
6.10. Toyota Yakıt Hücresi Sistemi	99
7.1. Siemens Yakıt Hücreli Kojenerasyon Sistemi	103
7.2. Mercedes-Chrysler Hidrojenle Çalışan Toplu Taşıma Aracı	105
8.1. Hyundai Tucson Hydrogen Car	111



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo

2.1. Dünyada 1995-2004 arası Petrol Tüketimi	5
2.2. Dünyada 20 Ülkeye Göre Doğal Gaz Kaynakları	6
2.3. Rüzgar Türbinlerinin Genel Kapasite, Rotor Çapı ve Direk Yüksekliği Değerleri	17
2.4. Dünyada Jeotermal Enerji	19
2.5. Dünyada Hidroelektrik Santrallerde Elektrik Üretimi	21
2.6. Dünya'daki Çalışmakta Olan ve Yapım Aşamasındaki Nükleer Güç Reaktörleri	23
2.7. U.S.A'da Yıllara Göre Toplam Nükleer Enerji Üretimi	24
2.8. Türkiye'de Elektrik Enerjisi Kurulu Güç ve Üretim Değerleri	26
2.9. Türkiye'de Elektrik Enerjisi Brüt Tüketim Değerleri	26
2.10. Türkiye'de Enerji Üretim ve Tüketimi	27
3.1. Hidrojen Üretiminde Kullanılan Bazı Mikro-organizmalar	36
3.2. Enerji sistemlerinde kirletici miktar karşılaştırması	37
3.3. Fotoelektro Kimyasal Su Ayrıştırma Yöntemlerinin Limit ve Potansiyel Analizi	40
3.4. Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemi Boyut ve Maliyetleri	50
3.5. Farklı boyutlardaki Rüzgar-Hidrojen sistemlerinin ortalama maliyetleri	52
3.6. Hidrojen ve bazı yakıtların güvenlikle ilgili özellikleri	60
3.7. Bazı yakıtların güvenlik sıralaması	61
3.8. Hidrojen üretim ve depolama toplam maliyetleri	62
3.9. Hidrojenin genel özellikleri	63
4.1. Bazı Hidrojen Depolama Sistemleri İçin Enerji ve Maliyet Verileri	67
4.2. Hidrojenin Metal, Karbon ve Grafit İçinde Depolanması	68
5.1. Bor elementinin fiziksel özellikleri	74
5.2. Ticari önemi olan bor mineralleri	75
5.3. Dünya Bor Rezervi Dağılımı	76
5.4. Dünya Ekonomik Bölgeleri Bor Tüketim Alanları (1000 Ton B ₂ O ₃)	76
5.5. Türkiye'deki Bor Cevheri Üretim Kapasitesi	78



6.1. Yakıt Hücrelerinin Elde Edilen Güce ve Kullanım Alanlarına Göre Sınıflandırılması	83
6.2. Yakıt Hücrelerinin çalışma sıcaklığı ve elektrolite göre sınıflandırılması	96
6.3. Toyota ve Ford yakıt hücresi otomobillerinin karşılaştırılması	99
6.4. Yakıt Hücresi Maliyetleri	101
8.1. Türkiye’de Aylara Göre Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Güneşlenme Süreleri	106
8.2. Türkiye’nin Yıllık Güneş Enerjisi Potansiyelinin Bölgelere Göre Dağılımı	107



1. GİRİŞ

Enerji ve teknoloji bir toplumun gelişiminde büyük rol oynayan, birbirine bağımlı iki etkidir. Günümüzde gelişen teknolojiyle beraber enerjiye olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu ihtiyaç, fosil kaynaklar, nükleer enerji ve hidrolik enerji ile karşılanmaktadır. Bu enerji kaynaklarının dünyada kullanım yüzdelerine bakılacak olursa %86 payla fosil yakıtların en çok kullanıldığını görmekteyiz. Fosil yakıtların kullanımıyla ortaya çıkan CO_x , NO_x , SO_x , C_xH_x , kül, kurum, katran gibi kirletici emisyonlar dünya çevre sağlığına giderek daha fazla zarar vermektedir. Bunların başlıca sonuçları, asit yağmurları, ozon tabakasının delinmesi, sera etkisiyle iklim değişikliği olarak sıralanabilir. Bu olumsuz etkilerden kurtulmak için fosil yakıtlara alternatif enerjiler araştırılmaya başlanmıştır. Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi ve hidrojen enerjisi bunların başlıcalarıdır.

Yapılan araştırmalar sonucunda hidrojen enerjisi, çevre kirliliği yaratmaması ve enerjide üç temel uygulama olarak sıralanan ısı üretimi, kinetik enerji ve elektrik üretimi alanlarının hepsinde kullanılabilmesi açısından gelecek vaad eden bir yakıt olarak görülmektedir. Alternatif enerji kaynaklarının kullanımıyla sudan hidrojen eldesi yöntemi de hidrojenin hem temiz hem de tükenmez bir enerji hammaddesi olarak kabul edilmesini sağlamaktadır.

Enerjinin çevre dostu olmasının yanı sıra etkin ve verimli kullanılması da dikkat edilmesi gereken unsurlardan biridir. Maliyet analizlerine çevreye verdiği zararları da katacak olursak hidrojenin fosil yakıtlara kıyasla daha ucuz bir enerji hammaddesi olduğunu görürüz. Hidrojen üretim ve depolama yöntemlerinin maliyetlerinin yapılan çalışmalar ve teknolojik gelişmelerle daha ucuz hale getirilmesi de gelecekte hidrojenin yaygınlaşmasını hızlandıracaktır.

Türkiye kullandığı enerjinin büyük bir kısmını ithal eden bir ülkedir. Bu durum ülkeyi ekonomik açıdan dışarıya bağımlı kılmaktadır. Bir ülkenin en önemli enerji politikalarının başında yerli enerji kaynaklarının kullanımı gelmektedir. Ayrıca kullanılan enerjinin çeşitliliği de önemli bir enerji politikasıdır.

Bu çalışmada geleceğin enerjisi olan hidrojen enerjisi teknolojisi, gelişimi ve genel olarak dünya ve özel olarak Türkiye için uygulama alanları araştırılmıştır.

Bölüm 2’de klasik enerji kaynakları üzerinde durulmuş ve başlıca enerji kaynakları anlatılmıştır. Türkiye’de enerjinin durumu ve enerji sorunlarının çözümünde hidrojenin öneminin altı çizilmiştir. Bölüm 3’te hidrojen enerjisinin tarihsel gelişimi anlatılmış, hidrojen üretim metodları üzerinde durulmuştur. Ayrıca hidrojenin kullanım alanlarına değinilmiş ve yakıt olarak özellikleri incelenmiştir. Bölüm 4’te hidrojen depolama yöntemleri anlatılmıştır. Bölüm 5’te ise bor madeninin uygulama alanları, Dünya’daki ve Türkiye’deki bor rezervi dağılımı, enerji hammaddesi olarak bor kullanımı, sodyum bor hidrürün hidrojen uygulamalarında kullanımı konularına değinilmiştir. Bölüm 6’da yakıt hücresi çeşitleri incelenmiş, taşıtlarda yakıt hücresi kullanımı anlatılmıştır. Bölüm 7’de hidrojen enerjisinin Dünya’daki gelişimi anlatılmıştır. Bölüm 8’de ise Türkiye’deki güneş enerjisi potansiyeli incelenmiş, bir fotovoltaiik güneş hidrojen üretim sistemi kurulum maliyet analizi yapılmış ve fosil yakıt kullanım maliyetiyle karşılaştırılmıştır. Bölüm 9 ise sonuç bölümüdür.

2. ENERJİ KAYNAKLARI

Günümüzde enerji talebinin, büyük çoğunluğu fosil yakıtlar olmak üzere, çeşitli enerji kaynakları tarafından karşılandığını görmekteyiz. Gelişen teknoloji ve yapılan çalışmalar sayesinde kullanılan enerji çeşidi giderek artış göstermektedir. Bu bölümde günümüzde kullanılan enerji kaynaklarına değinilecektir.

2.1. Fosil Kökenli Enerji Kaynakları

Fosil kaynaklar, birincil enerji tüketimi içinde %86'lık bir paya sahiptir. Bir başka deyişle dünyada mevcut enerji talebinin %86'sı fosil yakıtlar tarafından karşılanmaktadır. Bu talebin %42'sini petrol, %22'sini doğalgaz ve %22'sini kömür oluşturmaktadır. Geri kalan %14'lük bölümün %8'i yenilenebilir enerji kaynakları ve %6'sı ise nükleer enerji tarafından karşılanmaktadır. Amerikan Jeoloji Dairesi'nin 2000 yılında hazırladığı rapora göre dünyada keşfedilmemiş 649 milyar varil petrol ve 207 milyar varili sıvı olmak üzere 985 milyar varil petrol eşdeğeri doğalgaz bulunmaktadır. BP'nin yapmış olduğu petrol ve doğalgaz istatistik çalışmasına göre dünyada 1188,6 milyon varil petrol ve 179,53 trilyon varil doğalgazın bulunduğu belirtilmiştir. Dünyadaki petrolün %20'si ve doğalgazın %7'si 2000 yılına kadar üretilmiştir. Mevcut rezervler göz önüne alındığında dünyada petrolün ömrü 75, doğalgazın ömrü ise 150 yıldır. Teknolojinin gelişimi ile birlikte yapılan tahminler, fosil yakıtlara olan talebin 2020 yılında %88'lere kadar ulaşacağını öngörmektedir [www.asif.co.sr, 2005], [BP-Statistical Review of World Energy Report-2005]

Yine 2000 yılı verileri ele alındığında Türkiye'de enerji tüketiminde petrol %44'lik bir payla başta bulunmaktadır. Daha sonra %26 ile kömür ve %18 ile doğalgaz gelmektedir. Türkiye'deki enerji tüketiminin %12'si ise diğer kaynaklardan karşılanmaktadır. Türkiye'deki fosil enerji kaynakları rezervi sınırlıdır ve tüketimi karşılayabilecek düzeyde değildir [www.asif.co.sr, 2005], [Veziroglu, T.N. and Barbir, F., 1998].

Fosil yakıtlar, araçlarda (petrol ürünleri), konut ısıtmasında, endüstri sektöründe ve elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Benzin, dizel yakıt ve jet yakıtı gibi petrol ürünleri ulaşım sektöründe kullanılmaktadır. Bölge ısıtması, evsel ısıtma

ve sıcak su eldesi, buhar üretimi ve endüstride direkt ısıtma veya kurutma prosesleri için fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Fosil yakıtların üç hali de (katı, sıvı, gaz) bu alanlarda kullanılabilir [Veziroglu, T.N. and Barbir, F., 1998].

Katı, sıvı ve gaz halinde bulunan hidrokarbonlar genel olarak petrol olarak adlandırılmaktadır. Sıvı haldeki hidrokarbonlara ham petrol, gaz haldeki hidrokarbonlara doğalgaz, katı haldekilere ise bileşimine göre bitüm veya asfalt-parafin denmektedir [www.asif.co.sr, 2005].

Tarihteki ilk petrol üretme teşebbüsleri Bakü Hanı tarafından 1770 yılında gerçekleştirilmiştir. Bu teşebbüs pek verimli olmasa da 1871 yılına kadar aynı yöntemle petrol üretimi devam ettirilmiştir. 1872 yılından sonra daha modern sistemlerle petrol üretimi verimli hale getirilmiştir. Petrol arama maliyeti yüksek ve riskli bir eylemdir. Jeolojik araştırmalar ve açılan derin sondajlar sonucunda petrole ulaşılma yüzdesi %10'lardadır. Bulunan petrolün, özelliklerine uygun teknolojilerle üretilmesi gerekmektedir [www.asif.co.sr, 2005].

Dünyadaki petrol rezervlerinin yaklaşık %35'i Avrupa, eski SSCB, Kuzey ve Orta Amerika ve Afrika'da bulunmaktadır. Geri kalan kısmı ise Orta Doğu ülkelerinde bulunmaktadır [www.asif.co.sr, 2005].

Tahminlere göre, doğalgaz dünya üzerindeki tüm petrol ve kömürden daha fazladır. Yapılan araştırmalarda doğalgaz kömür ve petrolden sonra üçüncü sırayı alsa da dünya litosferi içindeki ve gaz hidritlerde saklı olarak bulunan metan da bu hesabın içine katıldığında doğalgazın fazla olması tahmini güçlenmektedir. Fakat 21. Yüzyıl enerji üretim tahminleri doğalgaz üretiminin petrol ve kömürden daha düşük olacağını göstermektedir [www.asif.co.sr, 2005].

Tablo 2,1'de de görüldüğü gibi dünyada petrol tüketimi giderek artış göstermektedir. En çok petrol tüketilen yerler sırasıyla Kuzey Amerika, Asya Pasifik ve Avrupa ve Asya'dır. BP'nin yaptığı istatistiksel araştırmaya göre 2004 yılında 3767,1 milyon ton petrol tüketilmiştir.

Tablo 2.1. Dünyada 1995-2004 arası Petrol Tüketimi [BP-Statistical Review of World Energy Report-2005]

Milyon ton	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
K. Amerika	960,8	994,3	1012,3	1033,3	1058,4	1071,4	1071,6	1071,1	1091,8	1122,4
G&O. Amerika	193,7	201,8	212,7	219,6	218,9	218,1	221,8	218,8	213,7	221,7
Avrupa ve Avrasya	939,1	930,9	936,1	942,7	937,9	929,5	934,6	931,4	940,8	957,3
Orta Doğu	199,3	204,8	208,7	210,6	214,5	220	223,8	233,6	238,4	250,9
Afrika	103,7	106,2	109,2	113,0	115,8	116,5	116,4	117,5	120,2	124,3
Asya Pasifik	854,5	891,3	926,6	906,6	948,3	983,2	984,2	1008,2	1036,8	1090,5
Dünya Toplam	3251,0	3329,4	3405,5	3425,9	3493,9	3538,7	3552,2	3580,5	3641,8	3767,1

Tablo 2.2’de doğalgaz kaynaklarının 20 ülkeye göre dağılımı bulunmaktadır. BP’nin yapmış olduğu istatistiksel çalışmaya göre dünyadaki toplam doğalgaz rezervi 179,53 trilyon m³’tür. Doğalgaz rezervinin en çok olduğu 3 ülke sırasıyla %26,72’lik payla Rusya, %15,31’lik payla İran ve %14,36’lık payla Katar’dır.



Tablo 2.2. Dünyada 20 Ülkeye Göre Doğal Gaz Kaynakları [BP-Statistical Review of World Energy Report-2005]

Ülkeler	Rezervler (Trillion Cubic metres)	Toplam %
Toplam Dünya	179,53	100
20 Ülkenin Toplamı	152,39	84,89
Rusya	48,00	26,72
İran	27,50	15,31
Katar	25,78	14,36
Arabistan	6,75	3,76
ABD	5,29	2,95
Nijerya	5,00	2,78
Cezayir	4,55	2,54
Venezüella	4,22	2,35
Irak	3,17	1,76
Kazakistan	3,00	1,67
Türkmenistan	2,90	1,61
Endonezya	2,56	1,42
Avustralya	2,46	1,37
Malezya	2,46	1,37
Çin	2,23	1,24
Özbekistan	1,86	1,03
Kanada	1,60	0,90
Kuveyt	1,57	0,88
Hollanda	1,49	0,87
Diğerleri	27,14	15,11

2.2. Güneş Enerjisi

Tüm yenilenebilir enerjiler ve hatta fosil yakıtlar enerjilerini güneşten almaktadır (dalga enerjisi ve jeotermal enerji hariç) [Akgün N., 2004]. Güneş enerjisi yenilenebilir bir enerji olmasının yanı sıra temiz bir enerjidir. Ayrıca yerel kullanıma uygunluk ve ileri teknoloji gerektirmemesi açısından günümüzde güneş enerjisi uygulamalarına ağırlık verilmektedir. Binalarda ısıtma-soğutmada, endüstride, bitkilerin kurutulmasında ve elektrik üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.



Güneşin ışınlam enerjisi, yer ve atmosfer sistemindeki fiziksel oluşumları etkileyen başlıca enerji kaynağıdır. Dünyadan ortalama $1,496 \times 10^8$ km uzaklıkta, $1,392 \times 10^6$ km çapında ve $1,99 \times 10^{30}$ kg kütleğinde sıcak bir gaz küresi olan güneşin yüzey sıcaklığı yaklaşık 6.000 K olup, iç bölgesindeki sıcaklığın 8×10^6 K ile 40×10^6 K arasında değiştiği tahmin edilmektedir [www.koeri.boun.edu.tr, 2005].

Sürekli bir füzyon reaktörü olan güneşin enerji kaynağı, hidrojenin helyuma dönüşmesi esnasında, saniyede 4 milyon ton kütle enerjiye dönüşerek, yaklaşık saniyede $3,5 \times 10^{26}$ Joule değerindeki enerjinin ışınlam şeklinde uzaya yayılmasıdır. Güneş daha milyonlarca yıl ışınlamını sürdüreceğinden, dünyamız için sonsuz bir enerji kaynağıdır. Güneşten gelen güç insanlığın yıllık ticari gereksiniminin 16.000 katından çoktur. Dünyadaki tüm elektrik santrallerinin toplam gücü; güneşten gelen gücün 61.000'de birinden azdır. Güneşten gelen güç dünyadaki tüm nükleer santrallerin ürettiği toplam gücün 527.000 katıdır [www.koeri.boun.edu.tr, 2005].

Güneş enerjisi dünya üzerinde geniş bir alanda etkin olarak kullanılabilir düzeydedir. Türkiye de bu güneş kuşağı içinde yer almaktadır. Günümüzde güneş enerjisi kullanımı azdır. Fakat gelecekte bu kullanımın oldukça artacağı öngörülmektedir [www.koeri.boun.edu.tr, 2005].

Güneş enerjisinden faydalanma amaçlı farklı sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemlerin başlıcaları termodinamik sistemler ve fotovoltaik sistemlerdir [www.koeri.boun.edu.tr, 2005].

2.2.1. Termodinamik Sistemler

Bu sistemler kendi aralarında iki grupta toplanır:

2.2.1.1. Pasif Güneş Sistemleri

Pasif güneş sistemleri, Güneş enerjisi kullanımı için geliştirilen en eski sistemlerdir. Pasif güneş sistemlerinin ana yöntemi güneş enerjisinin ısıtmada kullanılmak üzere binalara uygulanmasıdır. Binaların ısıtma-soğutmasında, seraların ısıtılmasında ve bitkilerin kurutulmasında bu teknoloji kullanılmaktadır [www.koeri.boun.edu.tr, 2005][Shtrakov S. and Stoilov A., 2004]

Direkt toplayıcı, en basit pasif dizayn tekniğidir. Bu sistemde genellikle binanın güney cephesi saydam ya da yarı saydam camla kaplanır. Güneş ışığı şekilde görülen toplayıcı boşlukta toplanır ve evin içine girer. Taş döşemeler ve duvar yüzeyleri, koyu renklerin daha fazla ısı absorblama özelliklerinden dolayı, koyu renge boyanır. Gece oda soğuduğunda, termal kütlede depolanmış ısı odaya yayılır [www.eren.doe.gov,2001][www.nrel.gov, 2001].

Sekil 2.2. Trombe Wall Sistemi [Shtrakov S. and Stoilov A., 2004]

Dolaylı pasif güneş sistemlerinin ana kavramı Trombe-Michel duvarıdır. Trombe wall'ın ayrıntılı performansları üzerine yazılmış birçok deneysel ve teorik bilgi bulunmaktadır. Ayrıntılı bina performansı özel bina dizaynları için ve duvar örnekleri için mevsimsel ısı kazanımı hesaplarına dayanan, iklimsel limitler için hesaplanmış performansları içerir [Shtrakov S. and Stoilov A., 2004].

Şekil 2.2'de Trombe Wall sistemi gösterilmektedir. Yaz aylarında, gün boyu şekilde görülen delikler kapalı tutulur ve hava sirkülasyonu önlenir. Gece delikler açıldığında gün boyu ısınmış hava, doğal havalandırmayla odanın içine uygulanmış olur [Shtrakov S. and Stoilov A., 2005].

Güneş uzayı (boşluğu): Bu sistem direk toplayan ve Trombe wall sistemlerinin bir kombinasyonu gibidir. Pencere ile güney yönündeki duvar arasında bir sera oluşturulmuş şeklidir [www.koeri.boun.edu.tr, 2005].

2.2.1.2. Aktif Güneş Sistemleri

Güneş toplayıcıları aktif güneş sistemlerine bir örnektir. Bu sistemler ısıtma, soğutma ve elektrik enerjisi elde etme amaçlı kullanılabilir. Aktif termal sistemler, stationary (sabit) veya sun-tracking (güneş izleme) sistemler olabilir [www.koeri.boun.edu.tr, 2005].

Aktif solar ısıtma bir çok bina için güneş enerjisinin uygulanabildiği birincil yollardan biridir. Aktif solar ısıtma uygulamalarında güneşin ısısı toplanır, depolanır ve birincil olarak evsel sıcak su ısıtmasında kullanılır. Sisteme aktif denmesinin sebebi, tutulmuş ısının, depolanacağı veya kullanılacağı yere pompalar ve fanlar kullanılarak iletilmesidir. Aktif solar sistemin ana bileşenleri; kolektörler, kolektör control birimleri, ısı depolama sistemleri ve dağıtıcı sistemdir [www.uaf.edu, 2005].

Termal stationary sistemler: Bu sistemlerde güneş enerjisi sabit bir kolektör ile toplanır, daha sonra ısıya dönüştürülerek bir akışkana transfer edilir. Bunlar kolektör tiplerine göre sınıflandırılır [www.koeri.boun.edu.tr, 2005].

- flat-plate kolektör ; (Düz plakalı kolektörler)

Bunlar aşağıdaki amaçlarla kullanılırlar:

Düşük sıcaklıklarda su ısıtılması

Binaların ısıtılması ve soğutulması

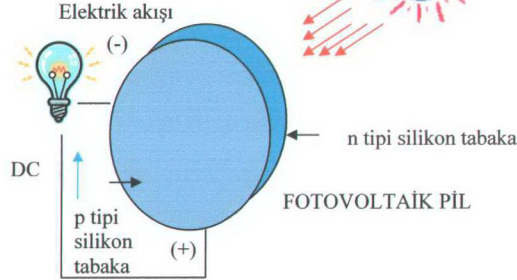
Organik maddelerin kurutulması

- tubular kolektör (boru şeklindeki kolektörler)
- concentrating(toplayıcı) kolektör
- solar ponds (güneş havuzları) [www.koeri.boun.edu.tr, 2005].

2.2.2.Fotovoltaik Sistemler

Güneş pilleri (fotovoltaik piller), yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken maddelerdir. Güneş pilleri fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışırlar, yani üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. Pilin verdiği elektrik enerjisinin kaynağı, yüzeyine gelen güneş enerjisidir. Güneş enerjisi, güneş pilinin yapısına bağlı olarak % 5 ile % 20 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilir [www.eie.gov.tr, 2004].

Yarı-iletken özellik gösteren birçok madde arasında güneş pili yapmak için en elverişli olanlar, silisyum, galyum arsenit, kadmiyum tellür gibi maddelerdir. Bu maddeler üzerine gelen güneş ışınları anında elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılır. Bu sistemlerde güneş izleme düzeni ile her an mümkün olan en yüksek güneş enerjisinden yararlanılır. Güneş izleme düzeni pahalı olduğundan bu tip toplayıcılardan, izleme düzeni olmadan da yararlanılmaktadır. Yapay uyduların elektrik enerjisi fotovoltaik toplayıcılardan sağlanmaktadır. Fotovoltaik toplayıcıların maliyetleri gelişen teknolojiyle giderek azalmaktadır. Uydularda fotovoltaik toplayıcılar kullanılmakta ve radyo vs. gibi ev aletlerini çalıştırmaktadır. [www.koeri.boun.edu.tr, 2005].



Şekil 2.3. Fotovoltaik Sistem

Tipik silikon fotovoltaik piller, n tipi olarak adlandırılan fosfor destekli silikon ve p tipi olarak adlandırılan bor destekli (alüminyum ya da indiyum da kullanılmaktadır) silikon içeren plakaların birleşiminden meydana gelir. n tipi plakalardaki (-) yük sağlayan elektron fazlalığı ve p tipi plakalardaki (+) yük sağlayan elektron azlığı bu bölgenin iki tarafında da bir elektrik alanının oluşmasını sağlar. Yarıiletkeni çarpan ışık fotonları, yarıiletkenin her iki tarafında da elektron delik çiftlerinin oluşmasını sağlar.

Fotovoltaik pil yapımında genellikle çok kristalli ya da amorf silisyum kullanılır. Çok kristalli silisyum, yüksek verimi ve güvenilirliği nedeniyle daha çok tercih edilmektedir. Amorf silisyum ise düşük maliyeti nedeniyle kullanılmaktadır [Bilim ve Teknik(Sayı:432), 2003]

2.2.3. Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemleri

Bu sistemler, güneş enerjisini yüksek sıcaklıkta ısıya dönüştürmek için farklı ayna/yansıtıcı düzenekler kullanır. Elde edilen ısıdan, daha sonra direkt olarak ya da dönüştürülerek elektrik enerjisi elde edilir. Yoğunlaştırılmış solar enerji sistemlerinin ana bileşenleri;

Solar Yoğunlaştırıcı Alan; Esas olarak solar ışımayı toplayıp solar alıcıya odaklayan aynalar ve yansıtıcılar düzeneğidir. Alan olarak genellikle aynanın kapladığı alan değil, yüzey alanı hesaplanır. Solar Alıcı: Solar alıcı, sistemde, solar ışımayı ısıya dönüştüren parçadır. Bazen bu alıcı solar toplayıcıya sabitlenmiş şekildedir. Isı transferi için genellikle su ya da yağ kullanılır. Bu akışkan, solar alıcının içinden geçerek ısıyı enerji dönüştürme sistemine taşır. Enerji Dönüştürme Sistemi: Bu sistem, ısıyı elektrik ya da ısı enerjisine dönüştürerek kullanılabilir forma sokmak için kullanılır [European Research, 2004].

Yoğunlaştırılmış solar enerji sistemi için 3 farklı biçim bulunmaktadır. Bunlar Parabolik Oluk, Parabolik Çanak ve Merkezi Kule sistemidir. Dördüncü olarak merkezi kule ve parabolik çanağın hibrit kullanımı olan solar fırınlar sayılabilir. Bu sistemler odaklanma alanına bağlı olarak farklı sıcaklıklar elde edip ısıyı yoğunlaştırarak çeşitli uygulamalar için kullanılabilir. Parabolik oluk içinde odak, oluk kolektörün odaklanmış eksenidir. Parabolik çanakta odaklanma alanı, birkaç yüz cm^2 olan çanak alanına ve çanak yarıçapına bağlıdır. Merkezi kulede ise odaklanma alanı daha geniştir.

Solar güneşlenmenin dünya yüzeyine gelen ortalama güneş enerjisi miktarı 1kW/m^2 'dir. Bu, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemi kullanılarak birkaç bin kez yoğunlaştırılabilir. Termal enerjiye dönüşüm verimi, optik verim ve ısı dönüşüm veriminin birleşimine bağlıdır. %98'lik optik verimleri, %70-95 değerleri arasında ısı dönüşüm verimlerine ulaşılmasını sağlar.

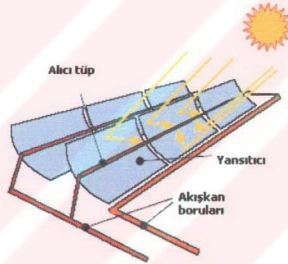
Elektrik üreten yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemlerinde, ısı, daha sonra direkt olarak elektrik üretme amaçlı buhar üretimi için kullanılabilir. Bu sistemin solar elektrik dönüşüm verimi, ısınımın termal verimi ve buhar dönüşüm veriminin birleşiminden oluşur. Deneysel kurulumlar, parabolik çanak sisteminin %29'luk verime ulaştığını göstermiştir. Bu verim, kullanılan sisteme bağlıdır. Parabolik oluk sisteminde de bu verim yüzdesine ulaşılmıştır [European Research, 2004].

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri, bu enerjinin direkt suya iletilmesiyle hidrojen ya da metal üretimi gibi kimyasal proseslerde kullanılabilir. Günümüz laboratuvar deneyleri, kimyasal dönüşüm değerlerinin %100'e yakın

olduğunu göstermiştir. Ancak günümüz sistem dizayn sınırlamaları nedeniyle bu verim %50 civarındadır. Gelişen teknolojiyle bu verimin artması beklenmektedir.

2.2.3.1. Parabolik Oluk

Parabolik oluk, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sisteminin en basit formudur. Oluk şeklinde sıralanmış solar toplayıcılardan oluşan alanda, toplayıcılar genellikle merkezinde sabit alıcı bir tüp bulunan aynalardan meydana gelir. Bu sıra 150 m uzunluğundadır. Kolektörler genellikle birçok paralel dizinin birleşimiyle kurulur. Kolektörler, gün içinde maksimum güneş ışığına odaklanmış güneş izleme kontrol sistemi düzeneğiyle tek bir motora bağlıdır. Solar alıcı, ısı taşıyan su ya da yağ akışkanın içinden geçtiği siyah kaplanmış cam tüpten oluşmaktadır. Yoğunlaştırılmış güneş ışığı, elektrik üretmek için türbine gönderilen ısı taşıyıcı akışkanı 400°C 'nin üstündeki sıcaklıklara kadar ısıtır.



Şekil 2.4. Parabolik Oluk Sistemi



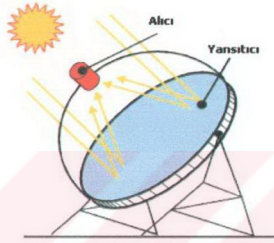
Şekil 2.5. Parabolik Oluk Sistemi

2.2.3.2. Parabolik Çanak

Parabolik çanak sistemi ya da solar çanak, çanağın üzerinde bulunan odak noktasına aynalardan yansıtılan solar ışımayı toplayan bir tasarımdır. Çanaklar ortalama 8-10 m çapındadır. Çapları bazen daha büyük olabilmektedir. Örneğin

dünyanın en büyük çanağı Avustralya'daki “Big Dish” adı verilmiş 400m^2 'lik çanaktır. Big Dish, üzerinde 54 tane üçgen aynanın yan yana bulunduğu bir yüzeye sahiptir ve 500°C sıcaklığında buhar üretir.

Solar çanaklar üzerinde genellikle elektrik üretimi için geliştirilmek üzere çalışılmaktadır. Parabolik çanak sistemleri diğer solar termal sistemlerin %20'lik verimleriyle karşılaştırılacak olursa %29'un üzerindeki değeriyle en verimli solar teknolojidir.



Şekil 2.6. Parabolik Çanak Sistemi



Şekil 2.7. Parabolik Çanak Sistemi

2.2.3.3. Merkezi Kule Sistemi

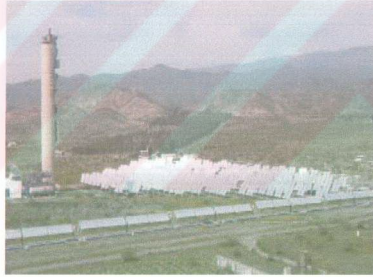
Merkezi kule sistemi, heliostat denen geniş güneş izlemeli düz yüzeyli yüzlerce aynanın toplandığı güneş toplayıcı bölgeler olarak tasarlanmıştır. Bu heliostatlar, gün içerisinde güneş ışığını solar alıcıya yansıtır. Solar alıcı birkaç m^2 'lik bir alandır ve 50-100 m'lik yükseklikteki bir kule üzerindedir. Bu sistemler 550°C gibi yüksek bir sıcaklıktaki solar alıcıya sentetik yağ veya eriyik tuzun gönderilip ısıtılmış akışkanın buhar oluşturması ile çalışır. Daha sonra bu buhardan elektrik üretilebilir [European Research, 2004].

İspanya'daki Platforma de Almeria'da kurulmuş olan CESA-1 test düzeneği bu sistemin Avrupa'daki tek örneğidir. Bu düzenek, her birinde 300 heliostat bulunan 16 sıradan oluşmuş, kuzeye bakan, toplam 11.880 m²'lik alana sahip ve 80m'lik beton kuleden oluşmuş bir düzendir. Her bir heliostat 12 mekanik kavisli cam ayna yüzden yapılmıştır.

Bu kurulum, merkezi kule sistemlerinin ve bileşenlerinin uygulanabilirliğini kanıtlamak için gerçekleştirilmiştir. Bu sistemde elektrik üretilmemektedir fakat yüksek sıcaklıkta metan üretimi ve uzay araçlarındaki termal koruma kalkını sisteminin testleri için kullanılmaktadır [European Research, 2004].



Şekil 2.8. Merkezi Kule Sistemi



Şekil 2.9. Merkezi Kule Sistemi

2.3. Rüzgâr Enerjisi

Rüzgar, güneşin yeryüzünü ve atmosferi homojen ısıtmamasından doğan basınç ve sıcaklık farkları nedeniyle oluşur [Tezcan, E., 2000]. Bu farklardan ortaya çıkan kuvvetlerin etkisi ile oluşan yatay hava hareketi rüzgârdır. İfadeyen de anlaşılacağı gibi rüzgar enerjisinin kaynağı da güneştir [Şahin A.D., 2001]. Güneşten, dünyaya her saat $1,74423 \times 10^{14}$ kWh enerji gelir. Bir başka ifadeyle, dünya

güneşten her saatte $1,74423 \times 10^{14}$ kW güç alır. Güneşten gelen bu enerjinin yaklaşık %1-2'lik kısmı rüzgâr enerjisine dönüştürülür. Bu enerji miktarı, dünyadaki tüm bitkiler biomas enerjisine dönüşmüş olsa dahi, ondan 50-100 kat daha fazladır. [www.meteor.gov.tr, 2005]

Rüzgâr, hızı, yönü ve esme sayısı gibi özellikleri ile etkisini gösteren bir iklim elemanıdır. Rüzgârın bu özellikleri yöresel farklılıklar gösterir. Bu nedenle rüzgârın özelliklerini incelerken basınç, sıcaklık ve nem gibi kavramların iyi incelenmesi gerekir. Rüzgâr hızı ve yoğunluğu kısa zamanda büyük değişikliklere uğrayabilen özelliklerdir. Bu yüzden meteorolojik olarak da tahmini zor bir faktördür. Matematiksel açıdan rüzgâr yön ve şiddet gibi özelliklere sahiptir. Şiddeti, karşımıza rüzgar hızı olarak çıkar [Şahin, A.D., 2001].

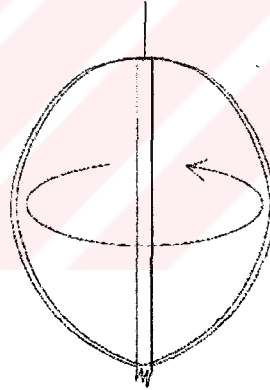
Rüzgâr türbinleri yatay eksenli ve dikey eksenli olarak ikiye ayrılır. Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin rotoru dikey eksen etrafında hareket eder. Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin günümüzde kullanılan çeşidi darrieus tipi türbinlerdir. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde ise rotor şaftı yatay eksen üzerindedir ve etkin yüzeyi rüzgâr hızına diktir. Her iki tip rüzgâr türbininin de avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri türbinin her yönündeki rüzgârı kullanır. Yatay eksenlide ise rüzgâr doğrultusuna göre doğrultu değiştiren açı düzeticiye gerek duyulmaktadır. Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin jeneratörleri yere yakın monte edilebilir. Yatay eksenlilerde ise yerle temasından dolayı oluşacak mekanik enerji kayıplarını engellemek amaçlı, jeneratörleri direğin tepesindeki rotor şaftına direkt bağlanır [Marthai, S.M., 2003].

Türbinde kullanılan kanat sayısı da türbinin enerji çıkışını etkileyen faktörlerden biridir. Tek ve iki kanatlı türbinlerin her ikisinde de rüzgâr kesmesi sonucu çabuk yıpranma söz konusudur. Her iki sistem de rotoru geri iten mekanizmaya sahiptir. Bu mekanizmada çeşitli hareketli şaft parçaları bulunmaktadır ve kurulumu ve tamiri zordur. Kanat sayısı tek olan rotorlar, çift kanatlı rotorlara göre daha verimlidir. Çünkü üç kanatlıların merkez etrafındaki dağılımı gücün daha eşit dağılmasını sağlar [Marthai, S.M., 2003].

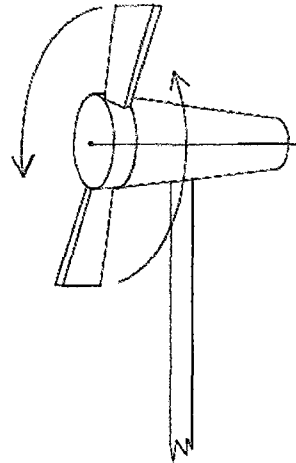
Tablo 2.3. Rüzgar Türbinlerinin Genel Kapasite, Rotor Çapı ve Direk Yüksekliği Değerleri [Marthai, S.M., 2003]

Kapasite (kW)	50	300	750	1000	2000	5000
Rotor Çapı (m)	15	34	48	60	72	112
Direk Yüksekliği (m)	25	40	60	70	80	100

Türkiye’de kurulu üç rüzgâr enerjisi istasyonu bulunmaktadır. Kurulu rüzgâr türbinlerinin toplam kapasitesi 19,1 MW_e’tır. Türkiye’deki ilk rüzgâr enerjisi tesisi Çeşme’de 1998’de kurulmuştur. Bu tesis toplam kapasitesi 1,7 MW olan üç rüzgâr türbininden oluşmaktadır. İkinci tesisin ise toplam kapasitesi 7,2 MW_e’tır ve 12 rüzgar türbininden oluşmaktadır. Üçüncüsü ise Haziran 2000’den beri çalışmakta olan 10,2 MW_e gücünde, 17 türbinden oluşan Bozcaada’daki kurulu güçtür [Çelik, A.N., 2003]



Şekil 2.10. Darrieus tipi, dikey eksenli rüzgâr türbini [Marthai, S.M., 2003]



Şekil 2.11. Yatay eksenli, iki kanatlı rüzgâr türbini [Marthai, S.M., 2003]

Kullanımı gittikçe artan rüzgâr enerjisinin tercih edilmesinin nedenleri arasında yenilenebilir ve çevre dostu olma özellikleri önde gelmektedir. Avantajları:

- Sera gazı meydana getirmemesi,
- Temiz bir enerji kaynağı olması,
- Tükenmez bir enerji kaynağı olması,
- Güvenilirliğinin ve ucuzluğunun giderek artması,
- Kurulan türbin arazisinin ikili kullanıma olanak sağlaması olarak

sıralanabilir.

Dezavantajları ise:

- Gürültü kirliliğine yol açabilmesi,
 - Zaman zaman kuşların yaralanma ve ölümlerine sebebiyet verebilmesi,
 - Televizyon ve iletişim sistem aygıtlarının çalışmalarına etki etmesidir
- [Şahin, A.D., 2004].

Rüzgâr gücü, yapılan araştırmalar sonucunda %34 ile son 5 yılın en çok gelişen enerji kaynakları arasında yer almaktadır. Avrupa'daki 2002 yılına ait toplam rüzgâr enerjisi kurulu gücü 23.291 MW'tır. Avrupa Rüzgâr Enerjisi Birliği bu rakamın 2010 yılında 40.000MW'a çıkmasını hedeflemektedir. Günümüzde Avrupa'da kullanılan rüzgâr enerjisi, 25 milyon insanın elektrik ihtiyacını karşılayabilecek düzeydedir [Şahin, A.D. 2004].

Günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte rüzgâr enerjisinin yüksek olan ilk kurulum maliyeti düşürülerek ekonomik açıdan diğer enerji kaynaklarıyla yarışır duruma gelmiştir. Ayrıca temiz bir enerji kaynağı olması rüzgâr enerjisi alanındaki çalışmaların artmasına yol açmaktadır [Şahin, A.D., 2004].

2.4. Jeotermal Enerji

İlk çağlardan bu yana sadece sağlık amaçlı kullanılan jeotermal kaynaklardan günümüzde ısıtmada ve diğer enerji türlerine dönüştürmede yararlanılmaktadır.

Hazne sıcaklığı 200°C'nin üstünde olan jeotermal kaynaklardan elektrik üretimi amaçlı yararlanılmaktadır. Bu sıcaklık günümüz teknolojisiyle 150°C'ye kadar düşmüştür. Ayrıca buharlaşma noktaları düşük gazlar (freon, izobütan v.b.) kullanılarak 60-90°C sıcaklıktaki kaynaklardan elektrik enerjisi elde etme çalışmaları devam etmektedir. Bu sistem ilk olarak 1904 yılında İtalya'da kurulmuştur. Başta

A.B.D. ve İtalya'da olmak üzere Japonya, Yeni Zelanda, El Salvador, Meksika, İrlanda, Filipinler, Endonezya, Türkiye gibi ülkelerde bu sistemden yararlanılmaktadır [www.asif.co.sr, 2004].

Düşük sıcaklıktaki jeotermal akışkandan (30-60°C) ısıtma amaçlı faydalanılmaktadır. Isı pompaları kullanılarak bu sıcaklığı 5°C'ye kadar düşürmek mümkündür [www.asif.co.sr, 2004].

Ayrıca seraların ısıtılmasıyla turfanda sebzeçilik, tropikal bitki ve balık yetiştirme, tavuk ve hayvan çiftliklerinin ısıtılmasında, toprak, cadde ve havaalanı pistlerinin ısıtılmasında, yüzme havuzu, fizik tedavi ve diğer turistik tesislerde jeotermal enerjiden yararlanılmaktadır. Jeotermal enerji yenilenebilir, ucuz, sürdürülebilir, güvenilebilir ve çevre dostu bir enerji türüdür [www.asif.co.sr, 2004].

Tablo 2.4. Dünyada Jeotermal Enerji [www.asif.co.sr, 2004]

Ülkeler	Elektrik(MWh)	Isı(MWh)	Elektrik(Btep/yıl)	Isı(Btep/yıl)	Toplam
ABD	2837	1776	3999	642	4641
Japonya	270	4764	381	1675	2056
Filipin	894	-	1260	-	1260
İtalya	548	631	772	240	1012
Meksika	700	-	987	-	987
İzlanda	45	1306	63	650	713
Macaristan	-	1580	-	630	630
BDT	-	1404	16	640	656
Yeni Zelanda	264	176	372	111	483
Fransa	4	676	6	266	272
Çin	25	395	35	216	251
Endonezya	143	-	202	-	202
El-Salvador	95	-	134	-	134
Türkiye	20	200	28	75	103
Romanya	1	273	1	95	96
TOPLAM	5989	13990	8443	5544	13987

Tablo 2.4'de jeotermal enerjinin kullanıldığı 15 ülke incelenmiştir. Bu incelemeye göre jeotermal enerjinin en çok kullanıldığı ülkeler arasında 4641

Btep/yıl'la A.B.D. birinci sırada gelmektedir. A.B.D.'yi 2056 Btep/yıl'lık tüketimle Japonya izlemektedir. Türkiye ise 103 Btep/yıl ile 14. sırada yer almaktadır.

2.5. Hidrolik Enerji

Hidrolik enerji, suyun potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye dönüştürülmesiyle elde edilen enerji türüdür. Hidrolik santraller tükenmeyen ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak sudan yararlanmamızı sağlamaktadır. Dünya elektrik üretiminin yaklaşık %23'ü hidrolik santrallerden yapılmaktadır. Yurdumuzda ise bu değer %15 civarındadır. Türkiye'deki hidrolik santraller 400 milyar kWh'lık bir enerji potansiyeline sahiptir [Atlas, N. ve ark., 1998], [Türkiye 5. Enerji Kongresi- Dünya Enerji Konseyi – Türk Milli Komitesi, 1990].

Hidrolik enerjide diğer enerji kaynaklarında görülen üretim sırasındaki verim kayıpları görülmemektedir [Doğanay, H., 1995].

Yurdumuzda kurulan ilk santral 1902 yılında Tarsus Çayı üzerinde kurulmuştur. Daha sonra 1929 yılında Trabzon'da kurulan Işıklar Köyü Santrali devreye girmiştir. 1950-1960 yıllarında hidrolik santral yapımına ağırlık verilmiş ve birçok santralin yapımına bu yıllarda başlanmıştır [Kepenek, Y., 1990].

Hidrolik santraller düzenli akışlı, eğimi uygun akarsuların bulunduğu yerlerde kurulmaktadır. Ülkemizdeki hidroelektrik potansiyelinin %78,5'ini oluşturan önemli havzalar sırasıyla Fırat, Dicle, Doğu Karadeniz, Çoruh, Kızılırmak, Seyhan ve Yeşilırmak'tır [Hiç, S., 1990].

Tablo 2.5. Dünyada Hidroelektrik Santrallerde Elektrik Üretimi
[www.asif.co.sr, 2004]

Milyon – tep	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
K. Amerika	53,2	51,1	54	52,2	58	63,1	63,3	58,3	59,6	57,4
Avrupa	43,8	45,7	47	47,2	48,4	47,5	48,7	50,7	51,5	53,4
G.&O. Amerika	33,2	33,8	36,7	38,8	40	41,9	43,9	44,9	44,9	46,7
Eski SSCB (BDT)	20,2	20,2	21,1	21,4	20,7	18,6	18,7	19,4	19,3	19,6
Afrika	5,5	5,3	5	5,2	5,5	5,6	5,8	6,1	6,3	6,5
Orta Doğu	0,8	1,1	1	1	1,1	1,1	0,9	1	0,7	0,7
Asya Pasifik	37,6	36,2	39,3	40,2	42,9	42,5	41,8	45,7	44,3	46,1
Dünya Toplam	194,3	193,4	204,1	206	216,6	220,3	223,1	226,1	226,6	230,4

Tablo 2.5'te de görüldüğü gibi 2000 yılı verilerine göre dünyada hidroelektrik santrallerden en çok Kuzey Amerika'da faydalanılmaktadır. Kuzey Amerika'da hidroelektrik santrallerden elde edilen elektrik enerjisi, dünyada hidroelektrik santrallerden üretilen elektrik enerjisinin %25'ini oluşturmaktadır. Onun ardından %23,17'lik pay ile Avrupa gelmektedir.

2.6. Nükleer Enerji

Einstein 1905 yılında $E=mc^2$ formülünü bulduğunda fisyon sonucu ortaya çıkabilecek enerjiyi de öne sürmüştür. Daha sonra Otto Hahn, Lise Meitner ve diğerleri bunu deneysel olarak doğrulamıştır. İlk nükleer reaktör 1942 yılında Enrico Fermi'nin başında olduğu bir proje ile Amerika'nın Chicago, Illinois kentinde kurulmuştur. 1957'de işletmeye alınan ilk ticari nükleer santral Amerikanın Pennsylvania, Shippingport kentinde kurulmuştur [www.fizikdosyasi.com, 2005].

Nükleer enerjinin hammaddesi uranyum ve toryumdur. Kanada ve Avustralya büyük miktarda uranyum yataklarına sahiptir. Toryum ise en çok Türkiye'de

bulunmaktadır. Nükleer enerji depolanabilir bir enerji kaynağıdır. 3,5-4m uzunluğundaki metal bir zarf içine uranyum pası olarak bilinen UO_2 'den yapılan 1cm çap ve yüksekliğindeki seramik yakıt lokmalarının yerleştirilmesiyle elde edilen yakıt çubukları basınç tankları içine yerleştirilir. Su içeren bu yakıt tankları dik veya yatay olabilmektedir. Bu düzenek içerisinde bir araya gelen yakıt nötronların ağır radyoaktif atomlara çarparak daha küçük atomlara bölmesi (fisyon) sonucunda enerji üretimi sağlar. Bu çekirdek enerjisi ile yakıt çubukları ısınır. Yakıt çubukları su ile soğutulur ve yüksek basınç ve sıcaklıkta buhar elde edilir. Bundan sonra buhar türbini devreye girer ve elektrik enerjisi elde edilir [Kadiroğlu, O.K. ve Sökmen, C.N., 1994].

Nükleer enerjinin yaklaşık 50 yıllık bir tarihi vardır. Bu geçen süre içerisinde birçok sayıda nükleer reaktör tipi tasarlanmıştır. Fakat ticari amaçlı kullanılan santral tipleri az sayıdadır. Hafif su soğutmalı reaktörlerde normal su kullanılmaktadır. Bir de ağır su soğutmalı reaktörler vardır. Bunlarda ise soğutmada ağır su denilen hidrojenin bir izotopu olan deteryum kullanılmaktadır. İki teknoloji de günümüzde ticari olarak kullanılmaktadır. Gaz soğutmalı reaktörler yüksek sıcaklıkta çalışmaktadır. Hızlı üretken reaktörler ise sıvı metalle soğutulmaktadır. Fakat günümüzde bu iki tip de henüz kullanılmamaktadır [Kadiroğlu, O.K., ve Sökmen, C.N., 1994].

Nükleer santrallerin çevreye zararlı hiçbir etkisi yoktur. Çalışması sırasında çevreye saldıgı radyasyon, doğal kaynaklarda alınan radyasyonun yaklaşık 22'de biri kadardır. Nükleer santrallerin dezavantajı, bir kaza sonrasında çevreye tamir edilmez şekilde zarar vermesi ve dönüşü olmamasıdır. Bu yüzden çok geniş önlemlerle ve kazalara mahal vermeyecek şekilde çalışması sağlanmalıdır. Bu da yüksek olan maliyeti bir kat daha artırmaktadır [Kadiroğlu, O.K. ve Sökmen, C.N., 1994].

Nükleer santrallerin ilk yatırım maliyetleri yüksektir. Fakat yakıt ve işletme giderleri düşüktür. Bir santral 6-8 yılda inşa edilmektedir. Zenginleştirilmiş yakıt kullanılan reaktör tiplerinin yakıt gideri doğal uranyumun kullanıldığı reaktör tiplerine göre daha fazladır. Ayrıca yakıt maliyetinde kullanılmış yakıtı depolama şekli de önemli rol oynar [Kadiroğlu, O.K. ve Sökmen, C.N., 1994].

Tablo 2.6. Dünya'daki Çalışmakta Olan ve Yapım Aşamasındaki Nükleer Güç Reaktörleri [www.iaea.org, 2004]

ÜLKE	Çalışmakta Olan Reaktörler		Yapım Aşamasındaki Reaktörler		Nükleer Enerji Eldesi	
	Birim Sayısı	Toplam MWe	Birim Sayısı	Toplam MWe	TWh	Toplam Yüzde
ARJANTİN	2	935	1	692	7.03	8.59
ERMENİSTAN	1	376			1.82	35.48
BELÇİKA	7	5 760			44.61	55.46
BREZİLYA	2	1 901			13.34	3.65
BULGARİSTAN	4	2 722			16.04	37.71
KANADA	17	12 113			70.29	12.53
ÇİN	9	6 587	2	2 000	41.59	2.18
ÇEK CUMHURİYETİ	6	3 548			25.87	31.09
FİNLANDIYA	4	2 656			21.82	27.32
FRANSA	59	63 363			420.70	77.68
ALMANYA	18	20 643			157.44	28.10
MACARİSTAN	4	1 755			11.01	32.69
HİNDİSTAN	14	2 550	8	3 622	16.37	3.30
İRAN			2	2 111		0
JAPONYA	54	45 464	2	2 371	230.80	25.01
KUZEY KORE			1	1 040		0
GÜNEY KORE	19	15 850	1	960	123.28	40.01
LİTVANYA	2	2 370			14.30	79.89
MEKSİKA	2	1 310			10.51	5.23
HOLLANDA	1	449			3.80	4.48
PAKİSTAN	2	425			1.81	2.37
ROMANYA	1	655	1	655	4.54	9.33
RUSYA	30	20 793	3	2 825	138.39	16.54
SLOVAKYA	6	2 442			17.86	57.35
SLOVENYA	1	656			4.96	40.45
GÜNEY AFRIKA	2	1 800			12.66	6.05
İSPANYA	9	7 584			59.36	23.64
İSVEÇ	11	9 451			65.50	49.62
İSVİÇRE	5	3 200			25.93	39.73
UKRAYNA	13	11 207	4	3 800	76.70	45.93
İNGİLTERE	27	12 052			85.31	23.70
U.S.A.	104	98 298			763.74	19.86
TOPLAM	442	363 819	27	22 676	2524.74	

Tablo 2.6'da Dünya genelindeki nükleer güç reaktörleri verilmiştir. Buna göre en fazla nükleer enerji reaktörüne sahip ülke 104 reaktörle U.S.A.'dır. U.S.A.'yı 59 reaktörle Fransa ve 54 reaktörle Japonya izlemektedir.

Tablo 2.7. U.S.A’da Yıllara Göre Toplam Nükleer Enerji Üretimi [Energy Information Administration August Monthly Energy Review, 2005]

Yıl	Nükleer Üretim Birimleri Toplam İşletilebilir Birim Sayısı	Net Nükleer Elektrik Üretimi (Milyon kWh)	Net Elektrik Üretiminde Nükleer Enerjinin Payı(%) (tenth percent)
1995	109	673.402.123	200.807
1996	109	674.728.546	195.904
1997	107	628.644.171	180.015
1998	104	673.702.104	186.09
1999	104	728.254.124	197.102
2000	104	753.892.940	198.283
2001	104	768.826.308	205.753
2002	104	780.064.087	202.17
2003	104	763.732.695	196.677
2004	104	788.555.624	199.462

2.7. Biyokütle Enerjisi

Biyokütle, bitkilerin ve canlı organizmaların kökeni olarak adlandırılır. Bitkisel organizmaların fotosentez olayı ile depoladığı güneş enerjisinin, biyokütlenin yakılmasıyla kullanılması olarak ifade edilebilir. Burada kullanılan materyaller, bitkisel ve hayvansal ürünlerdir. Yetiştiriciliğe dayanan bu enerji türü, yenilenebilir, temiz ve yerel bir enerji kaynağıdır [www.teraenerji.com, 2004].

Modern biyokütle enerjisi ise ormancılık, enerji hammaddesi amacıyla üretilen bitkiler, tarım atıkları ve hayvansal atıklarından elde edilen enerjidir. Dünyada enerji ormancılığı olarak karakavak, balzam kavakları, titrek kavaklar, söğüt, okaliptus gibi ağaçlar kullanılmaktadır. Enerji tarımı ise tek yıllık veya çok yıllık C4 bitkileri ile yapılmaktadır. C4 tipi bitkiler grubuna tatlı darı (sweet sorghum), miscanthus, şeker kamışı ve mısır gibi çok çeşitli bitkiler girmekte olup, ürünlerinden etanol, sentetik petrol, gaz yakıt ve katı yakıt elde olunmakta ve bunlar ısı ve elektrik üretiminde kullanılabilmektedir [www.teraenerji.com, 2004].

Türkiye biyokütle enerjisi için güneş, yetiştirme alanı, iklim ve su kaynakları açısından elverişli bir ülke olarak görülebilir [www.teraenerji.com, 2004].

2.8. Deniz Kökenli Enerji Kaynakları

Deniz kökenli yenilenebilir enerji kaynakları incelendiğinde karşımıza dalga enerjisi, deniz sıcaklık gradyent enerjisi, deniz akıntıları enerjisi ve med-cezir enerjisi çıkar [www.teraenerji.com, 2004].

Bu enerji kaynakları arasında Türkiye için en uygun olanı deniz dalga enerjisidir. Türkiye'nin açık deniz kıyıları 8210 km'yi bulmaktadır. Ancak Türkiye için dalga gücü verileri bulunmamaktadır [www.teraenerji.com, 2004].

2.9. Türkiye ve Enerji

Türkiye enerji talebi giderek artmakta olan bir ülkedir. 1990-2000 yılları incelendiğinde Türkiye'nin enerji talebinde yıllık ortalama %4,4'lük bir artış olduğu görülmektedir. 2001 yılında bu talebin en büyük kısmını %40,7 ile petrol karşılamıştır. Petrolden sonra sırayı %19,6 ile doğalgaz ve 15,7 ile linyit almıştır. Ekonomik büyüme ve nüfus artışı sebebiyle enerji talebimizin giderek artmaya devam etmesi beklenmektedir [Enerji ve Doğal Kaynaklar Paneli, 2002].

Türkiye nüfusu dünya nüfusunun %1,1'ini oluşturmaktadır. Dünya enerji tüketim yüzdeleri incelendiğinde ise Türkiye'nin yalnızca %0,86'lık bir paya sahip olduğu görülmektedir. Bu da enerji tüketimi açısından sonuncu sırada yer aldığımızı göstermektedir. Teknolojinin kullanımının artmasıyla beraber ülke enerji tüketiminin de artması beklenmektedir [Enerji ve Doğal Kaynaklar Paneli, 2002].

Ülkemizde petrol ve doğalgaz üretimi sınırlı düzeydedir. Yerli enerji olarak çoğunluğu linyit olmak üzere kömür ve hidrolik kaynaklar üretilmektedir. Bunun yanı sıra az miktarda yenilenebilir enerji kaynaklarından da faydalanılmaktadır. [Enerji ve Doğal Kaynaklar Paneli, 2002].

Tablo 2.8'de Türkiye için verilmiş olan elektrik enerjisi kurulu güç değerleri incelendiğinde, 1990'dan bu yana yaklaşık olarak 3 kat arttığı görülmektedir. Elektrik üretim kapasitesi ise 57.543 GWh'ten 193.900 GWh'e yükseldiği görülmektedir.

Tablo 2.8. Türkiye’de Elektrik Enerjisi Kurulu Güç ve Üretim Değerleri
[Türkiye 8. Beş Yıllık Kalkınma Planı 2001-2005]

Yıllar	KURULU GÜÇ (MW)					ÜRETİM (GWh)				
	Termik	Hidrolik	TOPLAM	Yıllık Artış	% Artış	Termik	Hidrolik	TOPLAM	Yıllık Artış	% Artış
1990	9.551	6.764	16.315	509	3,2	34.395	23.148	57.543	5.500	10,6
1991	10.093	7.114	17.207	892	5,5	37.563	22.683	60.246	2.703	4,7
1992	10.335	8.379	18.714	1.507	8,8	40.774	26.568	67.342	7.096	11,8
1993	10.653	9.682	20.335	1.621	8,7	39.857	33.951	73.808	6.466	9,6
1994	10.993	9.864	20.857	522	2,6	47.736	30.586	78.322	4.514	6,1
1995	11.089	9.863	20.952	95	0,5	50.706	35.541	86.247	7.925	10,1
1996	11.312	9.935	21.247	295	1,4	54.387	40.475	94.862	8.615	10
1997	11.787	10.103	21.890	643	3	63.480	39.816	103.296	8.434	8,9
1998	13.036	10.316	23.352	2.105	6,7	68.793	42.229	111.022	16.160	7,5
1999	15.561	10.556	26.117	4.227	11,8	81.727	34.713	116.440	13.144	4,9
2000	16.219	11.172	27.391	4.039	4,9	92.860	31.340	124.200	13.178	6,7
2005	27.351	15.432	42.783	3.333	9,3	145.485	48.415	193.900	15.492	9,3

Tablo 2.9. Türkiye’de Elektrik Enerjisi Brüt Tüketim Değerleri [Türkiye 8. Beş Yıllık Kalkınma Planı 2001-2005]

Yıllar	ARZ=BRÜT TÜKETİM (GWh)			
	İTHALAT(İHRACAT)	TOPLAM	Yıllık Artış	% Artış
1990	-731	56.812	4.210	8
1991	253	60.499	3.687	6,5
1992	-125	67.217	6.718	11,1
1993	-376	73.432	6.215	9,2
1994	-539	77.783	4.351	5,9
1995	-696	85.551	7.768	10
1996	-73	94.789	9.238	10,8
1997	2.221	105.517	10.728	11,3
1998	3.000	114.022	8.505	8,1
1999	2.045	118.485	4.463	3,9
2000	2.600	126.800	8.315	7
2005	1.200	195.100	15.323	9

Tablo 2.9’deki Türkiye’deki elektrik enerjisi tüketim değerleri incelendiğinde ise 15 yıl içerisinde yaklaşık olarak 4 kat arttığı görülmektedir.

Tablo 2.10 Türkiye’de Enerji Üretim ve Tüketimi [Enerji ve Doğal Kaynaklar Paneli, 2002]

	Toplam Enerji Arzı				Birincil Enerji Üretimi			
	1990 Mtep	1990 %pay	2001 Mtep	2001 %pay	1990 Mtep	1990 %pay	2001 Mtep	2001 %pay
Petrol	23,901	45,1	30,906	40,7	3,902	15,3	2,679	10,6
Linyit	9,765	18,4	11,929	15,7	9,524	37,4	11,611	46,1
Taşkömürü	6,150	11,6	7,060	9,3	2,080	8,2	1,255	5,0
Doğalgaz	3,110	5,9	14,868	19,6	0,193	0,8	0,284	1,1
Hidro	1,991	3,8	2,065	2,7	1,991	7,8	2,065	8,2
Ticari olmayan	7,208	13,6	6,211	8,2	7,208	28,3	6,211	24,7
Diğer	0,862	1,6	2,883	3,8	0,580	2,3	1,069	4,2
Toplam	52,987		75,952		25,478		25,174	

Tablo 2.10’da da görüldüğü gibi Türkiye enerjiyi ithal eden bir ülkedir. İthal ettiğimiz enerji miktarı da gelişen teknolojiyle enerji talebimizin artmasından dolayı giderek artmaya devam etmektedir [Enerji ve Doğal Kaynaklar Paneli, 2002].

Birincil enerji tüketimimizin büyük bir kısmını oluşturan petrol ve doğalgazın dışarıdan ithal edilmesi, ülke ekonomisini dışarıya bağımlı kılmaktadır. Türkiye’nin elektrik üretimi incelendiğinde ise %30’unun linyit ve taş kömürü, diğer bir %30’unun ise doğal gaz yakan santraller tarafından karşılandığı görülmektedir [İmal, Z., 2003]. Bu da yine elektrik enerjisi talebimizin büyük bir kısmını fosil yakıtlardan karşıladığımızı göstermektedir. Fosil yakıtların kullanımı hem ithal ediliyor olduğundan hem de çevre kirliliğine neden olduğundan ülkeyi olumsuz etkilemektedir [Enerji ve Doğal Kaynaklar Paneli, 2002].

Enerji sorunlarımızı çözmek için belli enerji politikaları çerçevesinde bir yol çizip, belli hususlara dikkat etmemiz gerekmektedir. Bu hususlardan başlıcaları şunlardır [İmal, Z., 2003]:

- Dünyada gelişen yeni enerji kaynaklarının takip edilip uygulanması,
- Aynı işi daha az enerji harcayarak yapan teknolojilerin ülkemizde geliştirilmesi ve kullanılmaya teşvik edilmesi,
- Kullanılan teknolojilerin maliyetlerinin hesaplanıp, maliyet düşürme önlemleri alınması,

- Kullanılacak enerjinin hem ekonomi hem de çevre açısından incelenip en uygun enerji kaynağının kullanılmasına ağırlık verilmesi,
- Ülkemizde kullanılan teknolojilerin diğer ülkelerde kullanılan teknolojilerle paralel ilerlemesine dikkat edilmesi,
- Yapılan uluslar arası anlaşmalarda ülke çıkarlarının ön planda tutulması ve ülkenin gelişimini engelleyen yaptırımlara fırsat verilmemesi

2.10. Yeni Enerji Kaynaklarına Eğilim

Fosil enerji kaynaklarının olumsuz etkileri son yirmi yılda etkisini arttırarak göstermiştir. Gerek insan nüfusunun giderek artması, gerekse teknolojinin gelişmesiyle beraber fosil enerji tüketiminin artması, çevresel problemleri de beraberinde getirmiştir. 1970'li yıllarda bu yana yapılan çevresel analizler, SO_2 , NO_x ve CO gibi kirleticileri tespit etmiştir. Çevre biliminin gelişmesiyle beraber önlemlerin de artması gerçekleşmişse de bu yakıtların verdiği zararları engellemeye yetmemiştir [İmalı, Z., 2003].

Çevresel problemler; asit yağmurları, stratosferik ozon tüketimi ve global iklim değişikliği olarak üç grupta incelenebilir. Bacalardan havaya gönderilen kirletici emisyonların bir bölümü, çevreye yağarak hava kirliliği oluşturur. Diğer bir kısmı ise serbest atmosferik hava akımıyla taşınır ve SO_2 , NO ile oksitlenip, atmosferdeki su ile birleşerek asit yağmuru olarak yere iner. Oluşan asit yağmurları, akarsu ve göllerin, tarımsal alanların, bitkilerin, su canlılarının, yapıların zarar görmesine neden olur [İmalı, Z., 2003].

Güneşin ultraviyole etkisi ve kızılötesi radyasyonunun verdiği zararları önlemek açısından ozon tabakasının dünya üzerinde büyük etkileri vardır. Ozon tabakasının kloroflorokarbonlar, klorlanmış ve bromlanmış karbon bileşikler tarafından zarar görmesi ozon tabakasının koruyucu etkisini azaltır. Bunun sonucunda güneşin zararlı ışınlarının insan vücuduna olumsuz etkileri ortaya çıkar. Bu etkiler, cilt kanseri vakalarının artması ve göz problemleri olarak sıralanabilir [İmalı, Z., 2003].

Sera gazlarının emisyonunun artması ise beraberinde dünya sıcaklığında da artışlar meydana getirir. Bu sera gazlarının başında CO_2 gelmektedir. GJ başına CO_2



emisyolları incelendiğinde kömürün 85,5 kg, petrolün 69,4 kg ve doğalgazın 32 kg değerinde emisyonu neden olduğu görölmektedir. Alınan tüm önlemlere rağmen bu değerlerin giderek arttığı görölmektedir. Yukarıda adı geçen bütün emisyon gazları sera etkisini artırmaktadır. Sera gazları yeryüzünde ısıyı tutarak dünya ısısının artmasına neden olmaktadır. 2050 yılında dünya ortalama sıcaklık artışının 3-5°C olacağı tahmin edilmektedir. Giderek artan sıcaklıkla 20 yıl içerisinde dünyadaki deniz seviyesinin 1 m yükselmesi beklenmektedir. Sel felaketleri, şiddetli rüzgar ve atmosferde dolaşan su miktarının artması da sera etkileri arasında sayılabilir [İmal, Z., 2003].

Fosil enerji kaynaklarının kullanımıyla doğan bütün bu yan etkiler sonucunda dünya üzerinde büyük olumsuz etkiler meydana gelmektedir. Bu da yeni ve temiz enerji kaynaklarına eğilimi de beraberinde getirmiştir. Fosil yakıtlar arasında kirletici etkisi en az olan doğalgazın yakılması sonucunda açığa çıkan NO_x (azot oksit) kokusuz ve görölmez bir emisyonu sahiptir. Azot oksit güneş ışığının etkisiyle nitrata dönüşür ve akciğerlerde nitrik aside dönüşerek birikir. O yüzden insan sağlığı için büyük tehdit oluşturmaktadır [İmal, Z., 2003].

Miami Temiz Enerji Araştırma Enstitüsü'nün yaptığı araştırmaya göre bu emisyonların dünya genelinde 2700 milyar \$ 'lık bir zarara yol açtığı ortaya çıkmıştır. Bu rakam dünya brüt genelinin %14'üne karşılık gelmektedir [www.tubitak.gov.tr, 2003].

2.11. Çözümde Hidrojenin Yeri

Gerek fosil yakıtların tükeniyor olması, gerekse çevreye verdiği zararların ortadan kaldırılması için daha temiz ve güvenilir enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Fosil yakıtların kullanımını azaltmak için gelişen teknolojiyle beraber yeni ve alternatif enerji kaynakları ortaya çıkmıştır. Bu enerji kaynakları arasında hidrojen; temiz, taşınabilir, yenilenebilir, dönüşebilir, alevli ve katalitik yanmaya, elektrokimyasal dönüşüm ve hidrür oluşumuna uygun olması bakımından fosil yakıtlara göre büyük üstünlükler göstermektedir. Hidrojenin saf oksijenle yanmasından sadece su buharı ortaya çıkması çevre kirliliğini önlemek açısından hidrojen kullanımına eğilimi de beraberinde getirmiştir. Hidrojen fosil yakıtlardan

üretilebildiği gibi güneş-hidrojen, rüzgâr-hidrojen sistemlerinin kullanımı üretiminde de çevreye zarar vermesini önlemektedir.

Hidrojen çevresel açıdan bakıldığında en temiz yakıttır. Ayrıca depolanabilir, taşınabilir, nakledilebilir olması ve hammaddesinin çeşitli olması hidrojeni geleceğin enerjisi yapabilecek özelliklerindendir. Ayrıca yapılan çalışmalar hidrojenin enerji veriminin fosil yakıtlardan daha fazla olduğunu ortaya koymuştur. Üretim maliyetinin düşürülmesiyle bu verimin daha da artacağı düşünülmektedir.



3. HİDROJEN ENERJİSİ

Hidrojen enerjisi üzerine yapılan çalışmalar, hidrojenin Dünya'daki enerji sorununa büyük ölçüde çözüm getireceğini göstermiştir. Bunun sonucunda hidrojen enerjisi teknolojisi hızla gelişme kaydetmektedir. Bu bölümde Hidrojen enerjisinin tarihsel gelişimi, hidrojen üretim yöntemleri, uygulama alanları ve hidrojenin yakıt özellikleri konularına değinilecektir.

3.1. Hidrojen Enerjisinin Tarihsel Gelişimi

Hidrojen evrende bulunan en yaygın elementtir. Atom yapısında tek proton ve tek elektron içerdiğinden en basit element olarak kabul edilir. Doğada gaz olarak bulunmaz. Genellikle diğer elementlerle bileşik halinde bulunur. Örneğin su hidrojenin ve oksijenin kombinasyonundan meydana gelir [www.eere.energy.gov, 2003].

Hidrojen, hidrokarbonlara ısı verilerek, reformasyon yöntemiyle elde edilebilir. Bu yöntem doğalgaz için kullanılmaktadır. Elektroliz yöntemiyle, suyu hidrojen ve oksijen atomlarına ayrıştırarak da elde edilebilir. Hidrojen eldesi için bugün birçok yöntem üzerinde çalışılmaktadır [www.eere.energy.gov, 2003].

Hidrojen temiz bir enerji kaynağıdır. Saf oksijenle yandığında sadece su buharı ve ısı ortaya çıkar. Hava ile yandığında bazı azot oksitler ortaya çıkar. Fakat diğer yakıtlarla karşılaştırıldığında en temiz yakıttır. NASA 1970'li yıllardan beri uzay mekiği ve roketlerde yakıt olarak sıvı hidrojen kullanmaktadır. Hidrojen yakıt hücresi mekiklerin elektrik sistemlerini çalıştırmak için kullanılır [www.eere.energy.gov, 2003].

Hidrojen elde edilirken büyük miktarda enerji harcanır. Hidrojen enerji kaynağı değil, enerji taşıyıcısı olarak adlandırılabilir. Bu yüzden hidrojen elde etmek için minimum enerji harcamak hidrojen enerjisini daha verimli kılar [www.eere.energy.gov, 2003].

Robert Boyle 1671 yılında demir talaşı ve seyreltik asitin reaksiyonundan gaz hidrojenin oluştuğunu bulmuştur. Bir süre sonra Henry Cavendish (1731-1810, nitrojeni keşfeden İngiliz kimya ve fizikçi) 1766 yılında ‘metallerde bulunan yanıcı hava’ olarak hidrojen elementini buldu (civa üzerinde). Hidrojen Lavouser tarafından adlandırıldı [www.h2eco.org, 2004].

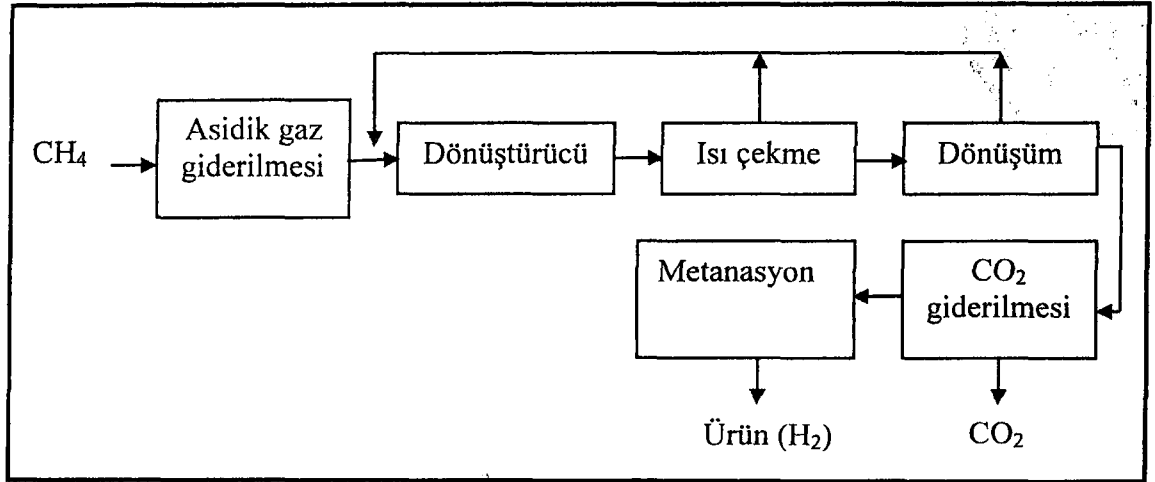
Deuterium gazı ($2H_2$, genellikle D_2 olarak yazılır) hidrojenin ağır izotopudur. 1931 yılında Harold Urey tarafından keşfedilmiştir (Chicago ve California’da kimya profesörü). Yakıt hücresi, 1839 yılında William Robert tarafından icat edilmiştir. Yakıt hücresinde elektrik üretmek için genellikle hidrojen yakıtı kullanılır. 1820’li yıllarda hidrojenin yakıt olarak kullanılması düşünülmüşse de buna yönelik çalışmalar 1970’li yıllarda başlamıştır. İlk olarak roket yakıtı olarak kullanılmıştır [www.h2eco.org, 2004].

Florida’daki Miami Üniversitesi Temiz Enerji Enstitüsü bu konu hakkındaki çalışmalarını 1974 yılında başlatarak büyük bir adım atmıştır. Uluslararası Hidrojen Enerjisi Birliği (IHEA) kurulmuştur. Dünya Hidrojen Enerjisi Konferansı (WHEC) hala periyodik olarak düzenlenmektedir [www.h2eco.org, 2004].

3.2. Hidrojen Üretimi

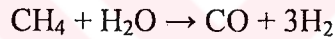
3.2.1. Metanın Buhar Dönüşümüyle Hidrojen Üretimi Yöntemi

Günümüzde hidrojen üretimi için en yaygın olarak kullanılan yöntem metanın buhar dönüşümü yöntemidir. Bu proses, su ve hidrokarbon karışımından hidrojen üreten kimyasal bir prosestir. Proseste buharlaşırken karbon oluşturmeyen hafif hidrokarbonlar kullanılmalıdır. Bu yüzden genellikle doğalgaz (CH_4) ve hafif besleme (nafta) kullanılır [İmalı, Z., 2003].



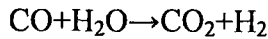
Şekil 3.1. Metanın Buhar Dönüşümü ile Hidrojen Üretimi [İmal, Z., 2003]

Metan asidik gazlardan ayrıştırılır. Daha sonra dönüştürücüde su buharı ile reaksiyona girer. Ürün olarak CO ve H₂ ortaya çıkar. Reaksiyonun oluşumu şöyledir [İmal, Z., 2003]:

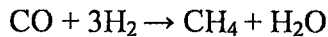


Bu reaksiyon nikel bir katalizör ile 800-1000°C'de ve 30-60 atm basınçta metal alaşım bir tüp içinde gerçekleşir. Endotermik olan bu reaksiyonda sudan buhar elde etmek için gereken 60 kcal/molCH₄'lük ısı metanın yakılmasından elde edilir [www.taek.gov.tr, 2004].

Buhar dönüştürücülerden çıkan sıcak gazlardan çekilen ısı ile sisteme su buharı sağlanır. Reaksiyon sonucu ortaya çıkan CO ve H₂, dönüştürücüde buhar ile reaksiyona girerek su gazı reaksiyonunu oluşturur. Bu reaksiyon şöyledir:



Bu reaksiyon dönüştürücüyle aynı basınçta gerçekleşir. Fakat oluşum sıcaklığı 200-600°C'dir. Reaksiyon ürünleri arasında az miktarda CO da vardır. Son olarak CO₂'nin de uzaklaştırılmasıyla hidrojen üretimi gerçekleşir. Az miktardaki CO ise metan oluşumu için şu reaksiyonu gerçekleştirir [İmal, Z., 2003]:



Bu işlemlerin sonucunda %97-98 saflıkta hidrojen üretimi gerçekleşmiş olur. Bu yöntemle hidrojen üretiminin maliyeti yaklaşık 65 ¢/kg 'dır [İmal, Z., 2003].

Saflaştırmanın gerçekleştirildiği son adım, su, metan, CO₂, N₂ ve CO'nun basınç adsorpsiyonla ayrılıp, %99,99 saflıkta hidrojen elde edilebilen adımdır. Buna alternatif olarak H₂'nin kimyasal adsorpsiyonu, bir iletken kullanılarak ve sonrasında CO ve CO₂ kirliliği ortadan kaldırılarak gerçekleştirilebilir. Ürün gaz olan H₂'nin uzaklaştırılmasından sonra, istenirse proses gazı, CO₂ uzaklaştırılması için işleme alınır [MPR Associates, 2005].

Bu yöntemde doğalgaz su buharı ile yüksek basınç ve sıcaklık altında tepkimeye girer. Bu yöntem hidrojen elde etmek için en verimli yöntemdir [Ün, Ü.T., 2003], [www.taek.gov.tr, 2004].

3.2.2. Atıkgaz Saflaştırma Yöntemi

Bu yöntemle, petrol rafinerileri ve bazı kimyasal tesislerin atık gazlarında yüksek miktarda bulunan hidrojen saflaştırılır. Elde edilen hidrojen endüstride kullanılmaktadır. Ancak yaygın kullanımda talebi karşılayacak yeterlilikte değildir [İmalı, Z., 2003].

Ağır petrol kalıntıları yakıt olarak kullanıldığı zaman kirlетici etkisi yüksektir. Bu maddenin kısmi oksidasyonu ile hidrojen üretilerek çevreye verdiği zarar önleniği gibi temiz yakıt olan hidrojen üretimi sağlanmış olur [İmalı, Z., 2003].

3.2.3. Foto Biyolojik Yöntemler

Foto biyolojik yöntemler bazı bakteriler ve alglerle oluşturulan fotosentez çevrimi temeline dayanır. Bu bakteriler ve alglerin içerdiği enzimler ışığı kullanarak suyu parçalamaktadır. Bu mikroorganizmaların CO₂ ve bazı organik maddelerin bulunduğu ortamlarda kendi kendine çoğalması sistemin en önemli avantajlarından biridir. Mikroorganizmaların temini ve üretilen hidrojen ve oksijenin ayrılması maliyetin tümünü oluşturur [İmalı, Z., 2003].

Fotosentez yapabilen bakteriler ve algler hidrojen eldesi için tercih edilebilir. Fakat uygulamalı çalışmalar için verim henüz bazı mikroorganizmalarla istenilen düzeye ulaşmamıştır [Akkerman, I., 2002], [Pinto, F., 2002].

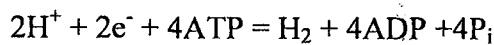
Fotoototrof ve fotoheterotrof organizmalarda H₂ üretimi, enzimlerin aktiviteleri sonucu olmaktadır. Nitrojenazlar, Fe-hidrojenazlar ve FeNi-hidrojenazlar

protonları moleküler hidrojene indirgeyen enzimlerdir [Lindblad, P., Tamagnini, P., 2001]. Yeşil algler ve siyanobakteriler ışık kullanarak suyun parçalanmasından hidrojen açığa çıkarır [Mandacı S., 2002].

1949 yılından beri fotootrofik bakterilerin hidrojen üretebildiği bilinmektedir. Fakat bu durum 1970'lerde ilk kez enerji krizinin yaşandığı dönemde ciddi olarak ele alınmaya başlanmıştır. Japonya, ABD, Almanya, Hollanda, İsveç, Norveç, İtalya bu konuda büyük yatırımlar yapan, bilimsel ve uygulamalı çalışmaları teşvik eden ülkelerdir. Ülkemizde de ODTÜ'de mor sülfürsüz fotosentetik bakterilerden hidrojenin eldesi üzerine çalışmalar devam etmekte olup projelere TÜBİTAK da destek vermiştir. Ayrıca Avrupa Birliği projeleri kapsamında 5. ve 6. çerçeve programlarına Türk araştırmacıların biyolojik hidrojen üretimine katılması hususu TÜBİTAK tarafından da desteklenmektedir [Mandacı S., 2002].

Fotosentetik bakteriler, fotofermentasyon sonunda uygun organik bileşikler ortama verildiğinde, azot yokluğu gibi stres koşulları altındayken ve oksijensiz ortamda büyütüldüklerinde hidrojen üretebilmektedirler. Oksijen ve amonyum iyonları hidrojen üretimini olumsuz yönde etkiler. Bu mikroorganizmalar oksijensiz fotosentez yaptıklarından nitrojenaz enziminin oksijene duyarlılığı problem oluşturmaktadır [Kern, M., Klipp, W. and Klemme, JH., 1994], [Tsygankov, A., 2001].

Fotosentetik bakterilerle hidrojen üretimi sırasında; nitrojenaz ve hidrojenaz enzimleri kullanılır. Anoksijenik fototrofik bakteriler H₂ üretimi için organik asitler ve indirgenmiş sülfür bileşiklerinin her ikisinden de yararlanabilmektedir. Mor sülfürsüz bakteriler ya da yeşil ve mor sülfürlü bakteriler bu karbon kaynaklarını H₂'ye dönüştürmektedirler. Azot yokluğunda indüklenen nitrojenaz enzimi protonları hidrojene indirgemektedir. Bu işlem, ışıkla uyarılan ve ATP'ye bağımlı bir reaksiyondur [Nandi, R. and Sengupta, S., 1998]:



Bu yöntemdeki verimin mühendislik sistemleri ve katalizörler kullanılarak %24'e kadar çıkartılabileceği düşünülmektedir [www.taek.gov.tr, 2004].

Tablo 3.1. Hidrojen Üretiminde Kullanılan Bazı Mikro-organizmalar[Türe, E., 2003]

Genel Adı	Sistematik Gösterim	Fotosistem Tipi	Metabolizmanın Doğası	Taban Madde veya Elektron Verici Madde
Yeşil alg/ Chlorophytes	Gelişmiş organizma	PS I ve PS II	Fotolitografik Oksijenli	Su
Mavi yeşil alg/ Cyanophytes / Cyanobacteria	İlkel organizma	PS I ve PS II	Fotolitografik Oksijenli Oksijensiz (seçmeli)	Su
Mor ve yeşil bakteri/Foto-sentetik bakteri	İlkel organizma	PS I ve PS II	Foto organotrofik Oksijenli Oksijensiz (seçmeli)	Organik madde Hidrojen sülfür

Tablodaki PS I, reaksiyon merkezi kuvvetli elektronegatif redox aralığında gerçekleşen fotosistemi, PS II ise reaksiyon merkezi daha az kuvvetli elektronegatif redox aralığında gerçekleşen fotosistemi göstermektedir.

3.2.4. Güneş-Hidrojen Sistemleri

Güneş enerjisi kullanılarak elektrik elde edilmesi ve bu elektrik enerjisiyle suyun ayrıştırılması iki metotta toplanabilir. Birincisi yarı iletken foto elektrotların kullanımı, ikincisi ise fotovoltajik pil kullanımıdır. TiO yarı iletkenler suyu direk ayrıştırabilir. Fakat güneş radyasyonunu absorblayan bant boşluklarının genişliğinin yetersiz olması ve bu küçük boşlukların fotoelektrot bozunmasına neden olmasıyla verimleri düşük değerdedir [İmal, Z., 2003].

Güneş-hidrojen enerji sisteminde, güneş enerjisi doğrudan (ışık) ve dolaylı olarak (rüzgar, ısı, hidrolik) elektrik üretiminde kullanılır ve üretilen elektrikle özellikle su ve diğer kaynaklardan hidrojen elde edilir. Elektroliz olayında ortaya çıkan oksijen atmosfere bırakılır ya da yakıt hücrelerinde elektrik üretme amaçlı depolanır [Veziroğlu, T. N., Bockris, J. O'M. and Smith, D., 1991], [Veziroğlu, T. N. and Barbir, F., 1998].

Güneş-hidrojen sistemleri denildiğinde akla öncelikle fotovoltaikler gelmektedir. Fotovoltaik kelimesi Yunanca'daki ışık anlamına gelen "photo" ve elektrik birimi olan "volt"un bir araya getirilmesiyle oluşmuştur. Fotovoltaik etkisinin bulunuşu Fransız bir fizikçi olan Edmond Becquerel'e dayanmaktadır. Çalışmasını "ıslak pil" olarak adlandırmış ve gümüş plakaların güneşe tutulduğunda pil voltajının arttığını görmüştür. Pratik olarak fotovoltaik hücrenin bulunuş tarihi olan 1959'dan beri güneşten verimli elektrik üretmek bilim adamlarının rüyası olmuştur. Bu piller güneş ışınımını kompleks foto-elektrik süreçlerle direkt olarak elektrığe çevirirler. Fotovoltaik teknolojisi son 50 yıl boyunca büyük ilerleme kaydetmiş ve ileri prototip sistemlerle verim %20 seviyesine yaklaşmıştır. Yaklaşık 15.000 evin ihtiyacını karşılayacak olan 50 MW'lık hücreler 1990 yılında üretilmiştir. Son yıllarda fotovoltaik fiyatları hızla düşmektedir. Fotovoltaikler iletim hatlarından uzak olan bölgeler için en iyi elektrik kaynağı olma özelliklerini korumaktadırlar. Fotovoltaik piller farklı iki yarıiletken malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulurlar. Bu yarıiletkenler pozitif-tip "p" ve negatif-tip "n" olarak bilinirler. Bunlar genelde silikonlardan üretilmekte olup en önemli özelliklerinden bir tanesi güneş klimatolojisinin her durumunda elektrik üretebilmeleridir. Parçalı bulutlu ve kapalı gökyüzü durumunda da yayılı ışınımı kullanarak verimlerini devam ettirmektedirler [Şahin, A.D., 2004].

Tablo 3.2. Enerji sistemlerinde kirletici miktar karşılaştırması [Ün, Ü.T., 2003]

Kirletici	Fosil Yakıt Sistemi (kg/GJ)	Kömür/Sentetik Fosil Sistem (kg/GJ)	Solar Hidrojen Sistemi (kg/GJ)
CO ₂	72,4	100	0
CO	0,8	0,65	0
SO ₂	0,38	0,5	0
NO _x	0,34	0,32	0,1
HC	0,2	0,12	0
Partikül Madde	0,09	0,14	0

Tablo 3.2'de fosil yakıtlı enerji sistemleriyle solar hidrojen enerjisi sisteminin kirletici miktar karşılaştırması yapılmıştır. Bu tabloya göre fosil yakıtlı sistemlerde CO₂, CO, SO₂, NO_x, HC ve partikül madde oluşumu görülürken, solar hidrojen

sisteminde yalnızca fosil yakıtlı sistemlerin 1/3'ünden az NO_x oluşumu görülmektedir.

Güneş-Hidrojen sistemlerinde kullanılan yöntemler, foto-elektrokimyasal ve termokimyasal yöntemler olarak iki grupta incelenebilmektedir.

3.2.4.1. Foto-Elektro Kimyasal Yöntemler

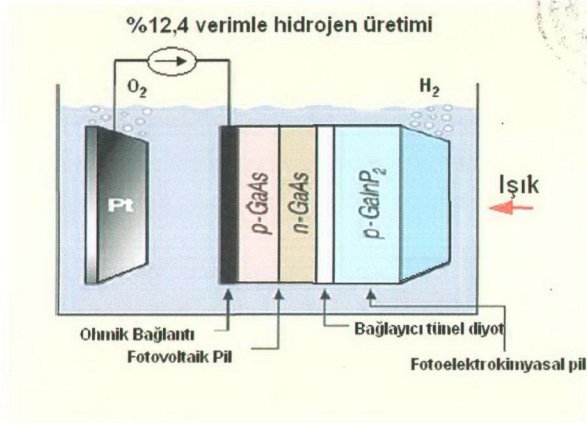
En basit anlatımla foto-elektro kimyasal su ayrıştırma yöntemi; sıvı elektrolit içine daldırılmış, yarı iletken malzemeden yapılmış, biri ışığı absorplayan iki elektrod içeren bir sistemdir [Bak T. et.al., 2002]. Bu yöntemde hidrojen üretmek için iki elektrokimyasal sistem kullanılır. Bunlardan birisi katalizör olarak çözünebilir metal bileşikleri kullanırken diğeri yarı iletken yüzeylerinden faydalanır. Çözünebilir metal bileşiğinin çözülmesi sırasında bileşik, güneş enerjisini soğurarak bir elektrik şarjı oluşturur ve su moleküllerinin parçalanmasını sağlar. Bu proses fotosentez olayı gibi işler. Diğer yöntemde ise yarı iletken elektrotlar bir fotokimyasal pil içerisinde optik enerjiyi kimyasal enerjiye çevirirler. Burada yarı iletken yüzey, iki olayı birden gerçekleştirir. Bir taraftan güneş enerjisini soğururken diğer taraftan elektrot olarak çalışır [www.taek.gov.tr, 2004]. Solar foto elektrokimyasal, TiO_2 , InP ve çeşitli bant aralıklı yarı iletkenler kullanılarak suyu ayrıştırmaya çalışan bir prosestir. Foto elektro kimyasal su ayrıştırma çalışmaları genellikle solar su ayrıştırma için gerekli görülen geniş bant aralığını azaltmaya odaklanmıştır [Licht, S., 2004].

Bu yöntem elektroliz yönteminin bir benzeridir. Elektroliz yöntemine göre daha verimlidir [www.taek.gov.tr, 2004].

Teoride, foto elektrodların 3 farklı birleştirme şekli vardır:

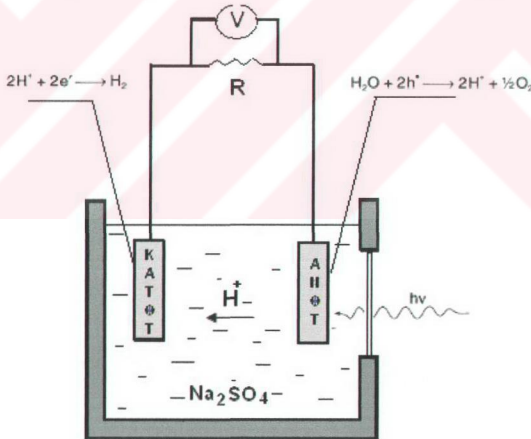
- n-tipi yarı iletkenenden yapılmış foto-anot ve metalden yapılmış katot
- n-tipi yarı iletkenenden yapılmış foto-anot ve p-tipi yarı iletkenenden yapılmış foto-katot
- p-tipi yarı iletkenenden yapılmış foto-katot ve metalden yapılmış anot

[Bak, T. Et.al., 2002]



Şekil 3.2 p-tipi foto katot, metal anot içeren fotoelektrokimyasal su ayrıştırma sistemi [Turner, J.A., 2003]

Şekilde Galyum İndiyum Fosfat Elektrolit sisteminin dizilişi görülmektedir.



Şekil 3.3. Foto-elektrokimyasal Pilin Yapısı[Bak, T. Et.al., 2002]

Eski foto elektrokimyasal modellerde, yanlış bir yaklaşım sergileyenek, düşük solar su dönüşüm verimlerinin max. %15 elde edilebilirliği olduğu öne

sürülmüştür. Bu, son zamanlarda geliştirilerek teorik olarak %30'lara kadar çıkarılmıştır [Licht, S., 2004].

Elektrokimyasal su ayrıştırma, H_2 ve O_2 oluşturma, gaz yeniden birleştirme limitlerini en yükseğe çıkarma, foto termal ve elektrokimyayı birlikte kullanma ve solar enerji kullanımının verimini iyileştirmede yol gösterici olacaktır. Suyun elektrolizini kolaylaştırmak için ısı kullanımı, solar enerjide, geliştirilmiş termodinamik ve elektro kimyasal proseslerde, halen araştırılmakta olan bir yöntemdir [Licht, S., 2004].

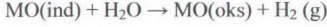
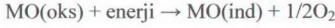
Tablo 3.3. Fotoelektro Kimyasal Su Ayrıştırma Yöntemlerinin Limit ve Potansiyel Analizi [Licht, S., 2004]

Proses	Limitler, potansiyel
Fotosentetik, biyolojik ve foto kimyasal	Çok düşük verimlerle çalışmaktadır. Genellikle %1'lik solar enerji verimi
Fototermal, tek adımda(direkt)	Gaz yeniden birleştirme limitleri, yüksek sıcaklık materyal limitleri, genellikle %1 solar enerji dönüşümü
Fototermal (çok adımlı)	Tek adımdan daha düşük sıcaklık, stepwise reaksiyon etkisizliği kayıplara yol açar. %10 solar dönüşüm
Foto elektrokimyasal	%10-20 solar enerji dönüşümü, yüzey kararsızlık sınırları durumunda
Foto termal, elektrokimyasal	Teori mevcut değil. %20 solar enerji dönüşümü potansiyeli, solar yoğunlaşma gerektirmekte

3.2.4.2. Termokimyasal Yöntemler

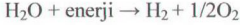
Güneş ısı enerjisi kullanılarak suyun yüksek sıcaklıkta tek aşamada veya birden fazla aşamada ayrıştırılması ile hidrojen elde edilebilir. İlk olarak Nakamura tarafından sunulan bu çevrim demir oksitlerin kullanımı esasına dayanmaktaydı. Fakat bu çevrim için 2500 K sıcaklık gerekmesi malzeme problemlerine yol açmıştır.

Bu çevrim iki adımdan oluşmaktaydı. Birinci adım metal oksitten aktivasyon ve oksijenin serbestleştirilmesi ve ikinci adım da suyun ayrışmasıdır [İmalı, Z., 2003].



MO(ind) indirgenmiş, MO(oks) ise oksidize edilmiş metal oksitleri göstermektedir.

Net stokiyometrik reaksiyon ise şöyle gösterilir [İmalı, Z., 2003]:



Termokimyasal su ayrıştırması için MnO, Fe₃O₄, ZnO, Zn/Fe₃O₄ karışımı ve CdO kullanılan sistemler bilinmektedir [İmalı, Z., 2003], [Baykara, S.Z. ve Bilgen, E., 1989].

Bu süreçlerde çalışma sıcaklığı 1000–2500 K dolaylarında olup, güneş ışınlarının optik sistemlerle yoğunlaştırılıp odaklanmasını gerektirmektedir. Toplam verim farklı tasarımlar için farklı değerler alabilmekle birlikte ticari elektroliz veriminden daha düşüktür [Baykara, SZ., Bilgen, E., 1989].

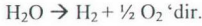


Şekil 3.4. Parabolik Çanak Şeklindeki Solar Yoğunlaştırıcı

3.2.4.3. Suyun Direkt Bozunması

Suyun 3400 K'e çıkabilen sıcaklıklara ulaşarak hidrojen ve oksijene ayrıştırılması suyun ısı ile ayrıştırılması için kullanılan en basit yöntemdir. Fakat bu yöntemin endüstriyel açıdan zorlukları vardır. 1 atm'den daha düşük basınçlarda 2000-2500 K'lık sıcaklıklar bu yöntem için uygun olabilmektedir [İmalı, Z., 2003].

Bu proseslerde net reaksiyon:



Ürün sadece H_2 ve O_2 'dir. Bu ürünler enerji üretimi için tekrar birleştiklerinde ise sadece su açığa çıkar. Bu yüzden çevrim yenilenebilir ve sıfır emisyonludur.

Bu endotermik reaksiyonun devamlılığını sağlamak için gerekli olan ısı enerjisi, temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olan güneş enerjisinin yoğunlaştırılmasıyla elde edilir. Solar-termal reaksiyonlar 1500-2500 K'lere kolayca ulaşabilmektedir. Daha yüksek sıcaklıklara da ulaşılabilmesine rağmen malzeme ve geri ısınım kayıpları büyük problemler yaratır. Bu yüzden suyu ayrıştırmak için solar-termal proseslerin kullanımında 2500 K'in altındaki sıcaklıklar düşünülmektedir. Endüstriyel uygulamalarda prosesin maliyet açısından karlı ve uygulanabilir olması için prosesin verimi ve ekonomikliği de göz önünde bulundurulmalıdır. Prosesler; ultra yüksek sıcaklıkta direkt termal su ayrıştırma, yüksek sıcaklıkta iki adımlı metal oksit oksidasyonu/indirgenmesi ile suyun ayrıştırılması ve orta sıcaklıklarda 3 adımda su ayrıştırma prosesleri olarak incelenebilir [Perkins, C. and Weimer, A.W., 2004].

Baykara, direkt termal su ayrıştırma için geliştirilmiş iki farklı proses tasarlamıştır:

- 1) Sıcak olan ürün gaz hemen soğutulur (suyla, düşük sıcaklıktaki buharla ya da soy gazlarla) ve hidrojen, daha düşük sıcaklıklardaki karışımdan ayrılarak geçirgen olmayan katı membrana doğru yayılır. Paladyum membran teknolojisi bu tür uygulamalar için uygundur [Baykara, S.Z., 2004].
- 2) Hidrojen yüksek sıcaklıkta ürün gazdan direkt olarak ayrılır ve ısıya dayanıklı geçirgen zara doğru Knudsen akış rejimiyle gönderilir. Zirkonya, membran reaktörleri içeren modelleme çalışmaları içinde çok yönlü seçici geçirgen zar olarak düşünülmüştür. Deneysel çalışmalarda sınırlı başarıya ulaşılmıştır. [Baykara S.Z., 2004].

Baykara tarafından termodinamik olarak modellenmiş bu koşullar sonucunda, solar enerji yoğunlaştırma, reaktör materyallerinin ısıya dayanımı, reaktör boyutları

ve hava sızdırmazlığıyla ilgili zorlukların ortaya çıktığı görülmüştür. Bu sınırlamalar göz önüne alınarak 1000-3000 K arası sıcaklıkları kapsayan koşullar hesaplanmış ve termodinamik, ekonomik sonuçları ve materyal problemlerinde en yüksek toleransları sağlayan sıcaklık 2500 K olarak bulunmuştur [Baykara S.Z., 2004].

Farklı proses dizaynlarında parabolik çanak çapı ve odak çapları 22,2 ve 0,78 m ve 27,4 ve 0,97 m seçilmiştir. Yoğunlaştırıcı ve alıcının verim değerleri ise %95 ve %90'dır [Baykara S.Z., 2004].

1500-2000 K kadar olabilen ani sıcaklık düşüşleriyle soğutulmuş, reaksiyona girmeyen tersinmez besleme akışının enerji içeriği harcamasında kayıpların olduğu proses 1'de, H_2 ve O_2 'nin yeniden birleşme riski minimize edilmiştir. Proses 2'de, bu ayrılmayan sıcak akışlı su buharı, besleme akışına geri gönderilerek termodinamik verimin basit bir şekilde geliştirilebileceği görülmüştür. Üstelik elde edilmiş hidrojenin ayrılması amacı ile membranın akış yönündeki basıncının düşürülmesi, reaktördeki dönüşüm oranını arttırmıştır. Çıkış buharı stokiyometrisinin düzeltilmesi, oksijen ayırıcı membrana girişiyle mümkün olabilir. Bu projeler model olarak uygulanabilir görünse de teknik olarak, pratikte uygulanabilirlikleri üzerine çalışılmaktadır. [Baykara S.Z., 2004].

Proses 1'de solar enerji girişinin yaklaşık %31'i soğutmadan dolayı kaybolur. Hibrit operasyonla hidrojen üretimi kapasitesi artırıldıktan sonra (geleneksel elektrolizin solar termal elektriklerle güçlendirilmesi), kayıpların çoğu düşürülerek %19 değerine iner. (Prosesin soğutma modülünün en yüksek tersinmezlik derecesine sahip olduğu bulunmuştur, reaktör modülünün ekserji kaybı içeriği ise %24,5'tir). Sonuç olarak 1. ve 2. kanunların her birinin verim değerleri hibrit operasyonlarla %24 geliştirilmiştir. Reaktör, soğutucu, kondenser ve seperatör modülleri, su ayrıştırma ve hidrojen ayırma için proses 1'de gereklidir. Proses 2'de sadece reaktör-seperatör yeterlidir. Böylece proses 2'de, proses 1'e göre %56 daha düşük enerji kaybı olur. Ek olarak eğer hidrojen içeriği seçilip ayrıldıktan sonra reaktörden gelen atık akışkanı oluşturan proses 2'deki sıcak ayrılmamış buhar, yapılardaki (kimyasal ısı borusu gibi) başka proseslerin içindeki kojenere edilmiş proses buharı olarak kullanılırsa termodinamik verim %90'ın üstüne çıkarılabilir ve hidrojen maliyeti azalır. Proses 2'deki daha ileriki gelişmeler ise, sıcak atık akışkanın yüksek sıcaklıktaki

elektroliziyole termodinamik verimin %95'e yükselmesi ve hidrojen üretim maliyetinde %89 ekonomi elde etmektir [Baykara S.Z., 2004].

Solar enerjiyle sudan hidrojen elde etmenin en direkt metodu su moleküllerinin tek adımda termolizi ile olur. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi, buhar geçişli bir reaktör üzerine odaklanır. Isı, ayrıştırılması için buhara transfer edilir. İlk bakışta bu cazip bir proses olarak görülebilir. Tek adımda gerçekleşmesi ve teorik olarak maksimum veriminin çok yüksek olması prosesin ve reaktör mühendisliğinin de basit olduğunu düşündürmektedir [Perkins, C. and Weimer, A.W., 2004].

2500 K'in üzerindeki sıcaklıklarda bile Kogan et.al., %25 su ayrıştırma prosesini başarmıştır. Modern solar kolektör sistemleriyle bu yüksek sıcaklıklara ulaşılabilir. Fakat radyasyon kayıplarındaki artış ve toplayıcı aynaların verimi dikkate alınmalıdır. Prosesin avantajları, yüksek reaksiyon hızı, sıcaklıkla beraber ekspansiyonel artış ve sıkıştırılmış reaktör büyüklükleri nedeniyle izolasyonunun kolay yapılması olarak sayılabilir [Perkins, C. and Weimer, A.W., 2004].

Yakın zamandaki uygulamalar, sistemin yaygın problemlerini de ortaya çıkarmıştır. Sıcaklık 2500 K'e ulaşana kadar sabit dengeli ayrışma reaksiyonunun makul ürün vermediği görülmektedir [Perkins, C. and Weimer, A.W., 2004].

Geri ışınım kayıplarındaki artış ve çok yüksek sıcaklıklar, reaktör yapımında kullanılan malzemelerin seçiminde etkilidir. En nanoksit materyaller 2500 K'lik sıcaklıklarda stabil olmamaktadır ve bu yüksek sıcaklıklarda hidrojenin oksitler üzerindeki etkisi bilinmemektedir. Solar reaktörün yapımında kullanılan farklı ve gelişmiş materyaller solar reaktör kadar prosesin maliyetini de yükseltmektedir. Bu nedenle, suyun direkt termolizi için gerekli ultra yüksek sıcaklıklara dayanabilecek özellikteki materyallerin araştırılıp kullanılması bu prosesi ekonomik açıdan uygulanamayacak kadar pahalı kılmaktadır [Perkins, C. and Weimer, A.W., 2004].

Diğer büyük problem direkt su ayrıştırmada yaşanır. Suyu H_2 ve O_2 'ye ayırmak için çok yüksek sıcaklıklara çıkmak gerekmektedir ($T > 2500$ K). Eğer yüksek sıcaklıkta ayrışma gerçekleşmezse, daha düşük sıcaklıklarda bu gazlar hemen yeniden birleşme eğilimine girer. Ya da sıcaklık yeniden birleşme olmadan başarıyla

düşürülse bile orta sıcaklıklarda gazlar patlayıcı karışım oluşturabilirler [Perkins, C. and Weimer, A.W., 2004].

Yapılan birçok araştırmada su ayrıştırmasını gerçekleştirecek teknolojiler bulunmuştur. Kogan, zirkonyumdan imal edilmiş geçirgen seramik membranlar kullanarak bu işlemi gerçekleştirmiştir. Ohya et.al. bu membranları yeniden yapmış ve Fon et.al. yüksek zirkonya içerikli membranları, yüksek sıcaklıklı membran ayırıcı olarak üretmeyi başarak bu uygulama için umut verici bir gelişme kaydetmiştir. Zirkonya, direkt su ayrıştırma reaktöründeki zorlu şartlara dayanabilecek kadar yeterli yükseklikte erime sıcaklığına sahiptir. Ayrıca iyi bir hidrojen geçirgenliği seğılemektedir. Kogan, zirkonyanın toplama sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda da (2073 K) toplama prosesinin devam ettiğini bulmuştur. Kısa bir sürede olmasına rağmen, bu toplama prosesi, gözenek tıkanması ve membranın hidrojen geçirgenliğinde büyük ölçüde azalmaya neden olmaktadır [Perkins, C. and Weimer, A.W., 2004].

Bu yöntemin en büyük güçlüklerinden biri ise bu yüksek sıcaklıklara dayanabilecek materyallerin bulunması konusunda yaşanmaktadır. 2200°C'ye kadar kararlı olan Tantanborit, Tantankarpit, Tungsten ve Grafit gibi materyallerin ise bu sıcaklıkta hidrojen ve oksijene kararlı olmadığı görülür. Bu yüzden oksitlenme olayı gerçekleşir. Bu yüksek sıcaklıkta sadece oksitlerin kararlı olduğu bilinmektedir. Fakat bu oksitlere hidrojenin yapacağı etki bilinmemektedir. Oksitlenme kontrol edilebildiği takdirde Bornitrit gibi seramik malzemelerin yüksek sıcaklıklarda kararlı olacağı düşünülmektedir. $ZrO_2-CeO_2-Y_2O_3$ gibi yarı geçirgen zarlar hidrojeni oksijenden ayırmak için kullanılmaktadır [İmalı, Z., 2003].

3.2.4.4. Metal oksit dönüşümleri

Günümüz ya da yakın gelecek teknolojiyle direkt su ayrıştırma yönteminin uygulamaya uygun olmaması, aynı neticeyi veren çok adımlı dönüşümlerin geliştirilmelerine yönelik araştırmaların yapılmasına neden olmuştur. Bu proses yaklaşımının çok çeşitli avantajları vardır. İlki; dönüşümün içindeki ayrışma reaksiyon sıcaklığı, suyun direkt termolizi için gerekli sıcaklıktan çok daha düşüktür. Verim koşulları, malzemeler ve ekonomik faydaları göz önünde bulundurulduğunda yüksek sıcaklık, direkt su ayrıştırmada iki önemli faktörden biri iken, sıcaklıktaki

düşüş, bu özellikler üzerinde önemli kazançlar sağlamaktadır. İkinci olarak, tüm bu çok adımlı proseslerde, farklı adımlarda H_2 ve O_2 'yi ortamdan uzaklaştırıp, yüksek sıcaklıkta gaz ayırma işlemlerine gerek duyulmamaktadır. Ayrıca proseste, patlayıcı karışım oluşma riski yoktur [Perkins, C. and Weimer, A.W., 2004].

Bu avantajlar aynı zamanda maliyeti de arttırmaktadır. Öncelikle proses adımlarının artışı ile tüm aşamaların tersinmezliği ve aşamalar arası geçiş nedeniyle maksimum teorik proses verimi düşer. Verimin düşüşüyle, daha zayıf bir teorik ekonomi söz konusu olmakta, dönüşüm sorunlarıyla karşılaşmakta ve enerji üretiminde de azalma meydana gelmektedir. Düşen verime ek olarak, çok adımlı prosesler, orta sıcaklıklarda reaksiyon ürünlerinin ayrılmasına, reaksiyon adımları arasında ürün geçişine gereksinim duymakta ve sıcaklık düşerken ayrılmış parçaların tekrar birleşmesi problemi söz konusu olabilmektedir [Perkins, C. and Weimer, A.W., 2004].

Çok adımlı su ayrıştırma dönüşümünü son dezavantajı, suyun dışında, kimyasal reaktan gereksinimidir. Bu proseslerin tümüyle sürdürülebilir ve yenilenebilir olması için, ekonomik uygulanabilirlik göz önüne alınmadan, bu diğer ürünler tamamiyle tekrar üretilebilmeli ve reaksiyon döngüsü içinde geri dönüştürülebilmelidir. Aksi takdirde bu proses, sudan başka proses materyallerine de gerek duyacaktır ve hidrojen eldesi için daha fazla enerjiye gereksinim duyulacaktır. Tüm bu dezavantajlar, tek adımda su ayrıştırmanın pratik avantajlarına karşılık minimize edilmelidir [Perkins, C. and Weimer, A.W., 2004].

İki adımlı su ayrıştırmanın büyük bir bölümü, araştırmaların da büyük bir kısmını oluşturan kısım, metal oksit oksidasyon/indirgeme adımlarının olduğu kısımdır. İki adımlı dönüşüm [Kaneko, H. Et.al., 2005] ;

Oksijen üretimi : $xMO_{oks} + \text{güneş enerjisi} \rightarrow xMO_{ind} + 1/2O_2$

Hidrojen üretimi: $xMO_{ind} + H_2O \rightarrow H_2 + xMO_{oks}$

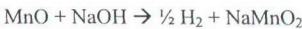
Net reaksiyon, 1 mol suyun içindeki yarım mol O_2 ve 1 mol H_2 yi ayrıştırmaktır. Bu reaksiyon dönüşümleri literatürde denenmiştir [Perkins, C. and Weimer, A.W., 2004].

Metal oksit dönüşümü içinde teknik literatürde en çok araştırılan ZnO/Zn dönüşümüdür. Bu dönüşümün solar radyasyonu yoğunlaştırmak için uygulanan ilk solar adımıdır; çinko oksit 2300 K'de çinko ve oksijene ayrışır. Metalik çinko, hidrojen ve tekrar çinko oksit veren düşük sıcaklıklı ikinci adımda toplanarak suyla reaksiyona sokulur. Proseste dikkat edilmesi gereken en önemli şey, çinkonun reoksidasyonuna izin vermeden çinko ve oksijeni ayırmaktır. Tüm prosesin verimi direkt olarak solar adımda elde edilen çinko miktarına bağlıdır [Bodek, P. And Alxneit, I., 1998].

Steinfeld et.al., ZnO/Zn prosesi üzerinde enerji analizi yapmış, 5000 ve 10000 kat solar yoğunlaştırma için prosesin verimini hesaplamıştır. 10000 ve 5000 kat solar yoğunlaştırma analizleri sonucunda sırasıyla %36 ve %25'lik max. toplam verimler elde edilmiştir [Perkins, C. and Weimer, A.W., 2004].

Diğer metal oksit dönüşümleri, Fe esaslı dönüşümlere ağırlık verilerek incelenmiştir. Örneğin Steinfeld, Fe₃O₄/FeO dönüşümünde maliyet ve verim analizleri yaparak 1900 K'de %61 ve 2500 K'de %42'lik teorik verimleri elde etmiştir [Perkins, C. and Weimer, A.W., 2004].

Dikkate alınan son bir metal oksit dönüşümü, Mn₂O₃/MnO dönüşümüdür. Üç adımda gerçekleşen bir prosestir. Bu yüzden maksimum teorik verimi iki adımlı proseslerden daha düşüktür. Ancak tüm adımlarda elde edilmiş maksimum verimin uygulanabilirliği değerlendirilmelidir. Üç adımlı dönüşüm, diğer iki adımlı dönüşümlerden daha kolay gerçekleşiyor olabilir. Dönüşüm;



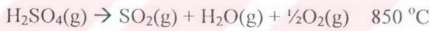
Bu dönüşüm, Mn₃O₄ dönüşümüne kıyasla oksit kütle akışı başına daha fazla H₂ ürün miktarı içerdiğinden daha iyi bir dönüşümdür. Sturzenegger ve Nuesch, ayırma adımlarını ihmal ettiklerinde verimleri %26-51 ve ayırmayla beraber tüm adımların verimlerini ise %16-21 hesaplamıştır [Perkins, C. and Weimer, A.W., 2004].

3.2.4.5. Düşük Sıcaklık Dönüşümleri

1970'lerdeki enerji krizi sırasında araştırmacılar, nükleer reaktörlerin atık ısıyla termokimyasal hidrojen üretimine yönelmişlerdir. Güvenlik nedeniyle maksimum 1573 K'lik operasyon sıcaklığıyla sınırlı olan tüm bu termokimyasal prosesler, bu sıcaklık limitleri altında çalıştırılmak zorundaydı. Bu dönüşümlerden en umut vericisi, sülfür iyodin ya da SI dönüşümü, 1970'lerde General Atomics tarafından incelenmiştir. Dönüşüm:

Bu sistemin çekiciliği düşük çalışma sıcaklığı yüzündendir. Düşük sıcaklıkta solar düzeneğin verimi minimal radyasyon kayıplarından dolayı oldukça yüksektir. Ek olarak, bozulma reaksiyonu, aslı planlanandan daha yüksek sıcaklıklarda çalıştırılırsa günümüz solar teknolojisiyle elde edilebilir, daha hızlı kinetiklere sahip ve daha dengeli çevrimleri gerçekleştirecek seviyeye gelecektir [Perkins, C. and Weimer, A.W., 2004].

Bu dönüşüm dört kısımdan oluşur: (I) asit üretimi ve oksijen ayırma saflaştırma, (II) sülfürik asit konsantrasyonu ve ayrıştırması, (III) hidroiyodik asit (HI) konsantrasyonu, (IV) HI ayrıştırması ve hidrojen saflaştırma. Dönüşüm üç adımdan oluşur [Huang, C. and Raisi A.T., 2005];



SHEC (Solar Hydrogen Energy Corporation) laboratuvarları 1000°C'nin altındaki proseslerde sudan hidrojen üretilceğini kanıtlamıştır. Proses ısı girişi gerektiren termal-katalitik dönüşüm esasına dayanmaktadır. SHEC, aynalar kullanarak güneş ışığını odaklayıp kimyasal reaktöre göndermektedir.

SHEC laboratuvarları, katalitik prosesi 400°C daha düşük sıcaklıkta gerçekleştirmiştir. Yüksek sıcaklıklardaki malzeme problemi minimize edilip, ışık enerjisi kayıpları en aza indirilmiştir. 18inch çapındaki yoğunlaştırıcı, 750°C'lik sıcaklıklara ulaşmak için yerleştirilmiştir.

SHEC laboratuvarları, güneş enerjisini 5000 kat daha fazla yoğunlaştırabilen gelişmiş “yüksek oranlı” solar yoğunlaştırıcı sistemi geliştirmiştir. Bu yüksek yoğunlaşma seviyeleri, ısıtma, damıtma, iklimlendirme, enerji üretimi, hidrojen üretimi ve diğer uygulamalarda solar enerjiyi verimli ve ekonomik açıdan kullanmayı sağlamaktadır [www.shec-labs.com/process.php, 2005].



Şekil 3.5. Solar Yoğunlaştırıcı Sistem

HYDROSOL Projesi, Avrupa Birliği kapsamındaki Avrupa Komisyonu’nun başlatmış olduğu yoğunlaştırılmış solar termal enerji kullanılarak hidrojen üretimini hedefleyen bir projedir. Bu proje, sistemde 800-1100°C’lik sıcaklıklarda su ayrıştırmada kullanılmak üzere farklı katalitik malzemeler geliştirmeyi hedeflemiştir. Katalistlerin hidrojen üretimi için uygunluğu ve dayanıklılığı ölçülmüştür [European Research, 2004].

10kW’lık ilk örnek, solar reaktör için tasarlanmış, kurulmuş ve denenmiştir. Hidrojen üretimi yapıp, üretim verimi ve katalist dayanımı ölçülmüştür. Araştırma, gelişmiş materyal sentezi, gelişmiş seramik üretimi ve gözenekli geçirgen üzerine odaklanmıştır ve yüksek sıcaklıkta, bal peteği şeklinde birleştirilmiş katalitik malzemeler de denenmiştir. Projenin ilk 18 ayından sonra çok olumlu sonuçlar elde edilmiştir [European Research, 2004].

Proje:	HYDROSOL
Süre :	36 Ay
Toplam Maliyet:	2,634,300 Euro
EC Fonu:	1,371,149 Euro

Tablo 3.4. Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemi Boyut ve Maliyetleri

	Minimum Boyut (MW _e)	Maliyet (Euro/kW _e)
Parabolik Çanak Sistemi	1	5000
Merkezi Kule Sistemi	10	3000
Parabolik Oluk Sistemi	50	3000

3.2.5. Katı Atıklardan Hidrojen Üretimi

Katı atıkların ve lağım pisliğinin gazlaştırılması ve hava veya oksijenle sentezlenmesiyle oluşan gazın hidrojene dönüştürülmesi yöntemidir. Bu yöntemle hem kentsel atık ve lağım pisliğinden kurtulmak hem de temiz yakıt olan hidrojene dönüştürülerek çevre temizliğine katkıda bulunmak mümkündür. İki yöntem üzerinde durulabilir: Birincisi çevrim prosesidir. Bu süreçte Texaco gazlaştırma ile gaz temizleme ve H₂ ayrıştırma birleştirilerek gerçekleştirilir. İkincisi ise lağım pisliği ve çamurun ürettiği metan karbon dioksit ve bazı ikincil gazlara elektrotlar boyunca elektrik şarj edilmesiyle metanın uzaklaştırılması ve yerine hidrojen gazının üretilmesi metodudur [İmalı, Z., 2003].

3.2.6. Magnetoliz Yöntemi

Elektrolizde elde edilen pil potansiyeli 2V'tur. Piller paralel bağlandığında bu değer biraz düştüğü, seri bağlandığında ise iki kat arttığı görülür. Hidroelektrik santrallerde üretilen yüksek voltajdaki AC elektrik akımının DC akıma dönüşümü sırasında %15 kadar enerji kaybı meydana gelir. Bu da maliyeti yükseltmektedir. Bunu engellemek için elektroliz düzeneğine mıknatıs eklenerek manyetik alan oluşturulur ve gerekli potansiyel farkının oluşturulması sağlanır [İmalı, Z., 2003].

Elektroliz için gerekli olan düşük voltajda yüksek akımın elde edilmesi için homopolar jeneratörler, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürme işlemini

yapar. Bu teknikte kullanılan metotlardan biri de manyetik alan içinde dönen disk metodudur. Elektrolit içine temas halinde dönecek şekilde yerleştirilen diskin iki ucu arasında gerekli potansiyel farkı oluşturularak elektroliz gerçekleştirilir. Bu manyetik alanı oluşturmak için süper iletken mıknatıslar kullanılır [İmalı, Z., 2003].

Bu yöntemde maliyet kullanılan mıknatısın fiyatına göre değişir. Fazla miktarda hidrojen üretmek için büyük mıknatıslar kullanmak gerekmektedir. Bu da maliyeti artırmaktadır. Düşük fiyatta büyük mıknatıslar kullanıldığında magnetoliz, elektrolize göre %10-15 civarında daha ucuza mal olur [İmalı, Z., 2003].

3.2.7. Magmaliz

Bu yöntemde bir tüp yardımıyla, bir volkana veya yeryüzüne yakın bir magmaya su buharı enjekte edilir. Magmada meydana gelen reaksiyon sonucu hidrojen elde edilir. Bir volkanda bulunan lav %10 FeO ve %1–2 FeO_{1,5} içerir. Bu bileşenler magma içinde erimiş olarak bulunmaktadır.



[İmalı, Z., 2003]

3.2.8. Radyoliz

Bu yöntemde su moleküllerinin, nükleer reaktörlerde üretilen yüksek enerjili partiküllerle çarpışması sonucunda su ayrıştırılır. Fakat bu yöntemde ayrılmış olan hidrojen ve oksijen atomları hemen birleşerek tekrar su oluşturduğundan verim %1 civarındadır [İmalı, Z., 2003].

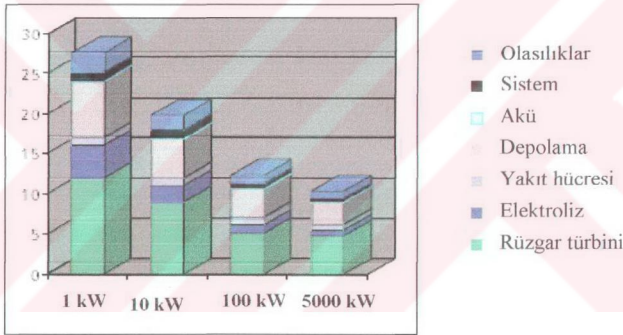
3.2.9. Rüzgar-Hidrojen Sistemi

Rüzgar enerjisi yenilenebilir bir enerji türü olduğundan, rüzgar-hidrojen enerji sistemi de günümüzde ağırlıklı olarak araştırılan sistemler arasındadır. Sistemde rüzgar enerjisinden üretilen elektrik, hidrojen üretimi için suyun elektrolizi için kullanılır. Bu sistemin tercih edilmesinde iki önemli etken bulunmaktadır. Birincisi çevresel etkenler, ikincisi ise ekonomik etkenlerdir. Çevresel etkenler, CO₂ emisyonu, global ısınma gibi zararlı etkilerinin bulunmamasıdır. Ekonomik sebepler ise yerel bir enerji kaynağı olması ve buna bağlı olarak kullanıldığı yöreyi ekonomik açıdan bağımsız kılabilmesidir [Altmann, M. et al, 2005].

Tablo 3.5. Farklı boyutlardaki Rüzgar-Hidrojen sistemlerinin ortalama maliyetleri

	Sistem boyutu (kW)	Maliyet (Euro/kW)
Mikro ölçekli Rüzgar-Hidrojen sistemi	1	12.000
Küçük ölçekli Rüzgar-Hidrojen sistemi	10	10.000
Orta ölçekli Rüzgar-Hidrojen sistemi	100	6.500
Büyük ölçekli Rüzgar-Hidrojen sistemi	5000	5.000

Tablo 3.5’de Avrupa’da yapılan rüzgar-hidrojen sistemi uygulamalarına göre maliyet analizi değerleri verilmiştir. Bu değerlerin gelişen teknolojiyle daha da düşmesi beklenmektedir.



Şekil 3.6. Avrupa için 2005 yılı rüzgar hidrojen sistemi yatırım değerleri [Altmann, M. et al, 2005]

Hidrojen talebi önemli miktarlara ulaştığında hidrojen üretimi için birkaç yüz MW'lık rüzgar gücüne gerek duyulacaktır. Ayrıca gerek elektrik hatlarının oluşturulması, gerekse hidrojenin boru hatlarıyla taşınması için kurulacak hatlar da ek maliyet gerektirecektir. Uzun vadede hesaplanan değerlere göre rüzgar-elektroliz sistemiyle hidrojen üretim maliyeti 3-3,75 \$/kg olarak hesaplanmıştır. Günümüzdeki hidrojen sıkıştırma işlemini de içeren sistem verimi 56-58 kWh/kg'dır. Daha uzun dönemde ise bu verimin 54 kWh/kg'a düşmesi beklenmektedir [Bartholomy, O., 2005].

3.2.10. Hidrojen Üretimi İçin Karadeniz'deki Hidrojen Sülfürün Kullanımı

Karadeniz, suboxic bölge denilen, eş zamanlı olarak hem düşük oksijen, hem de düşük hidrojen sülfür konsantrasyonuna sahip bir geçiş bölgesi bulunduran, bir içi denizdir. Karadeniz'in suboxic bölgesi yaklaşık 50m kalınlığında bir katmandır. Bu katman, deniz yüzeyinde başlayıp 200m derinliğe ulaşan oksijenlenmiş bölge ile anoksit bölge arasında yer alır. 200m derinlikten sonra oksijenin yerini hidrojen sülfür almaktadır. Hidrojen sülfür, dünyanın en zehirli maddesi olmakla birlikte, hidrojen üretimi için kullanıldığında geniş çapta enerji kaynağı olabilecek bir maddedir [Kapkin, S., 2005].

Bu denizin doğal dengesi korunmazsa ve iyileştirilmesi yönünde adımlar atılmazsa muhtemelen çevresel zararlara yol açacaktır. Önlemi alınmadığı takdirde derindeki hidrojen sülfür tutuşabilir duruma gelecektir. Tutuşup patlama olayı gerçekleşirse de bu gazın havaya karışması çevrenin kirlenmesine yol açacaktır. Hidrojen ve sülfür elde etmek için Karadeniz'deki bu doğal oluşumdan faydalanmak, büyük miktardaki deniz suyunu hidrojen sülfürden arındıracağı gibi büyük oranda hidrojen eldesi sağlayacaktır [Kapkin, S., 2005].

Hidrojen, çeşitli ayrıştırma metotları kullanılarak hidrojen sülfürün H_2 ve S^0 ayrıştırılmasıyla elde edilebilir [Kapkin, S., 2005].

Plazma prosesinde ayrıştırma için mikrodalga plazma kimyası kullanılır. Ayrıştırmada yeniden H_2S oluşumunu azaltmak için yerinde yanan alçak basınç yağmurlama yöntemi ve sonrasında ürünleri hızla soğutma yöntemi kullanılır. Rafineri uygulamaları ve doğalgaz üretiminde oluşan tipik asit-gaz akışındaki oksijen ve karbondioksit konsantrasyonuyla yapılan deneyler, önerilen prosesle bu bileşenlerin uyumluluk gösterdiğini kanıtlamıştır. İlk ekonomik değerlendirmeler göstermiştir ki, plazma kimyasal proses uygulaması geleneksel sülfür geri dönüşüm teknolojisinden çok daha ucuz ve kükürt emisyonu çok daha düşük bir prosestir [Kapkin, S., 2005].

Fotokimyasal reaksiyonlar, kimyasal reaksiyonları oluşturmak için, solar spektrumdan ultra-viyole ışığı absorblayan fotokatalistleri kullanır. Fakat bu proses, ultra-viyole ışığın kullanılması çok pahalı olduğundan, H_2S 'den hidrojen elde etmek için etkin bir yöntem olarak görülmemektedir [Kapkin, S., 2005].

Uzun zamandan beri, H_2S 'ün yüksek sıcaklıklarda (900-1100 K) termal bozunma sonucu H_2 ve doğal sülfüre dönüşebileceği bilinmektedir. H_2S , katalitik olarak H_2 , sülfür ve kataliste ayrışabilir. Uygulama koşulları ve katalist tipleri üretilen hidrojen miktarını ve prosesin ekonomisini önemli ölçüde etkilemektedir [Kapkin, S., 2005].

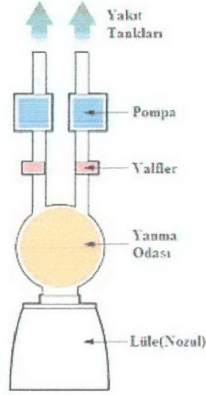
3.3. Hidrojen Enerjisi Teknolojisinin Uygulama Alanları

3.3.1. Uzak Programlarında Hidrojen Yakıtının Kullanımı

Uzak programlarında da hidrojen kullanımının yeri büyüktür. Amerika'nın uzak programlarına enerji sağlamak amaçlı uzak mekiklerinde hidrojen yakıt hücresi kullandığı bilinmektedir. Bunun yanı sıra uzak mekiği roketlerinde de yakıt olarak hidrojen kullanılmaktadır [www.istanbul.edu.tr, 2005].

3.3.1.1. Roket Yakıtı Olarak Hidrojen Kullanımı

Roketler Newton'un etki-tepki ilkesine göre çalışır. Yakıtın yanmasıyla oluşan gazlar, bir lüle ile hızlandırılır ve roketin çalışmasını sağlar. Roketler sıvı yakıtlı, katı yakıtlı olmak üzere ikiye ayrılır. Sıvı yakıtlı roketlerde kaynama noktasındaki yoğunluğunun en küçük ve özgül itme kuvvetinin en yüksek olması sebebiyle yakıt olarak sıvı hidrojen kullanılır. Sistem hidrojenin sıvı halde tutulup yanma odasına iletilmesi için özel dizayn edilmiştir. Bu sistemde hidrojen yakıt, oksijen ise oksitleyici olarak kullanılıp yanma sağlanır. Saf hidrojen peroksit ve kerozen gibi maddelerin kullanımı da mümkündür [www.istanbul.edu.tr, 2005]. Burada düzenek şöyledir:



Şekil 3.7. Roket Yakıt Sistemi [www.bilim.org, 2005]

3.3.2. Otomobillerde Hidrojen Kullanımı

İnsanoğlunun temel ihtiyaçlarından biri olan ulaşım, gelecek çağlara damgasını vuracak olan yenilenebilir enerjiye dayanmaktadır. Günümüzde 500 milyondan fazla yolcu aracı olmak üzere 700 milyonun üzerinde motorlu taşıt bulunmaktadır ve bireysel taşıt kullanımına olan talep gün geçtikçe artmaya devam etmektedir [Pehr, K., et al, 2001].

Fosil enerji kaynağı olan ham petrol kullanımının azalması için, yenilenebilir enerji kaynakları temel alınarak üretilebilir ve motorlu araçlarda kullanılabilir yakıt türlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Gelecekte taşınabilir enerji elde edilmesinin sağlanmasında, güneş enerjisinden elde edilen elektriğin suyun elektroliziyle hidrojen üretimi yönteminde kullanılması önemli bir seçenek olarak görülmektedir. Oksijenle yandığında sadece su buharı oluşması hidrojeni temiz bir enerji taşıyıcısı kılmaktadır. Çevresel şartlarda hidrojen gaz halinde bulunmaktadır ve bu özelliğinden dolayı çevre dostu özellikleri optimum düzeydedir. Öte yandan depolama ve taşıma teknolojileri diğer yakıt türlerine göre çok daha zordur [Pehr, K., et al, 2001].

Enerji kaynaklarının üretimi ve dünya çapında dağıtımı için geniş bir altyapı çalışması yapılması gerekmektedir. Örneğin Almanya'da yaklaşık 10.000 taşıma tankeri ile beslenen 17.000 dolum istasyonu vardır. Bu yüzden geniş alanları

kapsayacak yeni bir enerji taşıma sistemi ancak pilot projelerle adım adım hayata geçirilebilir [Pehr, K., et al, 2001].

Enerji kaynaklarındaki geniş kapsamlı değişiklikleri yapılandırmak için geçiş stratejileri gereklidir. Doğalgaz hidrojene geçiş için bir geçiş stratejisi olarak görülmektedir. Doğalgaz hidrojene benzer fiziksel ve kimyasal özellikler göstermekte ve bünyesinde en yüksek atomik hidrojeni bulunduran madde olarak bilinmektedir. Günümüzde dünya genelinde 1 milyonun üzerinde araç doğalgazla çalışmaktadır. BMW 1995'ten beri ürünleri içerisinde doğalgazla çalışan araç türlerini de sunmaktadır. Bu araçlar diğer fosil yakıtla çalışan araçlara göre karbon monoksit emisyonu düşük araçlardır [Pehr, K., et al, 2001].

Hidrojenin doğalgaz boru hatlarında taşınması dışında, çalışmalar sıkıştırılmış gaz depolama tanklarında taşınması üzerine yoğunlaştırılmıştır. Kompres doğalgaz tankını, izole edilmiş düşük basınç depolama tankı ile değiştirerek doğalgaz ile çalışan araçların menzili üç katına çıkarılabilir. Bu tip doğalgaz araçları BMW tarafından test edilmektedir [Pehr, K., et al, 2001].

Araçlarda kullanılacak hidrojenin depolanması için kullanılabilecek üç yöntem vardır. Bunlar sıkıştırılmış gaz olarak, metal hidrürlerde ve sıvı halde depolama olarak sıralanır. Yapılan araştırmalar sonucunda araçlar için hidrojen depolama yöntemi olarak metal hidrürlerde depolamaya ağırlık verilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır [www.antimai.org, 2004].

Sıvı hidrojenin birim kütesinin ısı değeri 141,9 MJ/kg 'dır. Benzinin birim kütesinin ısı değeri ise 47,4 MJ/kg'dır. Bu değer sıvı doğalgazda 50 MJ/kg ve LPG'de 48,8 MJ/kg 'dır. Sıvı hidrojenin birim hacminin ısı değeri 10,2 MJ/m³'tür ve bu da benzinin %28'i kadardır. Bu değer doğalgazın ise %32,5'i kadardır. Metal hidridlerin kütleli enerji içeriği 2-10 MJ/kg ile sıvı hidrojene göre çok küçükken, hidridlerin hacimsel enerji içeriği 12,6-14,3 MJ/m³ ile gaz ve sıvı hidrojenen büyüktür [Ültanır, M.Ö., 1998].

Hidrojen diğer otomobil yakıtlarıyla karşılaştırıldığında üstün özellikler göstermektedir. Diğer yakıtların kullanımında görülen karışımın zayıf olması, buharlaşamama problemi ve soğuk yüzeylerde yoğunlaşma problemlerine hidrojen

kullanımında rastlanmaz. Hidrojen çok düşük sıcaklıklarda bile ilk harekette problem çıkartmaz. Hidrojenin alev hızı yüksek ve alev cephesi geniştir. Tutuşma açıklığı geniş olduğundan farklı hava fazlalık katsayılarında çalıştırılabilme esnekliği sağlar. Hidrojenle çalışan bir içten yanmalı motorun NO_x emisyonu benzinle çalışan bir motorunkinden 200 kat daha azdır. Ayrıca benzine %5 oranında hidrojen eklendiğinde bile NO_x emisyonunu %30-40 azaltmak mümkün olabilmektedir [Ültanır, M.Ö., 1998].

Hidrojen yanma ısısı yüksek bir yakıttır. Ayrıca zehirleyici etkisi yoktur. Yanması sonucunda ise sadece su buharı ortaya çıkar. Sentetik yakıtlar arasında en temiz yakıt hidrojendir [Veziroğlu, T.N., 1981]. Yanması sonucunda partikül madde oluşmadığından bujiler kirlenmez. Düşük alev parlaklığı nedeniyle radyasyon ile olan ısı kaybının diğer yakıtlara göre daha az olmasını sağlar. Böylelikle diğer yakıtlara göre daha fazla verim alınabilir. Alev hızının yüksek olması buji ateşlemesinden sonra yakıt karışımının diğer noktalarda tutuşmasını önlemektedir. Hidrojenin kendiliğinden tutuşma sıcaklığı 1 atm basınçta 847-867 K gibi yüksek bir değerdedir. Oktan sayısının da yüksek olması karbüratörlü ve otto motorlarda daha çok tercih edileceğini göstermektedir [Oral, E. ve Çelik, V., 2005].

Motorlarda hidrojen kullanımında, motora hacimsel olarak daha fazla hidrojen gönderilmektedir. Bu durumda yakıt ve karışım kütlesi daha az olduğu için yanma durumunda daha az basınç olur ve aynı enerjiyi üretmek için daha fazla hidrojene gerek duyulmaktadır. Bu yüzden hidrojen yakıtının kullanılacağı motorun havanın silindire normalden daha yüksek basınçta pompalanıp verim ve gücün artırılacağı turbo şarjlı motorlar olması gerekmektedir [Çetinkaya, M. ve Karaosmanoğlu, F., 2003].

Buji ateşlemeli motorlarda hidrojen ve hava karışımı, motorun yanma odasında veya emme manifoldunda hazırlanmaktadır. Hidrojenin harici karışım hazırlama yöntemiyle düşük basınçta hava ile karıştırılması, bir hava karıştırıcı içinde gerçekleştirilebilmektedir. Motorun emme manifolduna yine düşük basınçta sürekli veya aralıklı olarak gönderilebilmesi mümkündür. Bu da yüke göre karışım ayarı yapılabilmesini olanaklı kılar ve bu durumda gaz keleşine ihtiyaç duyulmayacağından motordaki kısılma kayıpları da ortadan kalkmaktadır [Soruşbay, C. ve Arslan, E., 1988].

3.4. Hidrojen Yakıtının Özellikleri

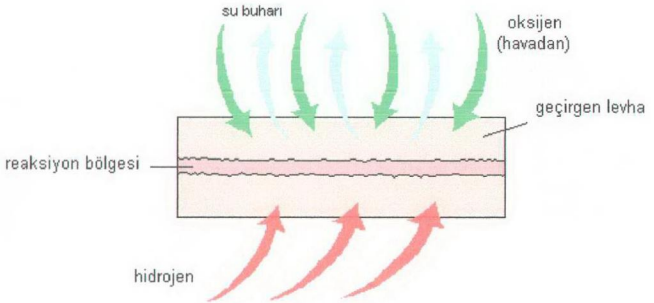
Hidrojen yakıtı fosil yakıtlara göre üstün özellikler taşımaktadır. Bu özellikleri şöyle sıralayabiliriz:

3.4.1. Motor Yakıtı Olma Özelliği

Hidrojen fosil yakıtların kullanıldığı her yerde yakıt olarak kullanılabilir. Ulaşım, ısıtma, elektrik üretiminde hidrojen yakıtından yararlanılabilir. Hidrojen, alevli yanmaya, katalitik yanmaya, hidritleşmeye, kimyasal dönüşüme, yakıt hücresinde kullanılarak elektrik üretimine ve buhar eldesine uygun bir yakıttır. Fosil yakıtlar ise yalnızca alevli yanmaya uygundur [Ültanır, M.O., 1998].

İçten yanmalı motorlarda kullanılan yakıtların belli özelliklere sahip olması gerekmektedir. Öncelikle yakıt kolaylıkla ve güvenli olarak taşınabilmelidir. Sanayide, evlerde, taşıtlarda kullanılabilir. Temiz, güvenli ve hafif olmalı, birim kütle başına düşen ısı değeri yüksek olmalıdır. Isı, elektrik ve mekanik enerjiye dönüşümünün kolay olması da aranan özelliklerindendir. Ayrıca enerji üretim verimi yüksek ve ekonomik bir yakıt olmalıdır [Oral, E. ve Çelik, V., 2005].

Tüm bu özellikleri karşılayan bir yakıt bulmak pek mümkün değildir. Fakat hidrojen günümüzde bu özelliklere en yakın yakıt olarak görülmektedir [Oral, E. ve Çelik, V., 2005].



Şekil 3.8. Hidrojenin katalitik yanması [Barbir, F., 1998]

Hidrojen üzerinde yapılan yakıt ve yanma ürünlerinin zehirliliği, ateşleme ve patlama enerjisi, alev faktörü ve difüzyon katsayısı incelemeleri diğer yakıtlara göre çok daha olumlu sonuçlar vermiştir. Benzinin emniyet faktörü 0,53, metanın emniyet faktörü 0,80, hidrojenin ise 1'dir. Hidrojenin bu yakıtlara göre yanma tehlikesi çok azdır [Ültanır, M.O., 1998].

Tablo 3.6. Hidrojen ve bazı yakıtların güvenlikle ilgili özellikleri [Baykara, Z.S., 2003]

Özellik	Hidrojen	Metan	Metanol	Benzin	Jet yakıtı
Kaynama sıcaklığı (K)	20,3	112	338	---	---
Buharlaşma ısısı (MJ/kg)	0,45	0,51	1,1	---	---
Özgül ağırlık (kaynama)	1,03	1,38	---	---	---
Özgül ağırlık	0,07	0,55	---	---	---
Difüzyon katsayısı (cm ² /s)	0,63	0,2	---	0,08	---
Havayla tutuşma sınırı (%hacim)	4,9-75	5,3-15	6,0-37	1,5-7,6	0,8-5,6
Havayla patlama sınırı (%hacim)	18-59	6,3- 14	---	---	---
Ateşleme sıcaklığı (K)	850	807	700	530	522
Ateşleme enerjisi (MJ)	20	300	---	250	---
Alev sıcaklığı (K)	2400	2190	---	---	---
Alev hızı (m/s)	2,75	0,37	0,41	<0,3	---
Söndürme mesafesi (cm)	0,06	0,23	---	>52,0	---
Alev yayınlılığı	0,10	1,00	---	---	---
Yanma ısısı (MJ/kg)	120	50	20	44	43
Yanma ısısı (GJ/m ³)	8,5	21	16	31	34

Tablo 3.6'de hidrojen ve bazı yakıtların güvenlikle ilgili karşılaştırmalı bazı özellikleri verilmiştir. Tablo 3.7'de de görüleceği gibi, hidrojen birçok özelliği açısından benzin ve metana göre güvenlik sıralamasında birinci gelmektedir.

Yüksek basınç ve sıcaklıktaki hidrojenin karbon çeliğiyle temas etmesi sonucunda aşındırıcı etkisi vardır. Yüksek basınçlı hidrojenasyon reaktörlerinde hidrojenin aşındırıcı etkisinden korunma amaçlı krom-vanadyumlu çelikler kullanılır. Bunun sebebi kromun hidrojen geçirgenliğine dayanıklı olmasıdır [İmal, Z., 2003].

Tablo 3.7. Bazı yakıtların güvenlik sıralaması [Ültanır, M.O., 1998].

Özellikler	Yakıt sıralaması		
	Benzin	Metan	Hidrojen
Yakıt Toksisitesi	3	2	1
Yanmanın toksisitesi (CO, SO_x, NO_x, HC, PM)	3	2	1
Yoğunluk	3	2	1
Diffüzyon katsayısı	3	2	1
Özgül ısı	3	2	1
Tutuşma limiti	1	2	3
Tutuşma enerjisi	2	1	3
Tutuşma sıcaklığı	3	2	1
Alev sıcaklığı	3	1	2
Patlama enerjisi	3	2	1
Alev yayma yeteneği	3	2	1
Toplam	30	20	16
Güvenlik faktörü	0,53	0,8	1

3.4.5. Maliyet

Yakıtlarda kullanılan efektif maliyet terimi içerisinde çevreye verdiği zararı da katarak bulunan maliyettir. Bu hesapta yakıtın birim miktarının çevreye verdiği zarar da yakıt maliyetine katılmaktadır. Burada hidrojen ve fosil yakıtları karşılaştırdığımızda hidrojenin efektif maliyetinin 13,2 ABD\$/GJ, benzininkinin ise 21,4 ABD\$/GJ olduğu görülür. Bu değer neredeyse hidrojeninkinin 2 katıdır. Yakıt hücreli otomobiller ele alındığında hidrojenin kg başına maliyeti 2,35-7 ABD\$ olarak verilmektedir [Ültanır, M.O., 1998], [Momirlan, M. and Veziroğlu, T.N., 2002].

Yalnızca üretim maliyetini içeren iç maliyet incelendiğinde ise en düşük maliyetli hidrojen kömürden elde edilmektedir. Bu da benzin maliyetinden daha ucuzdur. Çevre maliyeti göz önüne alınmadan bir hesaplama yapıldığında ise hidrojen, doğal gazdan 1,5-3,7, petrol ürünlerinden 1,3-3,5, kömürden ise 4,7-5,8 kat daha pahalı görünür. Ancak bu hesaplamalarda hidrojenin kütleli üretimi

yapılmadığı için sonuçlar görecelidir [Ültanır, M.O., 1998]. Tablo 3.8’te çeşitli hidrojen üretim yöntemleri ve depolama şekilleri için maliyet analizi verilmiştir.

Tablo 3.8. Hidrojen üretim ve depolama toplam maliyetleri [www.taek.gov.tr, 2004]

Maliyet (€/kW-saat)		Depolama Yöntemi		
		Sıkıştırılmış gaz	Sıvılaştırılmış hidrojen	Metal hidrit
Hidrojen Üretim Yöntemi	Buhar-Metan Yeniden Oluşturma	15,54	10,46	76,16
	Kömür Gazifikasyonu	17,46	12,38	78,08
	Hidrokarbonların Kısmi Oksidasyonu	16,83	11,75	77,45
	Biyokütle Gazifikasyonu	59,59	54,51	120,21
	Elektroliz	20,71	15,63	81,33
	Güneş Enerjisi			
	Elektroliz	36,29	31,21	96,91
	Yüksek sıcaklıkta elektroliz	33,29	28,21	93,91

Not: Depolama sistem verileri, 1083 MW-saatlik büyüklüğe göre ve 30 günlük depolama süresi için değerlendirilmiştir.

Tablo 3.8’de hidrojen üretim ve depolama seçeneklerinin farklı kombinasyonlardaki maliyet verileri incelenmiştir. Tabloda da görüldüğü gibi fosil yakıtlarda hidrojen üreten sistemlerin maliyetleri diğer sistemlere göre daha düşüktür. Fakat en pahalı yöntemlerden biri olarak dikkat çeken yüksek sıcaklıkta elektroliz/metal hidrit üretim/depolama kombinasyonu en verimli ve çevre dostu sistemlerden biri olarak dikkat çekmektedir. Gelişen teknolojiyle bu maliyetlerin düşürülmesi beklenmektedir.

Tablo 3.9. Hidrojenin genel özellikleri [Oral, E. ve Çelik V., 2005]

		Birimi
Molekül ağırlığı	2,016	kg/kmol
Yoğunluğu	0,0838	kg/m ³
Üst ısı değeri (kütlesel)	141,9	MJ/kg
Üst ısı değeri (hacimsel)	11,89	MJ/m ³
Alt ısı değeri (kütlesel)	119,9	MJ/kg
Alt ısı değeri (hacimsel)	10,05	MJ/m ³
Kaynama sıcaklığı	20,3	K
Sıvı yoğunluğu	70,8	kg/m ³
Kritik noktadaki sıcaklık	32,94	K
Kritik noktadaki basınç	12,84	Bar
Kritik noktadaki yoğunluk	31,40	kg/m ³
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı	867–874	K
Havada tutuşma limitleri	4,9–75	% hacimsel
Havada stokyometrik karışım	29,53	% hacimsel
Havadaki alev sıcaklığı	2318	K
Difüzyon katsayısı	0,61	cm ² /s
Özgül ısı	14,89	KJ/kgK

4. HİDROJEN İÇİN DEPOLAMA SEÇENEKLERİ

Bu bölümde hidrojen depolama yöntemleri olarak karyojenik sıvı halinde, basınçlı gaz halinde, metal hidritlerde, nanotüplerde, dağıtım sisteminde, alanatlarda, alkali metal hidrürlerde, metanol olarak, amonyak olarak depolama yöntemleri ve hidrojenin taşınması konularına değinilecektir.

4.1. Karyojenik (Dondurulmuş) Sıvı Halinde Depolama

Bu teknikte hidrojen, atmosfer basıncında 20 K'de, iyi izole edilmiş tanklarda depolanmaktadır. Bu yöntemle sıvılaştırılan hidrojen, eşit ağırlıktaki gazoline göre 3 kat daha fazla enerji içerir ve eşdeğer enerji içerdiği durumda da 2,7 kat daha fazla hacim gerektirir. Bu sistem ağırlıkça %16 hidrojen depolar. Bu yöntemle hidrojen sıvılaştırmak için yakıtın enerjisinin %25 kadarı harcanır. Ayrıca sıvı halde tutmak için pahalı ekipman ve ek enerji gerekmektedir. Tank izolasyonuna rağmen yakıt ısısı tanka sızmaktadır. Bu da hidrojenin buharlaşmasına neden olmaktadır. Fakat basınçlı tank kullanılarak bu dezavantaj ortadan kaldırılabilir [Ün, Ü.T., 2003].

Hidrojeni sıvı olarak depolamak için hidrojen taşıma tanklarına benzer tanklar kullanılmaktadır. Kennedy Uzay Merkezinde kullanılan hidrojen depolama tankı buna örnek olarak verilebilir. Kennedy Uzay Merkezinde 3217m³ hacminde bir tank bulunmaktadır. Hidrojenin sıvı olarak depolanması genellikle 1514m³ hacminde vakum-izole küresel tanklarda yapılmaktadır [Dinçer, I., 2002].

Opel'in geliştirdiği HydroGen I saf hidrojenle çalışmaktadır. Saf hidrojen - 253°C'deki sıvı hidrojen tankında depolanmaktadır. Paslanmaz çelikten yapılmış olan tank, arasında süper vakumlu izolasyon malzemesi bulunan çift duvarlı silindirik şeklinde dizayn edilmiştir. Ek olarak valflerin ve ısı değiştiricilerin kontrolünün sağlandığı bir kutu, eklenmiştir [Nolte R., 2001].

Tank, 71L hacminde, 5 kg sıvı hidrojen depolayabilmektedir. Tankın kendi ağırlığı 50 kg'dır. Toplam tank ise 90 kg ağırlığında ve 130L hacmindedir. Araç tanktaki yakıtla 400 km yol alabilmektedir [Nolte R., 2001].

Otomotiv firmalarının hidrojen üzerinde yaptıkları araştırmalar hidrojenin tanklarda depolanmasına yöneliktir. Fakat hidrojenin tanklarda gaz halinde depolanması, tankın ağırlığı da göz önünde bulundurulduğunda cazip görünmemektedir. Bu yüzden sıvı halde depolama üzerinde durulmaktadır. Ancak hidrojenin sıvılaştırılması yüksek basınç altında -253°C 'lik bir sıcaklık gerektirdiğinden hidrojenden elde edilecek enerjinin $\frac{1}{4}$ 'ü kadar bir enerji, sıvılaştırılması için kullanılmaktadır. Bu konu ile ilgili iyileştirme çalışmaları devam etmektedir [Öztürk, T. ve Güvendiren, M., 2003].

4.2. Basınçlı Gaz Halinde Depolama

Hidrojenin basınçlı gaz halinde depolanması oda sıcaklığında, yüksek basınca dayanıklı tanklarda yapılmaktadır. Bu depolamada tankın ağırlığına ve tipine bağlı olarak ağırlıkça %1-7 hidrojen depolanabilmektedir. Ağırlıkça daha hafif, daha dayanıklı ve daha çok hidrojen depolayabilen tankların maliyetleri de yükselmektedir. 35 MPa basınçta sıkıştırılmış hidrojen elde etmek için enerji içeriğinin %20 kadarı harcanır ve depolama tankı hacmi büyüktür. Bu depolama sistemi, depolama ağırlığının önemli olmadığı sabit sistemlerde veya kısa mesafede kullanılan araçlarda uygundur [Ün, Ü.T., 2003].

4.3. Metal Hidritlerde Depolama

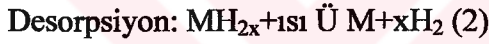
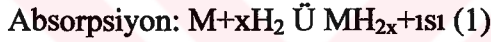
Hidritler soğutulduğunda hidrojeni emme, ısıtıldığında ise serbest bırakma özelliğine sahip metallerdir. Hidrojen gazı metal hidrit tarafından sünger gibi çekilerek metallerin atomları arasındaki boşluğa depolanır [Ün, Ü.T., 2003].

Bu sistemde kullanılan hidritler; titanyum alaşımları (özellikle demir-titanyum), paladyum alaşımları, zirkonyum alaşımları, titanyum-zirkonyum-vanadyum-nikel alaşımları, titanyum-zirkonyum-vanadyum-demir-krom-mangan alaşımları, magnezyum-nikel alaşımlarıdır [Ültanır, M.O., 1998].

Metal hidritlerde depolama, hidrojen depolama için güvenli bir yöntemdir. Birçok metal ve alaşımlar yüksek miktarda hidrojeni absorbe edebilme özelliğine sahiptir. Metal-hidrojen bağı, düşük basınçta yüksek hacimsel yoğunlukta hidrojen depolamaya yardımcı olur. Bazı metal hidritlerin içerdikleri hidrojen yüzdesi düşüktür. Örneğin FeTiH_2 bünyesinde ağırlığının %1,9'u, LaNi_5H_7 %1,6'sı kadar

hidrojen depolayabilir. Fakat Li, Al ve Mg gibi hafif metal hidritler yüksek hidrojen depolama kapasitesine sahiptir. Bu yüzden otomotiv uygulamalarına uygun metal hidritlerdir. Yapılan araştırmalarda nanokristal hidritlerin adsorbsiyon ve desorbsiyon sürelerinin diğer materyallere göre çok daha düşük olduğu bulunmuştur. [Dornheim, M. Et.al., 2005].

Metal hidrit sistemler, güvenilir ve az yer kaplayan sistemlerdir. Buna rağmen doldurma basınçları düşük ve hacimsel yoğunlukları yüksektir. Ancak ağırlıkça %7 hidrojen depolanabilmektedir. Metal hidrit, diğer yöntemlerin aksine yeniden doldurmada çok az enerji gerektirmektedir. Ancak yakıtın dışarıya salınımı için enerji harcanır. Bu enerji düşük sıcaklıktaki depolamada yakıt hücresinin veya motorun atık ısısından elde edilebilir. Yüksek sıcaklık metal hidrit depolamasında metalden hidrojeni açığa çıkarmak için aracın enerji tüketiminin yarısı harcanır. Bu sistemde tepkimeler:



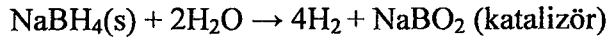
şeklindedir. Burada M, metal, element veya metal alaşımı temsil etmektedir [Aydemir, S., 1998].

Depolama ve geri bırakım sağlaması açısından oluşturulan hidrürün çok kararlı olmaması esas alınmaktadır. Bu şekilde hidrojen depolayan sistemler temel olarak AB₅, AB, AB₂, AB₃+A₂B₇ ara metalleri ve Mg esaslı alaşımlar olarak sıralanabilir. AB₅ ve AB arametalleri (örneğin, sırası ile LaNi₅ ve Fe-Ti) birkaç barlık basınçta ve oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda hidrojen depolayabilmektedir. Özellikle AB₅ zehirlenmeye karşı iyi bir direnç göstermekle beraber, depolayabildikleri hidrojen miktarı % 1-2'yi geçmemektedir. [Öztürk, T. ve Güvendiren, M., 2003].

Kullanılan metal hidrür sistemleri arasında ağırlıkça %7.6 hidrojen depolama kapasitesine ve düşük yoğunluğa sahip olan magnezyum en verimli olanıdır. Fakat reaksiyonun 400-450°C'de gerçekleşmesi ve yavaş olması kullanılmasını engellemektedir. Magnezyum kullanımında karşılaşılan olumsuzlukları engellemek için mekanik öğütme yöntemi kullanılmaktadır. Öğütme saf olarak yapılabileceği gibi metal (V, Ti, Ni, Cu, Fe gibi), metal oksit (CuO, Al₂O₃, V₂O₅ gibi), arametal (LaNi₅, FeTi gibi) ilaveler ile de yapılabilmekte ve bu şekilde katkılı öğütme daha olumlu sonuç vermektedir [Öztürk, T. ve Güvendiren, M., 2003].

Bor hidritler kristal bir yapıya sahip oldukları için hidrojeni kolay bir şekilde geri verme özelliğine sahiptir. Kafes yapıları hidrojen depolamaya uygundur. Yakıt olarak bor hidritlerin kullanıldığı sistemlerde hidrojen koparılıp yakıldıktan sonra bor kirletici unsur oluşturabilmektedir. Yakıt hücresi sisteminde kullanımında ise bor bir atık değil, tekrar tekrar kullanılan bir depolayıcı görevi görür. [www.biltek-tubitak.gov.tr, 2004].

Bor esaslı depolamada katı halde ağırlıkça %10,5 hidrojen içeren sodyum bor hidrür (NaBH_4) esas alınmaktadır. Bu sistemde hidrür yaklaşık 500°C 'ye kadar kararlılığını korumaktadır. Sodyum bor hidrürle yapılan çalışmalarda diğer çalışmalardan farklı olarak sıvı halde kullanım esas alınmıştır. Reaksiyon şöyle oluşmaktadır:



Bu reaksiyonda görüldüğü gibi reaksiyon sonucu oluşan hidrojen miktarı hidrür şeklindeki hidrojen miktarının iki katı olmaktadır [Öztürk, T. ve Güvendiren, M., 2003]

Tablo 4.1 Bazı Hidrojen Depolama Sistemleri İçin Enerji ve Maliyet Verileri [Baykara, Z.S., 2003]

Depolama Yöntemi	Enerji Gereksinimi		Maliyet (\$/J)
	(MJ/kg)	(GJ/m ³)	
Sıvı Hidrojen (20 K)	120	8	33,33
Gaz Hidrojen(15000kN/m ²)	1,5	2	0,42
Hidrürler (ortalama)	2	3	0,55
Mikrokürecikler(50kgH ₂ /m ³)	5,3	3,5	1,47

Yukarıdaki tabloda bazı hidrojen depolama sistemleri için maliyet verileri bulunmaktadır. Bu tabloya göre 33,33 \$/J ile 20K'de sıvı hidrojen depolama yöntemi maliyeti en yüksek olan yöntemdir. Sıkıştırılmış gaz hidrojen depolama yönteminin ise 0,42\$/J ile en az maliyetli yöntem olduğu görülmektedir. İkinci az maliyetli depolama sistemi olarak 0,55 \$/J maliyete sahip hidrürler dikkat çekmektedir.

4.4. Nanotüplerde Depolama

Hidrojeni karbon nanotüplerde depolamak mümkündür. Çapları birkaç nanometre veya 10-20 nanometre ve boyları ise mikron mertebesinde olan karbon nanotüpler grafit tabakaların tüp şekline dönüşmüş hali olarak tanımlanabilir. Nanotüpler tek duvarlı veya çok duvarlı olarak üretilirler. Alkali ilaveli nanotüpler (Li-K) gibi çeşitli ilavelerle oluşturulan nanotüpler bulunmaktadır. Hidrojenin nanotüplerde depolanması fiziksel ve kimyasal olarak iki şekilde olmaktadır. Fiziksel depolama zayıf Van der Waals etkileşimi sonucunda olmaktadır ve hidrojen geri alınıp sisteme tekrar aynı miktarda yüklenebilmektedir. Kimyasal depolama ise kovalent bağlarla yapılmakta ve ancak çok yüksek sıcaklıklarda hidrojenin geri alınması mümkün olmaktadır. Yapılan bazı çalışmalar karbon nanotüplerde ağırlıkça %4-14 hidrojen depolanabildiğini göstermiştir [Öztürk, T. ve Güvendiren, M., 2003].

Karbon nanotüplerde hidrojen depolama kapasitesi kullanılan nanotüpün cinsine (tek duvarlı veya çok duvarlı), tüplerin kapalı veya açık olmasına, tüp ölçüsüne ve tüp yüzeylerinin aktifliğine göre değişiklik göstermektedir. Alkali metal ilaveli çok duvarlı nanotüplerde yapılan bir çalışmada 380°C'de atmosferik basınçta ağırlıkça %20 hidrojen depolanmıştır [Öztürk, T. ve Güvendiren, M., 2003].

Yapılan bir çalışma, tek duvarlı Be katkılı, 120 karbon atomu bulunan Be@C₁₂₀'nin hidrojen depolamada kullanılabileceğini göstermiştir. Bu sistemler kararlı fakat endotermik sistemlerdir. (7H₂ + Be)@C₁₂₀ sistemi, oluşum sıcaklık değeri en düşük sistem olarak görülmüştür [Türker, L., 2004].

Tablo 4.2 Hidrojenin Metal, Karbon ve Grafit İçinde Depolanması [Baykara Z.S., 2003]

Malzeme	Hidrojen Kapasitesi (%, ağırlık olarak)	Sıcaklık (K)	Basınç (M Pa)
Mg (% 8)	2	573	0,1
Ca (% 5)	2	1073	0,1
Nanoyapılı karbon	1	300	10
Nanoyapılı grafit	7,4	600	
Nanoyapılı Mg-Ni-RE	5-5,5	373	3

Tablo 4.2’de farklı hidrojen depolama seçenekleri için verilen değerlerde nanoyapılı grafit ve nanoyapılı Mg-Ni-RE içinde depolanması yöntemi ağırlıkça daha fazla hidrojen depolaması açısından dikkat çeken bir yöntemlerdir.

Nanotüplerde depolamada kullanılan diğer bir malzeme de bor nitrürdür. Bor nitrürde depolama nanotüp, nanokapsül veya nanokafeslerde yapılabilir. Yapılan çalışmalar bor nitrürde ağırlıkça %3 hidrojen depolamanın mümkün olduğunu göstermiştir [Öztürk, T. ve Güvendiren, M., 2003].

4.5. Dağıtım Sisteminde Depolama

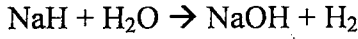
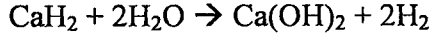
Hidrojeni dağıtım sisteminde sıvı veya gaz olarak depolamak mümkündür. Doğalgazın tükendiği yeraltı mağaralarında hidrojen gaz olarak depolanabilmektedir. Hidrojen diğer gazlara göre sızıntı özelliği daha fazla olan bir gazdır. Fakat bu yöntemle depolamada sızıntı yönünden bir problem oluşmamaktadır. Buna örnek olarak hidrojen karışımli şehir gazı kullanan Fransa verilebilir. Fransa’da şehir gazının yeraltı mağaralarında depolanması başarı ile sonuçlanmıştır. Bu yöntemde gazın mağaralarda depolanıp, daha sonra dışarıya pompalanması için büyük miktarda enerji harcamak gereklidir. Bu nedenle depolamayı alternatif yüksek basınç tanklarında gerçekleştirmek gerekmektedir [Dinçer, I., 2002].

4.6. Alanatlarda Depolama

Alanatlarda hidrojen depolama metal hidrürlerde olduğu gibi toz esasli yapılmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalar sodyum alüminyum hidrür üzerinde yoğunluk kazanmaktadır. Sodyum alanatta ağırlıkça %7,4 hidrojen depolanabilmektedir. Ancak oluşan alanattan hidrojenin çekilmesi birkaç aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşamada 185°C gibi düşük bir sıcaklıkta hidrojen serbest kalabilmekte fakat verim %3,7 olmaktadır. Sodyum hidrürün ayrılması esasli son aşama ise yüksek sıcaklıklar gerektirmekte ve pratikte kullanım dışı olarak değerlendirilmektedir. Son birkaç yılda yapılan çalışmalarda sodyum alanatın karbon ile öğütülmesiyle 80-140°C’de ağırlıkça %2,5–3 hidrojen depolanabilmiştir. Ayrıca 150-180°C’de geri dönüşümlü olarak %4,5-5 hidrojen depolayabilmek mümkün olmuştur [Öztürk, T. ve Güvendiren, M., 2003].

4.7. Alkali Metal Hidrürlerde Depolama

Geri dönüşümlü metal hidrürlerin yerine tekrar doldurulamayan alkali metal hidrürler kullanılabilir. Bu bileşikler suyla reaksiyona girince hidrojeni serbest bırakırlar. En çok kullanılan alkali metal hidrürler CaH_2 ve NaH 'dir. Reaksiyonları aşağıdaki gibi gerçekleşmektedir:



Bu tip depolamanın avantajı ağırlık bakımından yüksek hidrojen yüzdeleriyle depolama yapılmasıdır. Na ve Ca gibi düşük maliyetli ve çok bulunan elementlerle depolama sağlanır. Alkali metal hidrürlerin bir takım dezavantajları vardır. Bu bileşiklerin en büyük dezavantajı, tek kullanımlık olmalarıdır. Korozyona neden olan ve istenmeyen hidroksit ve su karışımı ortamdan atılmalıdır. Gerçekte gerekli su hacmi teorik olarak gereken su hacminden daha fazladır. Çünkü hidroksitler su moleküllerini kendilerine çekerler. Bu metal hidrürlerin üretimi ve transferi için gerekli enerji yakıt hücresinden elde edilen enerjiden daha yüksektir [Larminie, J., Dicks, A., 2000].

4.8. Metanol Olarak Depolama

Metanol yakıt olarak kullanıldığı gibi hidrojen depolamada da kullanılmaktadır. Bu depolama yönteminde hidrojen kaynağı sıvı haldedir. Metanol taşınması kolay ve az masraflı bir bileşiktir. Metanolden hidrojen üretmenin iki yöntemi vardır. Birincisi metanın buhar dönüşümüyle hidrojen üretimi yöntemidir. İkincisi ise kısmi oksidasyon ile hidrojeni açığa çıkarmadır. Depolama verimi (%13,5) ve litre başına düşen H_2 kütlesi (0,055) bakımından çok iyi değerlere sahip olması bu depolama yönteminin en büyük avantajıdır. Metanolün korozyif yapısı ve dolayısıyla insan sağlığı için çok tehlikeli olması bu yöntemin en büyük dezavantajıdır [Larminie, J., Dicks, A., 2000].

4.9. Amonyak Olarak Depolama

Amonyak (NH_3) oda sıcaklığında kendi buhar basıncı olan 8 bar'da sıvı olarak muhafaza edilebilir. 1 kg hidrojeni depolamak için gerekli amonyak hacmi rakiplerine göre çok düşüktür (8,5 L). Amonyak mayalamada kullanıldığı için hali

hazırda bol miktarda kullanılan bir bileşiktir. Bunun yanında amonyağa olan ihtiyaç arttıkça fiyatının düşmesi beklenmektedir. Amonyak doğalgaz ve havadaki azottan elde edilmektedir. Amonyaktan hidrojen elde edilmesi üç basit aşamada gerçekleşmektedir:

- Sıvı amonyağın gaz amonyağa dönüştürülmesi
- Gaz amonyağın 800-900°C'ye kadar ısıtılması
- Amonyagın elementlerine ayrılması ($\text{NH}_3 \rightarrow \frac{1}{2}\text{N}_2 + \frac{3}{2}\text{H}_2$). Bu aşama için katalizöre ihtiyaç vardır. Fe, Cu, Co, Ni gibi ucuz katalizörler bile bu reaksiyonun gerçekleşmesini sağlamaktadır [Larminie, J., Dicks, A., 2000].

Amonyagın kullanılmasını engelleyen bir takım dezavantajları vardır. Yakıt hücresi içersinde su mevcuttur ve amonyak suyun içinde çok kolay çözünür. Çözününce de çok bazik olan NH_3OH oluşturur. Bu, alkali yakıt hücrelerinde tolere edilebilir ancak PEM yakıt hücrelerinde kullanılmasına engel olacak kadar zararlıdır [Larminie, J., Dicks, A., 2000].

4.10. Hidrojenin Taşınması

Hidrojenin üretim yerinden veya depolama yerinde tüketiciye yeraltı boru hatlarıyla veya tankerlerle taşınması mümkündür. Kullanıma uygun olacak şekilde sıvı veya gaz olarak, boru veya izolasyonlu konteynırlarla, deniz veya kara yoluyla taşınıp dağıtılması mümkündür. Hidrojen doğada bulunan en hafif gaz olması nedeniyle yüksek basınçta kolaylıkla kaçabilen bir gazdır. Bu yüzden hidrojen taşımada kullanılan boru hatları ve bunların bağlantı parçalarının sızdırmazlığının çok yüksek olması istenmektedir. Havaya %4,9 oranında hidrojen karışması veya hidrojene %25 oranında hava karışması durumunda bu karışımlar patlayıcı özelliğe sahip olur. Bu yüzden bu hatlardan hidrojen geçirilmeden önce azot, karbondioksit veya oksijen içermeyen baca gazları ile sızdırmazlık testi yapılmalıdır [İmalı, Z., 2003].

5. HIDROJEN TAŞIYICISI OLARAK BOR

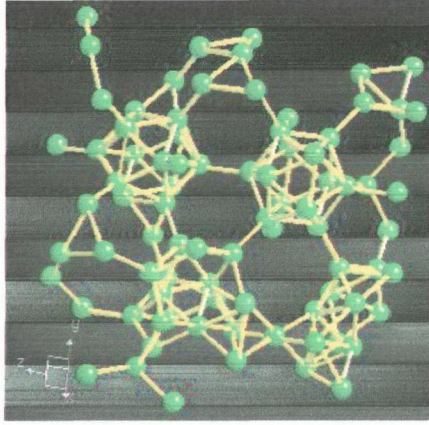
1950 yılından bu yana bor mineralinin enerji hammaddesi olarak kullanımı üzerinde yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalarda özellikle bor mineralinin hidrojen taşıyıcısı olma, iyi bir enerji hammaddesi olma ve füzyon reaktörlerinde yakıt olarak kullanılma özellikleri üzerinde yoğunlaşmıştır [Baykara, Z.S., 2003]. Bu bölümde bor madeninin özellikleri, Dünya’da ve Türkiye’deki rezerv dağılımı ve enerji hammaddesi olarak kullanımı incelenecektir.

5.1. Bor Madeni

Bor, atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81 ve ergime noktası $2190\pm 20^{\circ}\text{C}$ olan periyodik sistemin üçüncü grubunun başında bulunan bir elementtir. Yerkabuğunda toprak, kayalar ve suda bulunur. Yerkabuğunda kristal yada amorf yapıdaki bor miktarı 10-ppm kadardır. Doğada bulunan bor, kütle numaraları 10 (%19,8) ve 11 (%80,2) olan iki kararlı izotopun karışımından oluşmaktadır [Sahan, 2002].

Bor ilk defa 1808 yılında Gay-Lussac ve Jacques Thenard ile Sir Humphry Davy tarafından bor oksidin potasyum ile ısıtılmasıyla elde edilmiştir. Bromit veya klorit formlarının tantalyum filamentleri vasıtasıyla hidrojen ile reaksiyona sokulmasıyla daha saf olarak elde edilmesi mümkündür. Kristal bor kimyasal olarak ametal bir elementtir ve normal sıcaklıklardaki su, hava ve hidroklorik/hidroflorik asitlerle soy davranış göstermektedir. Yüksek sıcaklıklarda saf oksijenle reaksiyona sokulduğunda bor oksit (B_2O_3), nitrojenle bor nitrit (BN), bazı metallerle magnezyum borit (Mg_3B_2) ve titanyum diborit (TiB_2) gibi bileşikler oluşturabilmektedir. Bu bileşikler endüstride kullanılmaktadır [Sahan, 2002].

Bor doğada serbest olarak bulunmaz. Değişik oranlarda bor oksit ile 150'den fazla mineralin yapısı içinde yer almaktadır. Bor yatakları oksijenle bağlanmış bileşikler halinde en fazla Türkiye olmakla birlikte ABD, Arjantin, Rusya, Kazakistan, Çin, Bolivya, Şili ve Peru’da bulunmaktadır. Dünya çapındaki arama sonuçları %100 B_2O_3 ’ün Türkiye’deki rezervlerinin toplam rezervlerin %66,3’ünü oluşturduğunu göstermiştir. Dünya’daki en büyük üretici firma olan US Borax, ABD ve Arjantin’deki %11’lik bor rezervlerini elinde bulundurmaktadır [Sahan, 2002].



Şekil 5.1 Bor'un Kristal Yapısı [www.balikesir.edu.tr]

Hidrojenin bugünkü teknolojiyle depolanması ve taşınmasında birçok güçlüklerle karşılaşilmektedir. Aynı zamanda hidrojen elde etme maliyeti yüksek boyutlardadır. Hidrojenin araçlarda kullanımı için üç yöntem öne çıkmaktadır. Birincisi sıkıştırılmış gaz şeklinde depolanmış yakıt, ikincisi sıvı halde depolanmış yakıt, üçüncüsü ise metal hidrürler şeklinde depolanmış yakıt kullanımıdır. Bu yöntemlerden metal hidrür şeklinde depolama yönteminin birçok avantajları vardır. Bu bağlamda sodyum bor hidrür kullanımı ön plana çıkmaktadır [Baykara, Z.S., 2003].

Bor yandığında kirletici emisyonu düşüktür ve tutuşma sıcaklığı yüksektir. Bu yüzden yakıt olarak da kullanılmaktadır. Ayrıca yanması sonucunda verdiği katı atık kolaylıkla aktarılabilmektedir. Bor mineralleri yapılarında Ca, Na ve Mg bulundururlar. Na elementi bulunduranlar tinkal (boraks), Ca elementi bulunduranlar kolemanit ve Na-Ca bulunduranlar üleksit olarak adlandırılır [Baykara, Z.S., 2003].

Bor yüksek sıcaklıkta su ile reaksiyona girerek borik asit ve diğer ürünleri oluşturur. Bor elementinin kimyasal özellikleri tane büyüklüğü ve biçimine göre değişmektedir. Kristal borun reaksiyona girmesi zorken, amorf bor mikron boyutlarda kolaylıkla reaksiyona girer [Baykara, Z.S., 2003].

Bundan 4000 yıl önce ilk olarak Babilliler uzak doğudan boraks ithal ederek bunu altın işletmeciliğinde kullanmıştır. Mısırlılar da mumyalama, tıp ve metalürjide

bor kullanmışlardır. Eski Yunan ve Roma'da temizlik malzemesi olarak borat kullanılmaktaydı [Baykara, Z.S., 2003].

Bor mineralleri doğada bazı kayalarla beraber ve suların içinde çözelti olarak bulunmaktadır. Bulunduğu yere göre üretim yöntemleri de değişmektedir. Bor endüstride kimyasal, rafine veya ham olarak kullanılmaktadır. Saflaştırılmış kaliteli bor cevherleri daha çok tercih edilmektedir [Çalık, A., 2002].

Bor bileşiklerinin endüstride kullanımı çok yaygındır. 400'den fazla üründe bor elementi kullanılmaktadır. Bor, camlarda, motor yağlarında ve araba boyalarında kullanılmaktadır. Bu ürünlere çizilmeyi önleyici özellik katarak parlaklığı korumaktadır. Bu özelliğinden dolayı seramik sektöründe de kullanılmaktadır. Bunun dışında ilaç sektöründe ve yanmaz kumaş üretiminde de bor kullanımı yaygındır. Elektronik aletlerde kullanılan ince optik lifler, sağlam olması için bordan yapılmaktadır. Tarım sektöründe de bor yaygın olarak ilaçlamada kullanılmaktadır.

Bor;

%41 izolasyon, fiberglas, ve tekstil sanayinde

%13 seramik ve bileşikleri sanayinde

%12 deterjan ve temizlik sanayinde

%8 metalürji sanayinde

%7 tarım sanayinde

%19'da diğer sahalarda kullanılmaktadır [Çalık, A., 2002].

Tablo 5.1 Bor elementinin fiziksel özellikleri [T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı Yayın No: DPT: 2414 – ÖİK: 474, 1995]

Özellik	Değeri
Atom ağırlığı	10,811±0,003
Ergime noktası	2190±20°C
Kaynama noktası	3660°C
Isıl genleşme katsayısı (25-1050°C arası, 1°C için)	$5 \times 10^{-6} - 7 \times 10^{-6}$
Knoop sertliği	2100-2580 HK
Mohs sertliği (elmas-15)	11
Vickers sertliği	5000 HV

Tablo 5.2 Ticarî önemi olan bor mineralleri [T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı Yayın No: DPT: 2414 – ÖİK: 47]

Mineral	Formülü	% B ₂ O ₃	Bulunduğu Yer
Boraks (Tinkal)	Na ₂ B ₄ O ₇ - 10H ₂ O	36,6	Kırka, Emet, Bigadiç, A.B.D.
Kernit (Razorit)	Na ₂ B ₄ O ₇ - +H ₂ O	51	Kırka, A.B.D., Arjantin
Üleksit	NaCaB ₅ O ₉ - 8H ₂ O	43	Bigadiç, Kırka, Emet, Arjantin
Propertit	NaCaB ₅ O ₉ - 5H ₂ O	49,6	Kestelek, Emet, A.B.D.
Kolemanit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ - 5H ₂ O	50,8	Emet, Bigadiç, Küçükler, A.B.D.
Pandermit (Priseit)	Ca ₄ B ₁₀ O ₁₉ - 7H ₂ O	49,8	Sultançayır, Bigadiç
Borasil	Mg ₃ B ₇ O ₁₃ Cl	62,2	Almanya
Szaybelit	MgBO ₂ (OH)	41,4	Eski S.S.C.B.
Hidroborasil	CaMgBO ₁₁ - 6H ₂ O	50,5	Emet

5.2. Dünya Bor Rezervi Dağılımı

Dünya görünür bor rezervi dağılımına baktığımız zaman ilk başta %66,3'lük bir payla Türkiye'yi görmekteyiz. Türkiye'yi %10,6'lık bir pay ile Amerika Birleşik Devletleri izlemektedir. Üretimde ilk sırayı alan Amerika Birleşik Devletleri'nde ham borat üretimi yıllara göre düşüş göstermektedir. 1975 yılından sonra Türkiye'deki üretimin arttığı görülmektedir. Rusya ve Kazakistanda üretimin azaldığı, Şili, Çin ve Arjantin'de ise 1980'den sonra arttığı görülmektedir. Diğer ülkelerde ise kayda değer bir üretim yoktur [Kalafatoğlu, İ.E. ve Örs,S.N., 2003].

Tablo 5.3 Dünya Bor Rezervi Dağılımı [Kalafatoğlu, İ.E. ve Örs,S.N., 2003]

Ülke	Görünür (milyon ton)	%	Muhtemel (milyon ton)	Toplam (milyon ton)	%
Türkiye	375	66,3	483	858	58,2
ABD	60	10,6	149	209	14,2
Kazakistan	54	9,5	82	136	9,2
Rusya	28	5,0	112	140	9,5
Çin	27	4,8	9	36	2,4
İran	1	0,18	1	2	0,14
Sırbistan	3	0,53	0	3	0,20
Şili	8	1,41	33	41	2,8
Bolivya	4	0,71	15	19	1,3
Peru	4	0,71	18	22	1,5
Arjantin	2	0,35	7	9	0,61
Toplam	566		909	1475	

Tablo 5.3'te verilmiş olan dünya bor rezervi dağılımı incelendiğinde Türkiye'deki görünür bor rezervi değerinin, dünya bor rezervi değerinin %66,3'ünü oluşturduğu görülmektedir. Türkiye'yi %10,6'lık değerle ABD takip etmektedir. Tablo 5.4'te ise Dünya ekonomik bölgelerine göre bor tüketim alanları incelenmiştir.

Tablo 5.4 Dünya Ekonomik Bölgeleri Bor Tüketim Alanları (1000 Ton B₂O₃) [Kalafatoğlu, İ.E. ve Örs, S.N., 2003]

Bölge	Cam	Seramik	Tarım	Deterjan	Diğer	Toplam	%
K. Amerika	186	13	17	21	84	421	28
Latin Amerika	87	37	14	5	37	177	12
Batı Avrupa	159	69	14	242	208	692	46
Doğu Avrupa	40	12	2	8	16	78	5
Asya/Pasifik	69	30	11	4	30	141	9
Afrika/Ortadoğu	1	1	0	0	0	2	0,1
Toplam	642	162	58	280	377	1511	
%	42	11	4	18	25		

5.3. Türkiye Bor Rezervi Dağılımı

Türkiye'de bulunan borat yatakları dünya rezervinin %66,3'ünü oluşturmaktadır. Batı Anadolu'da bulunan bu rezervlerin %37'si Bigadiç, %34'ü Enet, %28'i Kırka ve %1'i Kestelek bölgesindedir [www.balikesir.edu.tr].

Bigadiç işletmesinde üretilen cevherler 600 000 ton/yıl'dır. Ülkemizde kısıtlı olan bor mineral ve bileşiklerinin kullanımı Balıkesir ve Eskişehir'de ürüne dönüştürülmektedir [www.balikesir.edu.tr].



Şekil 5.2 Türkiye Bor Madenleri



Şekil 5.3 Boraks'ın Mineral Şekli [www.balikesir.edu.tr]

Türkiye'deki ilk bor yatağı işletmesi 1865 yılında Susurluk'ta kurulmuştur. 1956 yılında Etibank, Emet yakınlarında bulunan kolemanit yataklarını satın alıp işletmeye başlamıştır. Daha sonra bor madenciliğinin devletleştirilmesine kadar, 1971-1978 yılları arasında yerli-yabancı birçok şirket tarafından işletilip ham maden olarak ihraç edilmiştir. Türkiye'de bor madenciliği çoğunlukla açık ocak madenciliği olarak yapılmaktadır [www.balikesir.edu.tr].

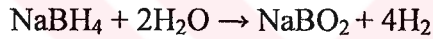
Türkiye'deki bor madeni incelendiğinde, dünya yüzdesinin yarısından çoğunu oluşturmada dışında en fazla bor içeren ve işlenmesi en kolay olan bor yataklarına sahip olduğu da görülmektedir [www.balikesir.edu.tr].

Tablo 5.5 Türkiye'deki Bor Cevheri Üretim Kapasitesi [www.balikesir.edu.tr].

İşletme	Mineral Adı	ton/yıl
Kırka	Tinkal	600.000
Emet	Kolemanit	500.000
Kestelek	Kolemanit	100.000
Bigadiç	Kolemanit	400.000
	Üleksit	128.000

5.4. Enerji Hammaddesi Olarak Bor

1950 yılından beri üzerinde en çok araştırma ve çalışma gerçekleştirilen mineral bor mineralidir. Yakıt hücresi üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda bor minerali kullanımı ön plana çıkmıştır. Ayrıca ticari olarak kullanılabilir duruma ulaşmıştır. Bordan hidrojen üretimi şöyle gösterilebilir [İmal, Z., 2003]:



Bu reaksiyonda standart hal entalpi değişimi 25°C'de -217 kJ'dür. Bu reaksiyon ısı alan (endotermik) bir reaksiyondur. Hidrojen üretiminde sodyum bor hidrit kullanılıyorsa reaksiyonun hızlı olması tercih edilmektedir. Bu reaksiyonda katalistler, asit veya yüksek sıcaklık ivmesi sağlar. Fakat yine de asit ilavesi yapılması istenmez. Burada kullanılan katalistler, genellikle metal halojenürler (NiCl₂, CoCl₂), koolodial platinyum, aktif karbon, Raney nikeli, iyon değiştirme reçine boncukları üzerine desteklenmiş Ru ve Mg temelli materyallerin fluorinlenmiş partikülleridir [İmal, Z., 2003].

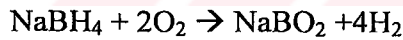
Amerikan donanmasında uçuş yakıtı olarak kullanılan sodyum tetra borat, özel uygulamalarda yakıt katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Diboran, B₂H₆ ve B₅H₉ gibi bor hidrürler, uçak yakıtı olarak kullanım için araştırılmaktadır. Bor hidrojenle karışığında yüksek performanslı yakıt elde edilmektedir. Fakat bu karışım çevresel açıdan uygun bir yakıt değildir [www.balikesir.edu.tr].

5.4.1. Sodyum Bor Hidrür

Beyaz kristal toz halinde bulunan sodyum bor hidrür, vakum içinde 400°C'ye kadar kararlıdır. Daha yüksek sıcaklıklara çıkıldığında ise hidrojen üretimine başlanmış olur. Havadaki nemden suyu yavaşça absorblayarak hidrojen ve metal borat oluşturacak şekilde dihidrat dönüşümünü sağlar. Burada karbondioksit kullanılarak süper kritik metot veya geleneksel doyurma (impregnation) metodu ile katalistler hazırlanır [İmalı, Z., 2003].

Sodyum bor hidrürün 20-23°C'de suyla olan reaksiyonu incelendiğinde katalist kullanılmadığında hidrojenin değerinin zamanla arttığı gözlenmiştir. Çözeltinin PH'ı artacağı için sabit dönüşüm değeri olan %7 değerinde kalır. Pt-TiO₂ katalizörünün kullanıldığı suyla reaksiyonun sonucunda süperkritik metotla partiküler şeklindeki katalistler kullanıldığında hidrojen üretimi oran ve miktarında yüksek derecede artış olduğu görülmüştür [İmalı, Z., 2003].

Sodyum bor hidrür güçlü bir indirgeyici olarak bilinir ve birçok organik ve inorganik bileşikle reaksiyona girer. İlk olarak borik asitin metanol ile trimetil borata (B(OCH₃)₃) dönüşmesi ve daha sonra sodyum hidrür ile indirgenmesi olan ve Schlesinger prosesi olarak bilinen yöntemle elde edilmiştir [Bilici, U., 2003].



Burada gerekli olan sodyum bor hidrürün %75'i yan ürün olarak sodyum metoksite dönüşür. 1 mol sodyum bor hidrür üretmek için 4 mol sodyum metali gerekmektedir. Periyodik tablonun aktinitler dışındaki tüm elemanları bor hidrür oluşturmaktadır. Bor hidrürler indirgeme işlemlerinin yapıldığı gelişmiş kimya sanayisinin kullanıldığı ülkelerde büyük ölçüde kullanılmaktadır. Sodyum bor hidrür, kullanımının kolay olması, stabilitesi ve daha ekonomik olması bakımında diğerlerine göre daha çok tercih edilmektedir. Sodyum bor hidrür genellikle indirgeme, ağartma ve atık suların temizlenmesinde yaygın olarak kullanılır [Bilici, U., 2003].

Alkali metal bor hidrürler, bor hidrürler arasında en kararlı olanlarıdır. Sodyum bor hidrürün kuru havada 3000°C'de, vakumda ise 4000°C'de kararlı olduğu görülür. Vakumlu ortamda 4000°C'de çok az bir bozunma gösterir [Bilici, U., 2003].



5.4.2. Kullanım Alanları

Sodyum bor hidrür kimyasal uygulamalarda özellikli arıtım kimyasalı olarak ve ilaç endüstrisinde kullanılmaktadır. Endüstriyel atıklardaki metal iyonlarının, kimyasal süreçlerde ise karbonil ve peroksidin uzaklaştırılmasında kullanılmaktadır. Sulu çözeltileri ise kağıt endüstrisinde ağartıcı olarak kullanılan sodyum hidrosülfidin elde edilmesinde kullanılır. Metal yüzeylerin temizlenmesi, metal yüzey işlemlerinden değerli metal kazanma, atık sulardan ağır metalleri giderme ve fotoğrafçılıkta sodyum bor hidrürden yararlanılır. Ayrıca yakıt hücresinde yakıt olarak ve hidrojen depolayıcısı olarak kullanılmaktadır [Bilici, U., 2003], [Kalafatoğlu, İ.E. ve Örs S.N., 2003].

Avrupa'daki kağıt endüstrisinde önemli düzeyde sodyum bor hidrür kullanımı vardır. Kullanımının yıllık %4 artış göstermesi beklenmektedir [Kalafatoğlu, İ.E. ve Örs S.N., 2003].

Millenium Cell'in sodyum bor hidritli yakıt hücresi projesinde sodyum bor hidrürün suyla karıştırılmasından elde edilen sıvı, yakıt olarak kullanılmıştır. Bu karışım katalizör vasıtasıyla reaksiyona sokulup, gaz hidrojenin ayrışması sağlanır. Elde edilen hidrojen, elektrik enerjisine dönüştürülür [www.balikesir.edu.tr].

Sodyum bor hidrür ağırlıkça %20 hidrojen depolayabilmektedir. Atık olarak sodyum bor tuzu oluşmaktadır. Sistemde kullanılan sodyum bor hidrit yanıcı-patlayıcı değildir. Kullanılan hidrojenin yarısı sudan, diğer yarısı sodyum bor hidrürden alınmaktadır. Katalizör defalarca kullanılmaya uygundur. Ayrıca atık olarak ortaya çıkan sodyum bor tuzu kolaylıkla sodyum bor hidrite dönüştürülebilir [www.balikesir.edu.tr], [Kalafatoğlu, İ.E. ve Örs S.N., 2003].

5.4.3. Sodyum Bor Hidrürün Yakıt Hücresinde Kullanılması

Proton geçirgen membranlı yakıt hücreleri sıfır emisyonla çalıştıklarından dolayı çevresel açıdan içten yanmalı motorların güçlü bir alternatifidir. En yaygın yöntemlerden biri olan doğalgazın katalitik reformasyonu ile hidrojen üretimi yöntemi ile elde edilen hidrojen, H_2O , N_2 , CO_2 ve CO içermektedir. Hidrojenin

içinde bulunan CO, yakıt hücrelerinin performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Aktif platin katalistte oluşan tersinmez CO adsorbsiyonu proton geçirgen membranlı yakıt hücrelerinin performansını kalıcı bir şekilde düşürür. Bu yüzden özellikle PEM yakıt hücreleri için hızlı ve saf hidrojen elde edilebilen yöntemlere gerek duyulmaktadır [Chuan Wu et.al., 2004].

Kısa zamanda saf hidrojen elde etmek için kimyasal hidritlerin hidrolizi yöntemi kullanılabilir. Sulu çözelti halindeki sodyum bor hidrit, sulu çözeltinin pH değerinin yeterince yüksek olduğu çevre sıcaklığı ve basıncında kararlıdır. Bu yüzden küçük bir miktar NaOH, çözelti halindeki NaBH_4 'e eklendiğinde aylarca kararlı bir şekilde depolanabilir. Sadece, katalist eklendiğinde hidrojenin çabuk bir şekilde ayrıştığı görülür [Chuan Wu et.al., 2004].

Bu ayrışma reaksiyonu eksotermik bir reaksiyondur ve 0°C 'lik sıcaklıkta bile hemen başlar. Yan ürün olan NaBO_2 çevreye zararlı değildir ve NaBH_4 üretimi için geri dönüşümlü bir şekilde kullanılabilir [Chuan Wu et.al., 2004].

6. YAKIT HÜCRESI

Bu bölümde yakıt hücresi çeşitleri, yakıt hücresi sistemi ve taşıtlarda yakıt hücresi kullanımı konularına yer verilecektir.

6.1. Yakıt Hücresi Çeşitleri

Yakıt hücresi sistemi 1889 yılında geliştirilmesine rağmen 1960'lı yıllarda uzay programlarında kullanılmasıyla güç üretiminde kullanılmaya başlanmıştır [Sayın C., Çanakçı M., 2004]. İlk yakıt hücresi Sir William Grove tarafından 1839 yılında tasarlanmıştır. Grove'un yaptığı ilk çalışmada seyreltik sülfürik aside daldırılmış iki platin elektrot bulunmaktaydı. Bu çalışmada hidrojen ve oksijen elde etmeyi başarmıştır. Daha sonraki çalışmalarında suyun elektrolizinin ters reaksiyonunda sabit akım ve güç üretmeyi başarmıştır. Daha sonraki çalışmalarında ise sistemi seri bağlanmış bir dizi olarak kullanmış ve daha fazla elektrik akımı elde etmeyi başarmıştır [Oral, E. ve Çelik, V., 2005].

Yakıt hücresi sistemi verimli, sessiz, çevre dostu olan ve elektro kimyasal yöntemle yakıt enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren bir sistemdir [Oral, E., Çelik, V., 2005]. Yakıt beslemeyle sürekli bir elektrik üretimi gerçekleştiren bu sistemler geleneksel sistemlere göre farklılıklar göstermektedir. Bu sistemler geleneksel sistemlere göre; enerji üretim verimi yüksek, çevresel emisyonu düşük, yakıt seçeneği olan, egzoz atık ısısını yeniden kullanabilen, modüler yapıda, kısa sürede monte edilebilen, az miktarda soğutma suyu gerektiren, güvenilir ve geliştirilebilir bir sistem olması gibi üstünlükler göstermektedir [Sayın, C., Çanakçı, M., 2004].

Araçlarda yakıt hücresi kullanımı teknolojisinin geliştirilmesiyle birlikte, bu sistemde yakıt olarak hidrojenin kullanımı gündeme gelmiştir. Sistemde gaz hidrojeninde bulunan kimyasal enerji elektrik enerjisine dönüştürülüp, doğru akımlı elektrik motoruna iletilir [Sayın, C., Çanakçı, M., 2004]. Bu sistemde fosil yakıt kullanılan motorlardaki gibi yanma olayı gerçekleşmez. Bu nedenle çevreye zararlı atık gaz oluşumu da yoktur. Termik verimleri benzin motorlarına kıyasla 3 kat daha fazladır. Gürültü düzeyi ve egzoz emisyonları da ihmal edilecek düzeyde azdır [Sayın, C. ve Çanakçı, M., 2004].

Yakıt hücresinde yakıt olarak metanol, etanol, doğalgaz, LPG veya hidrojen kullanılabilir. Bu yakıtlar arasında enerji veriminin yüksek olması ve yan ürün olarak yalnızca su buharı oluşturması dolayısıyla hidrojen öne çıkmaktadır [Sayın, C. ve Çanakçı, M., 2004].

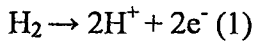
Yakıt hücrelerini elde edilen güce göre düşük, orta ve büyük güçlü olarak üç grupta toplayabiliriz.

Tablo 6.1 Yakıt Hücrelerinin Elde Edilen Güce ve Kullanım Alanlarına Göre Sınıflandırılması [Çetinkaya, M. ve Karaosmanoğlu, F., 2003]

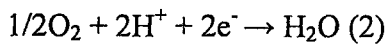
Düşük Güçlü	5 kW	Mikro Uygulama veya Konut	PEMYH
	5-10 kW	Konut veya Site	KOYH
Orta Güçlü	10-100 kW	Site	AYH, PEMYH
	50-300 kW	Ticari	KOYH, FAYH, EKYH
Büyük Güçlü	250 kW - 10 MW	Güç Santralleri	FAYH, EKYH, KOYH

Yakıt hücreleri, kullanılan yakıtı elektrik ve ısıya çevirir. Kullanılan yakıtı göre %40-70'lik bir dönüştürme verimine sahiptir. Çalışma prensibi suyun elektrolizinin tersi şeklinde işler. Fosforik asit için yakıt hücresi reaksiyon formülü [Oral, E., Çelik, V., 2005];

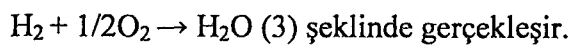
Hidrojen elektrotta,



Oksijen elektrotta,

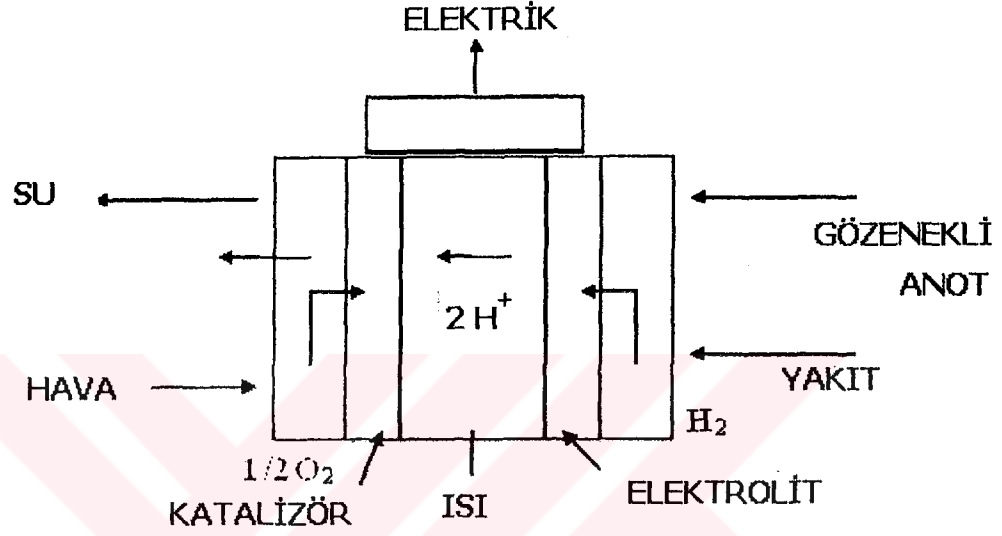


Reaksiyon,



Bu reaksiyonda reaksiyon ısısının sağlanması için küme içersine birkaç tane soğutucu levha yerleştirilir. Hücrelere gaz temini bu levhalardan da sağlanabilir [Oral, E., Çelik, V., 2005].

Elektrolit olarak asit kullanıldığında oksijen elektrotta su elde edilir. Kullanılan hidrojen doğalgaz, nafta, biyogaz veya kömür gibi yakıtlardan elde edilebilir [www.tubitak.gov.tr, 2005].



Şekil 6.1 Yakıt Hücresi Şematik Diyagramı [Enerji Üretiminde Verimliliği Artırmaya, Çevreyi Korumaya Yönelik Teknolojiler-Alt Grup Raporu]

Yakıt hücresinin tipine göre sistemde farklı katalizör malzemeler kullanılır. Taşıt uygulamalarında tercih edilen PEM yakıt hücresinde, elektrolitin her iki yüzeyinde preslenmiş, platinden yapılmış katalizör kullanılır [Oral, E. ve Çelik, V., 2005].

Elektrokimyasal metotla güç üreten yakıt hücreleri, $10,76 \text{ m}^2$ olan her bir aktif hücre yüzey alanı için yaklaşık 100-200kW'lık DC güç üretir. Her bir hücre 1V'tan az bir gerilim üretir. Gerekli elektrik enerjisini üretebilmek için birden fazla yakıt hücresi seri olarak bağlanır. Hücrelerin arasına yerleştirilen iki kutuplu levhalar, elektrotlara gazın sağlanmasını ve hücreler arasında elektriksel bağın oluşmasını sağlar [Oral, E. ve Çelik, V., 2005], [Kadırgan, F., 2002].

Yakıt hücresi, yakıt (hidrojen, doğalgaz, LPG, metanol v.b.) ve oksitleyicinin (hava veya oksijen) kimyasal enerjisini direk elektrik enerjisine ve ısı enerjisine

çevirir. Gürültü seviyesi düşük, çevreyi kirletmeyen ve yüksek verimle çalışan sistemlerdir. Termik makinelerde verim Carnot çevrimine göre $\eta_c = 1 - T / T_0$ şeklinde gösterilmektedir. Bu formüle göre işlem sıcaklığı (T_0) arttıkça verim de artar. Bu sıcaklık malzemenin dayanım limitleriyle sınırlıdır. Yakıt hücresine bakıldığında ise böyle bir sınırlama yapılmamaktadır. Yakıt hücresi genel verimi ise Gibbs serbest enerjisinin yakıt ısıl değerine oranı olan $\eta_{fc} = \Delta G / \Delta H$ formülüyle ifade edilir [Oral, E. ve Çelik, V., 2005].

Japonya'da yakıt hücresi konusunda geliştirilen projeler kapsamında 1MW gücünde bir enerji üretim tesisi kurulmuştur. Kurulan bir başka güç üretim istasyonu 5MW'lık olup %42 verimle çalışmaktadır. Ayrıca 170°C'lik bir buhar çıkışı sağlamaktadır [Oral, E. ve Çelik, V., 2005].

Yakıt hücresi sisteminde her elektrot elektro-kimyasal reaksiyonlara uygun katalizör içermektedir. Yakıt, yakıt hücresi elektrodu üzerinden akıtılarak hidrojen iyonları ve elektronlarının anotta ayrıştırılması sağlanır. Elektronlar dış devre yardımıyla katoda doğru taşınır. Bu sırada iyonlar elektrolit yoluyla oksijen elektroda geçer. Katotta birleşen oksijen, hidrojen iyonları ve elektronlar su oluşturur. Burada elektronların dış devre yoluyla akışı sırasında elektrik oluşur [Oral, E. ve Çelik, V., 2005].

Yakıt hücreleri 6 grupta incelenebilir:

- Proton Geçirgen membranlı Yakıt Hücresi (PEMYH)
- Fosforik Asit Yakıt Hücresi (FAYH)
- Alkali Yakıt Hücresi (AYH)
- Ergimiş Karbonat Yakıt Hücresi (EKYH)
- Katı Oksit Yakıt Hücresi (KOYH)
- Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Hücresi (DMYH)

Yüksek çalışma sıcaklığına sahip KOYH (700-1000°C) araçlarda kullanıma uygun değildir. Fakat daha düşük çalışma sıcaklığına sahip FAYH (150-250°C), AYH (110-150°C) ve PEMYH (90-120°C) araçlarda kullanıma uygundur [Oral, E. ve Çelik, V., 2005].

6.1.1. Proton Geçirgen Membranlı Yakıt Hücresi (PEMYH)

PEM yakıt hücreleri, General Electric tarafından 1959 yılında uzay uygulamaları için geliştirilen iyon-reçine değiştirmeli sistemin kullanımıyla tanınmış bir sistemdir. Bu sistem solar ve diğer alternatif sistemlerden daha fazla kullanılan bir sistem olmuştur. Basit yapısı ve ağırlığının az olması nedeniyle tercih edilmektedir. PEMYH günümüzde geniş uygulama alanına sahiptir [Smitha, B., et. al., 2005].

H_2/O_2 yakıt hücresi, polimer elektrolit yakıt hücresi ve doğrudan metanol kullanılan yakıt hücresi olarak ikiye ayrılır. Doğrudan metanol kullanılan yakıt hücresi, yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir fakat $100^\circ C$ 'nin altında, polimer elektrolit yakıt hücresine göre daha yavaş bir oksidasyon kinetiğine sahiptir. Yakıtın anottan katoda nüfuz etmesi sırasında kullanım veriminin %50'ye düştüğü görülür [Smitha, B. et. al., 2005].

Membran, PEMYH'nin en önemli parçasıdır. Membranın yüksek verimi için aşağıdaki maddelere önem verilmesi gerekmektedir. :

- En az direnç kaybı ve sıfır elektron iletkenliğiyle yüksek proton iletkenliği
- Yeterli mekanik dayanıklılık ve kararlılık
- Çalışma şartlarında kimyasal ve elektrokimyasal kararlılık
- Nem çıkışı kontrolü
- Çok düşük yakıt veya oksijen kullanımı ile elektrik yükü verimini en yüksek seviyeye getirme
- Üretim maliyetiyle uygulama maliyetinin uygun olması [Smitha, B. et. al., 2005].

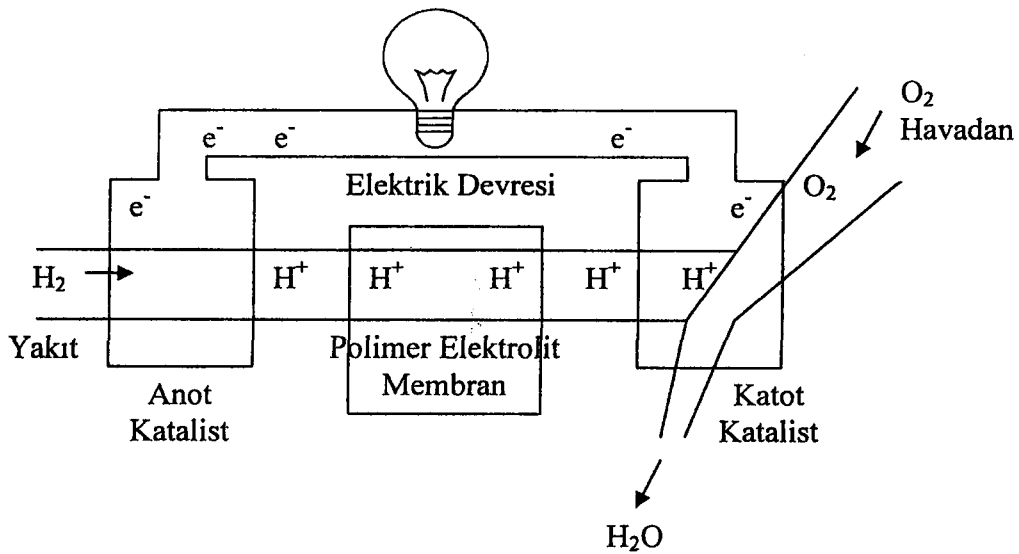
Membran performansını etkileyen iki önemli faktör bulunmaktadır. Bunlardan birincisi hidrasyon derecesidir. Yüksek hidrasyon derecesi, proton iletkenliğini de olumlu yönde etkilemektedir. Fakat sıvı membranlı uygulamalarda oksidasyon reaksiyonunu yavaşlatan katot taşması olasılığı vardır.

Membran performansını etkileyen ikinci önemli faktör ise membran kalınlığıdır. Su sürüklenmesini veya geçişini önlemek için membran kalınlığı azaltılabilir. Bu uygulama yakıt hücresi performansını da düzenlemektedir. Membran

kalınlığını azaltmanın diğ er avantajları ise ; membran direncinin azalması (membranın iletkenliğinin artmasını sağılar), d üş uk maliyet ve hızlı hidrasyon olarak sayılabilir [Smitha, B. et. al., 2005].

Bu tip yakıt h uc releri d üş uk çalışma sıcaklığı, y uksek g    yoğunluğı ve d üş uk maliyeti nedeniyle tercih edilen sistemlerdir. G    yoğunluğı 0,35-0,6 W/cm² seviyesindedir. Bu sistemde katı elektrolit kullanılması, sistemi diğ er yakıt h uc relerine g  re daha avantajlı kılar. Çünkü katı elektrolit, elektrolit sızıntısı problemini ortadan kaldırır [Sayın, C.,  anak ı, M., 2004].

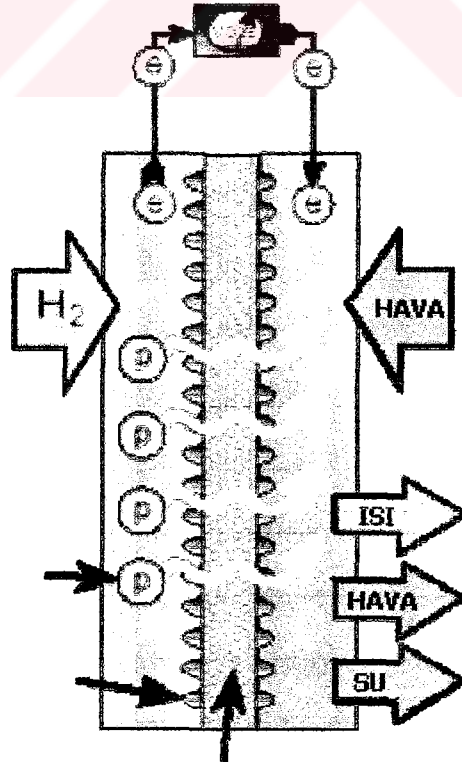
PEMYH uzay çalışmalarında ve   zel askeri sistemlerde kullanım amaçlı geliştirilmiştir. Fakat yapılan çalışmalar mobil uygulamalar için en uygun yakıt h uc resi olduğunu g  stermiştir. 2002 yılında Daimler Chrysler/Ballard/Ford konsorsiyumu (XCELLSIS), Kanada, Amerika ve Avrupa'da PEMYH ile çalışan otobüsleri ticari olarak piyasaya s  rm şt r. Bu otobüslerde saf hidrojen kullanılmaktadır. Fakat hidrojenin araçlarda depolanması için y uksek basınçlı hafif silindirler, karyojenik sıvı sistemleri ve katı metal hidrit depolama gerektirmektedir. Basınçlı hidrojen büyük araçlarda kullanıma en elverişli sistem olmasına rağmen küçük araçlarda ağır olması ve yer kaplaması nedeniyle tercih edilmemektedir [Kadırgan, F., 2002].



şekil 6.2 PEM Yakıt H uc resi  alışma Prensibi

PEM yakıt hücrelerinde membranin her iki tarafında anot ve katot olmak üzere elektrotlar bulunmaktadır. Anot, katot ve membrandan oluşan düzeneğe membran-elektrot düzeneği denir. Katalizörler anot ve katotun üzerinde bulunur. Katalizörler yüzey alanını arttırmak için genellikle karbon desteği üzerine serpiştirilir. Yakıt hücresi sisteminde gazlar çift kutuplu tabaka aracılığıyla membran-elektrot düzeneklerine iletilirler. Anot tarafı hidrojen gazı ile beslenmektedir. Katot tarafı ise oksijen gazı veya oksijen içeren hava ile beslenmektedir. Anot tarafında gerçekleşen reaksiyon; hidrojen gazının H^+ iyonu ve elektronuna ayrılmasıdır. Burada oluşan H^+ iyonu nasyon zarının içinden katot tarafına geçmektedir. Oluşan elektron ise gaz geçirgen tabaka ve çift kutuplu tabaka tarafından iletilip katot tarafına bir devre yardımıyla geçirilir. Elektron hareketi elektrik enerjisi üretilmesi demektir. Katot tarafında zardan gelen H^+ iyonu, devreden gelen elektron ve oksijen tepkimeye girip su oluştururlar. Bu sırada bir miktar ısı açığa çıkar. Bu ısı soğutma sistemleri ile yakıt hücresi dizininden uzaklaştırılır. Soğutma küçük sistemlerde hava, büyük sistemlerde su veya başka sıvılarla yapılır [Larminie, J., Dicks, A.].

PEMYH Şematik Diyagramı



Şekil 6.3 PEM Yakıt Hücresi

6.1.2. Fosforik Asit Yakıt Hücresi (FAYH)

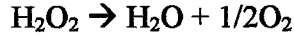
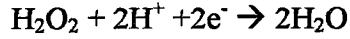
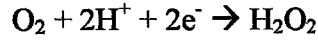
Diğer tip yakıt hücrelerine göre daha eski bir sistem olan FAYH, gelişen teknolojiyle en fazla gelişme kaydeden yakıt hücresi tipidir. Taşıt ve elektrik şebekesi uygulamalarına uygun olduğundan bu sistem üzerinde geniş çapta incelemeler sürmektedir. Elektrolit olarak fosforik asit kullanılır. Anoda CO₂ içeren hidrojen zengini gaz, katoda da hava uygulanır ve elektrik üretimi gerçekleşir. Güç verimleri %35-45 arasındadır. Kullanılan elektrolit asit olduğundan uygulanan CO₂ elektrolitte bir bozulmaya neden olmaz. Bu sistemde normal akım yoğunluğu 150-350 mA/cm² olup, bir hücrenin çıkış gerilimi 0,5-0,8 V arasındadır. 220°C'lik sıcaklıkta ve atmosfer basıncıyla 5 atm basınç aralığında çalışırlar. FAYH sistemlerinde, H₂ ve O₂ elektrodların her ikisinde de katalist olarak Pt kullanılır. FAYH çalışma sıcaklığı hidrojeni direkt dönüştürücü gazlar gibi hidrojen kaynaklarından kullanmaya olanak tanır. Dönüştürücü gazların içeriğinde olan CO (%1'den az miktarda) yüksek çalışma sıcaklığından dolayı Pt tabaka tarafından tutulmaz. FAYH'de kullanılan diğer bileşenler çoğunlukla grafit ve karbondan yapılmıştır [Choudhury, S.R. et.al., 2002].

FAYH sistemi elektrik üretimi 1-10 MW'a kadar çıkabilmektedir. Endüstriyel kullanımda 200kW'lık enerji üretim sistemleri mevcuttur. İşletim süresi 5 yıl olarak ölçülmüştür. Bu süre, işletme sıcaklığı ve basıncına göre değişim gösterir. İşletme sıcaklığının ve basıncın yüksek olması sistemin ömrünü olumlu yönde etkiler. Ani yük değişimleri ve sık çalıştırıp durdurma da hücre ömrünü olumsuz yönde etkileyen faktörlerdir.

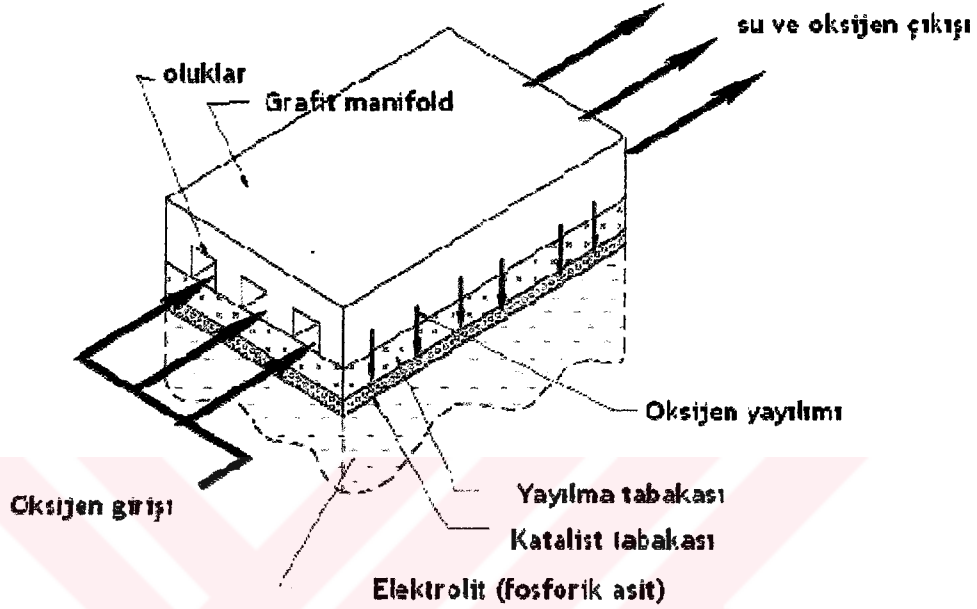
Sistemdeki gaz difüzyon elektrotları, gaz beslemenin olduğu geçirgen alt yüzeyi içerir. Bu alt yüzey, geçirgen karbon kağıdı ya da karbon malzemeden oluşmuştur. Bu alt yüzeyin diğer yüzünde elektroliti kaplayan (fosforik asit), ince karbon tozu ile kaplanmış elektrokatalist, PTFE (poly-tetra-flouro-ethylene) ile bezenip yuvarlatılarak açılmıştır. PTFE, reaktan gazın alana kolaylıkla geçebilmesi için, hidrofobik etki göstererek gözeneklerdeki su taşmasını engeller. İki elektrot fosforik asitle ayrılmıştır [Choudhury, S.R. et.al., 2002].

Anotta: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

Katotta: $\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$



Tepkimeleri gerçekleşir.



Şekil 6.4 FAYH Kesit Katot Görünüşü [Choudhury, S.R. et.al., 2002]

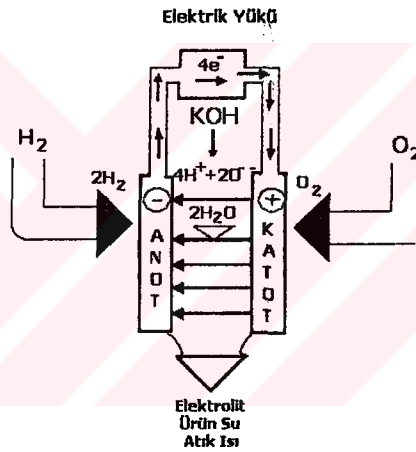
Hücre sayısını artırarak ve hücre alanını genişleterek hücre gruplarının çıkış gerilimlerini artırmak mümkündür. Küçük hücre gruplarında bir hücre yaklaşık 200cm² alana sahiptir ve 100 kW gücündedir. 11 MW'lık bir istasyonda ise 9300 cm² alana sahip hücre grubu 18760 kW gücündedir. FAYH teknolojisi ulaşım sektöründe uygulanmaya başlanmıştır. Amerika'da DOE desteğinde metanol yakıtlı sistem bir otobüse uyarlanmıştır [www.tubitak.gov.tr, 2005].

6.1.3. Alkali Yakıt Hücresi (AYH)

Bu sistemde işletim sistemi sıcaklığının 50-200°C aralığında olması atık ısı kullanımını engellemektedir. Yakıt olarak saf hidrojen kullanılır ve sistem verimi % 42-73 arasındadır. AYH üzerine yapılan çalışmalar diğer yakıt hücresi teknolojilerine oranla azdır. AYH ilk olarak uzay gemilerinde kullanılmıştır. Fakat KOH elektrolit sirkülasyonu ve CO₂ absorpsiyonu nedeniyle otomobillerde kullanıma uygun değildir. Alkali yakıt hücresi sistemi için Ni anot ve Ag katot kullanılmasıyla ilgili

çalışmalar devam etmektedir. Fakat şimdiye kadar elde edilen güç düşük seviyelerdedir [Kadırgan, F., 2002].

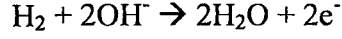
Alkali yakıt hücresi, basit yapısı, düşük maliyeti ve diğer yakıt hücresi türleriyle kıyaslanabilir verimi nedeniyle araştırılan bir yöntemdir. Alkali elektrolit kullanımının yakıt hücresinde yüksek verim, elektrod katalist ve yakıt seçiminde çeşitlilik gibi avantajları bulunmaktadır. Alkali yakıt hücresinde elektrokatalist olarak Platin, Nikel, Fe, Al ve Pt-Ru kullanılabilir. Yakıt olarak ise hidrojen, metanol, etanol ve sodyum bor hidrit kullanılır. 10M KOH ve 4,5 M metanolün elektrolit ve yakıt olarak kullanıldığı deneysel bir çalışmada Platin ($2\text{-}5\text{ mg cm}^{-2}$) ve elektrokatalitik olarak anot ve katot katalistte aktif karbon kullanılmıştır [Verma, A. and Basu, S., 2005].



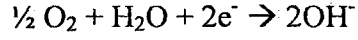
Şekil 6.5 AYH Çalışma Prensibi

Şekil 6.5’de alkali yakıt hücresi şeması görülmektedir. Elektrotların yapısında karbon teflon karışımlı gaz geçirgen tabaka üzerinde platin destekli karbon teflon tabaka bulunmaktadır. Bu tabakalar elektron toplayıcı ve dayanıklılığı artırıcı metal ağ üzerindedir. Sistemde elektrolit olarak KOH sulu çözeltisi kullanılmaktadır. Alkali yakıt hücresi çalışma sıcaklığı 200°C ’ye kadar çıkabilmektedir. Çalışma basıncı ise atmosferik basınçtan 14 atmosfere kadar çıkabilmektedir [Sarı, Z., 2002].

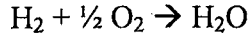
Şekilde de görüldüğü gibi anotta hidrojen, katotta ise oksijen girişi vardır. Anotta hidrojen gazı OH^- iyonları ile tepkimeye girer:



Ortaya çıkan elektronlar dış devre yardımıyla katota taşınır. Katotta ise şu tepkime gerçekleşir:



Toplam reaksiyon:



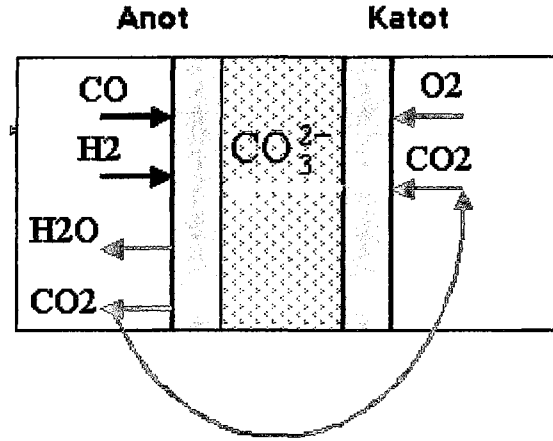
H_2 ve OH^- iyonlarının tepkimesinden meydana gelen suyun bir kısmı kullanılmak üzere katota gönderilir [Sarı, Z., 2002].

6.1.4 Ergimiş Karbonat Yakıt Hücresi (EKYH)

Bu sistem de geliştirilmeye uygun bir sistem olarak görülmektedir. Güç üretim verimi %45-55 mertebesine ulaşabilmektedir. Büyük çaptaki güç santralleri için kullanıma uygun bir sistemdir. Eridiklerinde iyonik iletim gösteren LiKCO_3 ve LiNaCO_3 bu sistemde elektrolit olarak kullanılır. Yakıt olarak doğalgaz kullanıldığı gibi kömür gazı gibi saf olmayan gazlar da bu sistemde kullanılmaktadır.

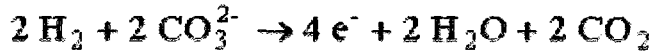
Ergimiş karbonat yakıt hücresi; proton geçirgen membranlı yakıt hücresi ve fosforik asit yakıt hücresinin sınırlı çalışma sıcaklıklarına alternatif olarak geliştirilmiş bir sistemdir. Fuel Cell Energy Inc. 1,93 MW'lık ve yakıt olarak doğalgaz kullanılan bir sistemi %43,6 elektrik verimle 4100 saat çalıştırmıştır. Harryson Mining Corporation ise yakıt olarak kömür kullanılan bir çalışma denemiş ve 250 kW'lık bir güç elde etmiştir.

Bu sistemde kullanılan termal yalıtkan malzemelerin sıcaklıkla bozunması, karbonlaşması ve kısa devreye yol açması büyük problem yaratmaktadır [www.tubitak.gov.tr, 2005].

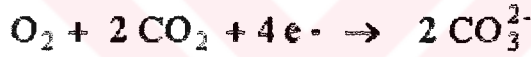


Şekil 6.6 ECKYH Çalışma Prensibi [www.annso.freesurf.fr/MCFC.html, 2005]

Bu sistemde anotta:



Katotta ise:



tepkimleri gerçekleşir [www.annso.freesurf.fr/MCFC.html, 2005].

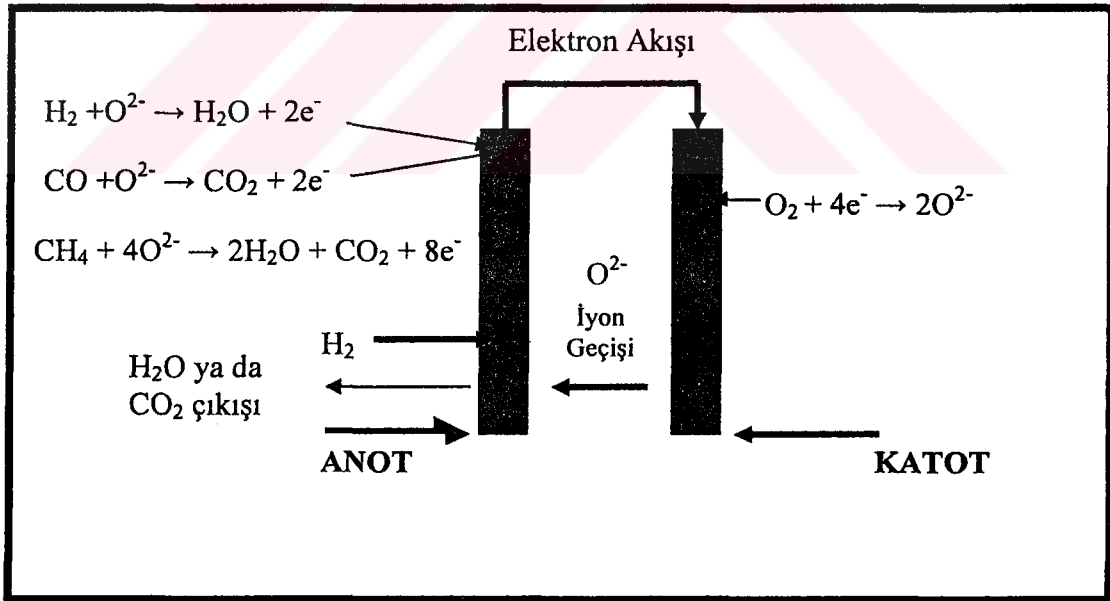
6.1.5. Katı Oksit Yakıt Hücresi (KOYH)

Katı oksit yakıt hücresi üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Çalışma sıcaklığının 1000°C'ye çıkması nedeniyle hücre elektrotu yüksek sıcaklığa dayanıklı seramikten yapılmaktadır. Genellikle itriyumla sağlamlaştırılmış zirkonyum kullanılır (YSZ). Güç üretim verimi %50-60 olan bu sistemde elektrolit olarak katı elementler kullanıldığından, elektrolit buharlaşması yada azalması gibi problemlerle karşılaşmaz. Böylelikle elektrolit besleme mekanizmasına da gerek kalmaz. Katı oksit yakıt hücresinin hücrelerinin arttırılması ile ve üretim metotlarının geliştirilmesi ile güç istasyonları uygulamalarında kullanılması düşünülmektedir. Westinghouse ve birkaç yan kuruluşu metanı ek işlemlerden geçirmeden yüksek sıcaklıkta doğrudan kullanma çalışmaları üzerinde durmaktadır [www.tubitak.gov.tr, 2005].

Katı oksit yakıt hücreleri, hava ve yakıt kanallarından oluşmaktadır. Üç tabakalı seramik bölge, yoğun elektrolitle (PEN yapı) birbirinden ayrılan anot-katot ve hücreleri birbirine bağlayan birleştirici yapıdan oluşmaktadır. Katı oksit yakıt

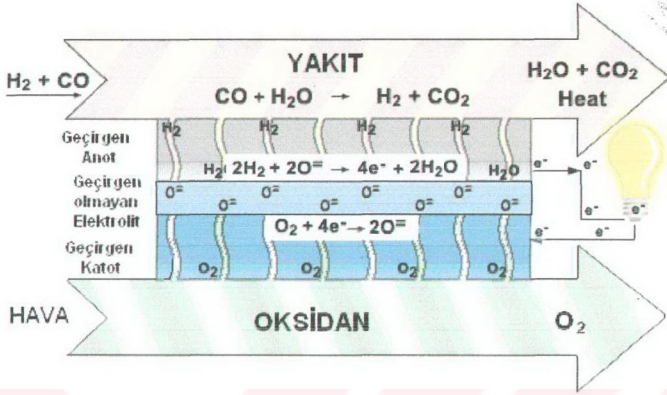
hücreleri, yüksek sıcaklıklarda ve atmosferik veya yükseltilmiş basınçlarda çalışmaktadır. Sistemde yakıt olarak hidrojen, CO veya hidrokarbonlar kullanılmakta ve oksidan olarak hava kullanılmaktadır. Bir katı oksit yakıt hücresinin içinde, O^{2-} iyonları katottan anota göç eder ve H_2 ve CO ile reaksiyona girer. Elektronlar serbest kalırken dış devre yoluyla katot/elektrolit ara yüzeyine geldiklerinde H_2O ve CO_2 ortaya çıkar. Katı oksit yakıt hücreleri geometrilerine uygun olarak, çalışma sıcaklıklarına göre, PEN parçalarının duruma göre, kalınlıklarına göre ya da yakıt uygulamalarına göre sınıflandırılabilir. Orta sıcaklık katı oksit yakıt hücrelerinin çalışma sıcaklıkları 823-1073 K arasındadır. Yüksek sıcaklık katı oksit yakıt hücrelerinin ise çalışma sıcaklığı 1073-1273 K arasındadır. Orta sıcaklık katı oksit yakıt hücrelerinin çalışma sıcaklığının daha düşük olması daha çeşitli materyal kullanılmasına ve maliyeti daha düşük üretim metodlarının kullanılmasına olanak sağlar [Hawkes, A.D. et.al, 2005].

BMW tarafından hidrojen-benzin karışımli yakıtla çalışan katı oksit yakıt hücreli bir otomobil prototip olarak üretilmiştir. Hidrojen kullanımıyla diğer yakıtların bu sistemde oluşturduğu kükürt kirliliğinin de önlemi alınmış olacaktır. [KadırganF.,2002].



Şekil 6.7 Katı Oksit Yakıt Hücresi

Katı Oksit Yakıt Hücresi



Şekil 6.8 KOYH Çalışma Prensibi

6.1.6 Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Hücresi (DMYH)

PEM yakıt hücresinin bir çeşididir. Bu uygulamada ön reformlamaya gerek duyulmadan metanol direk kullanılabilir. İlk olarak anotta metanolün CO_2 ve hidrojen iyonlarına dönüşümü yapılır. Daha sonra PEM yakıt hücresinde olduğu gibi hidrojen iyonları oksijenle reaksiyona girer. Çalışma sıcaklıkları PEMYH'den daha yüksektir. DMYH $120^\circ C$ civarında çalışabilmektedirler. %40 verimle çalışırlar. Fakat PEMYH'den farklı olarak daha yüksek miktarda platin katalizörüne ihtiyaç duyulan bir sistemdir. Bu da maliyetinin yükselmesine neden olmaktadır. Sistemin sıvı yakıt kullanımına olanak sağlaması önemli avantajlarındandır.

DMYH teknolojisi cep telefonları ve diz üstü bilgisayarlarda potansiyel bir güç kaynağı olarak geliştirilen bir teknolojidir [Çetinkaya, M. ve Karaosmanoğlu, F, 2003].

Tablo 6.2. Yakıt Hücrelerinin çalışma sıcaklığı ve elektrolite göre sınıflandırılması [Larminie, J., Dicks, A., 2000].

Yakıt Hücresi Çeşidi	Mobil İyon	Elektrolit	Yakıt	Çalışma Sıcaklığı (°C)	Verim (%)	Kullanım Alanları
AYH	OH ⁻	KOH	Hidrojen	50-200	50-70	Uzay araçlarında kullanım
PEMYH	H ⁺	Polimer	Hidrojen	50-100	35-60	Özellikle araçlarda ve mobil sistemlerde, aynı zamanda ufak sabit sistemlerde
FAYH	H ⁺	Orto Fosforik Asit	Hidrojen	220	35-50	Orta ölçekli sabit sistemlerde
EKYH	CO ₃ ²⁻	Karbonat Karışımı	Hidrojen, Metan	650	40-55	Orta ve büyük ölçekli sabit sistemlerde
KOYH	O ²⁻	Stabilize Zirkonyum	Hidrojen, Metan	500-1000	45-60	Her büyüklükteki sistemler
DMYH	H ⁺	Polimer	Metanol	60-130	35-40	Diz üstü bilgisayarlar, Cep telefonları

6.2. Yakıt Hücresi Sistemi

Bir yakıt hücresi sistemi genel olarak yakıt işleme ünitesi, güç üretim sistemi, güç dönüştürücü ve kontrol sistemi olmak üzere dört üniteden oluşmaktadır.

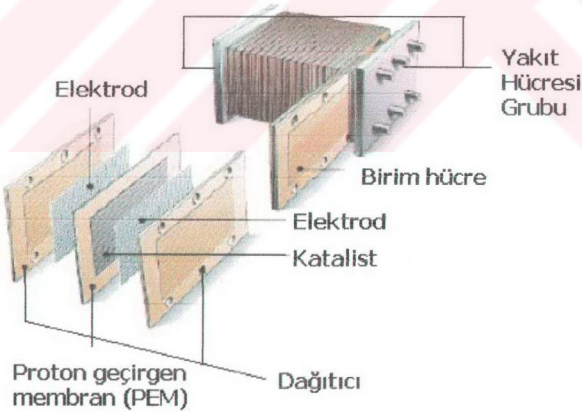
Yakıt işleme ünitesinde yakıt, hücreye gönderilmeden önce hazırlanır ve direkt hidrojen kullanılmıyorsa hidrojenin malzemeden ayrıştırılması işlemi yapılır. Güç üretim sistemi, bir veya birden fazla yakıt hücresinin birleşmesiyle meydana gelir [Oral. E. ve Çelik. V., 2005].

Güç dönüştürücü ünite, elde edilen doğru akımın alternatif akıma dönüştürülmesi işlemi gerçekleşir. Kontrol sisteminde ise sistemin tüm işleyişi denetlenir ve kontrol altında tutulur [Oral, E. ve Çelik, V., 2005].

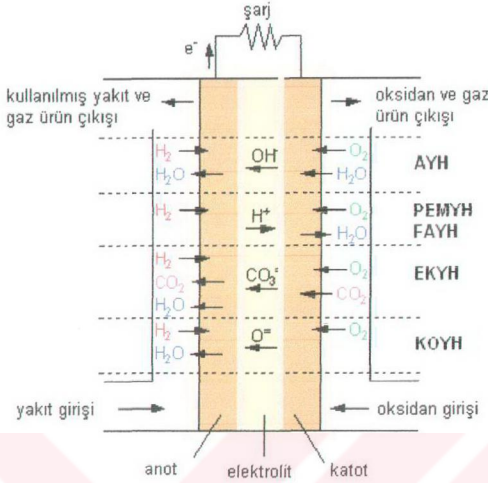
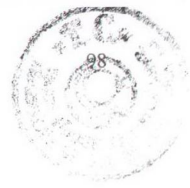
Yakıt hücresi sisteminde bunların dışında fan, kompresör, nem ünitesi, ısı değiştirici ve AC/DC dönüştürücü gibi yardımcı elemanlar da kullanılır [Oral, E. ve Çelik, V., 2005].

İTÜ'de doğrudan metanol yakan metanol/hava yakıt hücresi çalışmaları yapılmaktadır. Bu uygulamada PEM yakıt hücresi tekniği uygulanmaktadır. Metanol taşınması kolay ve enerji yoğunluğu yüksek olduğu için tercih edilmiştir [Kadırgan, F., 2002].

Yakıt hücresi teknolojisinde tüpsel, düzlemsel ve monolitik olarak üç şekilde gerçekleştirilen hücrelerin yığın haline getirilme şekli, 1000°C'deki çalışmalar için bipolar katalizör ve ara bağlantıda kullanılan malzemeler ve 600-800°C'de kullanılabilecek elektrolit malzemeleri ve bunların geliştirilmesi konusunda çalışmalar yoğunlukla devam etmektedir [Kadırgan, F., 2002].



Şekil 6.8 Yakıt Hücresi Birimleri [Kammen, D., 2001]



Şekil 6.9 Farklı tip yakıt hücrelerinin çalışma prensibi [Barbir. F., 1998]

6.3. Taşıtlarda Yakıt Hücresi Kullanımı

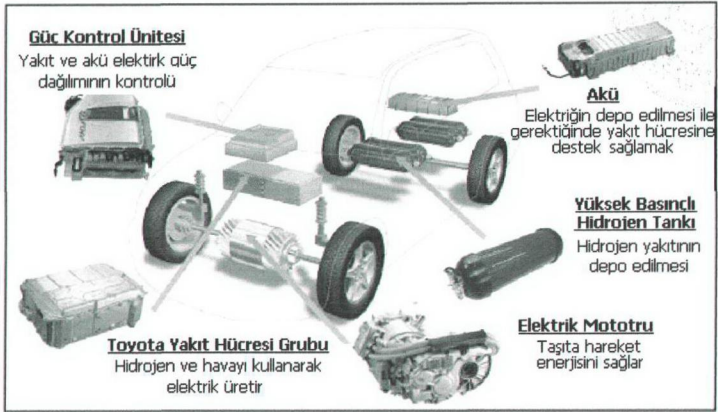
Elektrikli taşıtlar 4 ana grupta incelenebilir [Çetinkaya, M, Karaosmanoğlu, F, 2003]:

- Enerjiyi doğrudan hattan alan (tren, tramvay, metro gibi)
- Enerjiyi depolanmış bir sistemden alan (akülü ve ultra kapasitörlü taşıtlar)
- Taşınabilir bir sistemle anında enerji üreten (yakıt hücresi ve fotovoltaik pilli taşıtlar)

- Hibrit taşıtlar (Benzin-yakıt hücresi, motorin-yakıt hücresi)

Bu uygulamalar içerisinde yakıt hücresi elektrikli taşıtlar pek çok avantajı bulunduğu için tercih edilmektedir [Çetinkaya, M. ve Karaosmanoğlu, F, 2003].

Taşıtlarda yakıt hücresi kullanımı hidrojenin veya hidrokarbon yakıtların kullanıldığı, DC'den AC'ye dönüşümü gerçekleştiren elektrik akımını kullanarak, AC elektrik motorlarıyla tahrik oluşturma prensibiyle gerçekleşir. Yanma prensibiyle çalışan motorlardaki yüksek sıcaklıkta çalışma, yüksek atalet momentlerinin oluşması, titreşim ve gürültü seviyesinin yüksek olması gibi sorunlar bu sistemle aşılmıştır. Yakıt hücresi motorlarda verim, diğer geleneksel motorlara göre iki kat daha fazladır [Oral, E. ve Çelik, V., 2005].



Şekil 6.10 Toyota Yakıt Hücresi Sistemi [Oral, E. ve Çelik, V., 2005]

Bu sistem temel olarak yakıt tankı, yakıt hücresi, akım dönüştürücü ve elektrik motorundan meydana gelmektedir. Direkt olarak hidrojenin kullanılmadığı, metanol, doğalgaz gibi yakıtların kullanıldığı sistemlerde yakıtın yeniden şekillendirilip yakıt hücresine hazır hale getirilmesi için bir reformer (şekillendirici) kullanılmaktadır [Oral, E. ve Çelik, V., 2005].

Günümüzde birçok otomobil firması yakıt hücreli otomobil sistemleri için önemli ölçüde çalışmalar ve ortaklıklar gerçekleştirmektedir. Hidrojenin depolanması ve taşınması için de büyük petrol şirketleri de bu ortak çalışmalarda yer almaktadır [Oral, E. ve Çelik, V., 2005].

Tablo 6.3 Toyota ve Ford yakıt hücreli otomobillerinin karşılaştırılması [Oral, E. ve Çelik, V., 2005]

	TOYOTA FCHV	FORD P 2000
Yakıt	Sıkıştırılmış hidrojen (35 Mpa)	Sıkıştırılmış hidrojen
Maksimum hız	155 km/h	128 km/h
Menzil	300 km	160 km
Yakıt hücresi	PEM	PEM
Elektrik motoru	AC (Alternatif akım)	AC (Alternatif akım)
Maksimum güç	80 kW (109 HP)	67 kW (90 HP)
Maksimum Tork	260 Nm	190 Nm

6.4. Hidrojen ve Yakıt Hücresi Maliyeti

Maliyet hesabında benzinin maliyetini 0,3 \$/lt olarak alabiliriz.

Hidrojenin doğalgazın buhar reformasyonundan gaz halde elde edilmesini ele alacak olursak maliyetin 65 cent/kg olduğunu görürüz. Bu da 4,61cent/L'dir. Doğalgazdan hidrojen üretim yöntemi, doğalgazın hem ithal bir kaynak olması sebebiyle hem de çevreyi kirlетici etkisi diğer yöntemlerden biraz daha fazla olduğu için tercih edilmez.

Elektrolizle hidrojen üretim yöntemi maliyeti ise kullanılan elektriğin fiyatına göre değişim göstermektedir. Elektrik fiyatını yaklaşık olarak 3cent/kWh alırsak hidrojen maliyetine 0,42 L'lik bir etkisi olur. Buna yaklaşık olarak 800 \$/kW'lık bir elektroliz cihazı fiyatı eklenirse bunun etkisi 0,26 L benzin eşdeğeri olur.

Hidrojenin sıvılaştırılarak depolanıp taşınması daha uygundur. Bu nedenle sıvılaştırma maliyetini de 0,1\$/L benzin eşdeğeri olarak hesaba katabiliriz. Sonuç olarak maliyet 0,78 \$/L benzin eşdeğeri olur.

Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanımında verim benzin motorlarına göre daha yüksek olur. Hidrojen yakan motorlarda organik asit ve karbon depozitlerinin oluşumu olmadığından benzin motoruna göre daha uzun ömürlü olduğu görülür. Hidrojenin yakıt hücresel sistemlerde kullanımı içten yanmalı motorlara göre iki kat daha verimlidir. Maliyetlerinin düşürülmesiyle yakıt hücresi kullanımının çok daha verimli olması beklenmektedir [www.taek.gov.tr].

Freedom Car projesinde yapılan çalışmalar elektroliz ve yakıt hücresi maliyetlerinin daha çok düşürülmesi, elektroliz cihazının veriminin artırılması üzerine yoğunlaşmıştır. 2010 yılında hidrojenin pazar fiyatının 0,4 \$/lt benzin eşdeğeri olması hedeflenmektedir [www.taek.gov.tr].

Tablo 6.4 Yakıt Hücresi Maliyetleri [www.taek.gov.tr, 2004]

Yakıt hücresi tipi (büyüklüğü)	Yatırım maliyeti (\$/kW)	Elektrik maliyeti (\$/kWh) (\$/MWh cinsinden)
PEM Yakıt hücresi		
10 kW (bugün)	3000	0,25-0,30
10 kW (gelecekte)	1150	0,09-0,095
7 kW (2001)	8500	Belirtilmemiş
7 kW (2003)	4000	0,07-0,10
Fosforik Asit Yakıt Hücresi		
25 kW (gelecekte)	2250	0,13
200 kW (bugün)	3000	Belirtilmemiş
250 kW (gelecekte)	2440	0,13
Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	0,11-0,16
Belirtilmemiş	3500	Belirtilmemiş
Belirtilmemiş	3000	Belirtilmemiş
100 MW	1000	Belirtilmemiş
Katı Oksit Yakıt Hücresi		
Belirtilmemiş (gelecekte)	1000	0,06-0,08
Belirtilmemiş (gelecekte)	2000 (system)-700	Belirtilmemiş
Belirtilmemiş (gelecekte)	700 (system)	Belirtilmemiş
Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi		
25 kW (gelecekte)	1355	0,12
250 kW (gelecekte)	1740	0,11
2 MW (ticari hale gelmemiş)	1700	Belirtilmemiş
2 MW (ticari)	1200	Belirtilmemiş
3,25 MW (gelecekte)	1330	0,1
100 MW (gelecekte)	600	0,06
100 MW (dış yeniden oluşturma)	2900	0,12
100 MW (iç yeniden oluşturma)	2000	0,1
100 MW (yakıt yeniden işlenmiyor)	1700	0,08
Alkali Yakıt Hücresi		
163 MW	Belirtilmemiş	0,07

7. HİDROJEN ENERJİSİNİN DÜNYA'DAKİ GELİŞİMİ

Japonya'da yürütülen WE-NET projesi kapsamında hidrojen kullanımıyla oluşabilecek azot oksit emisyonu miktarını düşürme çalışmaları devam etmektedir. Bu proje Japonya'nın Uluslararası Ticaret ve Endüstri Bakanlığı'na desteklenmektedir. Japonya 2020 yılına kadar hidrojen enerjisi yatırım ve projeleri için 4 milyar \$'lık bir bütçe ayırmıştır. Yine gerçekleştirilmek istenen projeleri arasında Pasifik denizinin ekvator bölgesinde yapay bir ada üzerinde solar radyasyonla deniz suyunun elektroliziyle hidrojen üretimi de yer almaktadır [www.eie.gov.tr, 2005].

Japonya'da Tokyo Electric Company tarafından kurulan 11 MW'lık bir elektrik santrali Rokko adasında elektrik ve ısı ihtiyacını karşılamaktadır. Kapasiteleri 50 MW ve 500 MW arasında değişen yüzlerce yakıt pili bulunmaktadır. Tokyo'nun elektrik ihtiyacının 40.000 kW'lık bir bölümü hidrojen enerjisi sistemleriyle sağlanmaktadır [www.eie.gov.tr, 2005].

Yakıt hücreli sistemlerin gelişimi için destek veren birçok firma bulunmaktadır. Bunlar Japonya'da, Tokyo Electric Company'nin yanı sıra Sanyo, Hitachi, Toshiba, Kawasaki, Fuji Electric, Kansai Electric, Amerika'da, Westinghouse, Institute of Gas Technology (IGT), Unocal, San Diego Gas and Electric, Avustralya'da Ceramic Fuel Cell Ltd, Avrupa'da Siemens KWU, Dornier System, Sulzer Innotec olarak sayılabilir [www.eie.gov.tr, 2005].

Siemens'in California'da kurmuş olduğu 250 kW'lık yakıt hücreli kojenerasyon sistemi 200 konutun elektrik ve ısı ihtiyacını karşılamaktadır [www.eie.gov.tr, 2005]. Ballard firması PEM tipi yakıt hücresi ile çalışan 250 kW'lık elektrik, 230 kW'lık ısı kapasitesine sahip jeneratörleri satışa sunmuştur [www.eie.gov.tr, 2005].

Honda firması da bu konudaki projelerini sürdürmektedir. Bu projeler arasında doğalgazdan elde edilen hidrojenin araçlarda kullanımı ve evlere kurulacak olan sistemlerle konutların elektrik ve ısı ihtiyacını karşılayan 'Hidrojen Ev Enerji

İstasyonu' isimli projeyi sayabiliriz. Bu proje için California'da deneysel olarak kurulan bir evde araştırmalar devam etmektedir [www.eie.gov.tr, 2005].



Şekil 7.1 Siemens Yakıt Hücreli Kojenerasyon Sistemi [www.eie.gov.tr, 2005]

Almanya'da ise Münih havaalanında kullanılan araçların hidrojen ile çalışması düşünülmektedir. Neurenburg yakınlarında ise mini bir hidrojen üretim merkezi kurulmuştur. Solar-Wasserstoff-Bayern'in kurduğu güneş-hidrojen sistemi üretim ve depolama alanlarında çalışmaktadır [www.eie.gov.tr, 2005].

Almanya bunun yanı sıra Suudi Arabistan'la ortak yürüttüğü Hysolar programı ile Riyad yakınlarında güneş hidrojen üretim tesisi projesi üzerinde çalışmaktadır. Suudi Arabistan ürettiği hidrojeni ihraç etmeyi planlamaktadır [www.eie.gov.tr, 2005].

Avrupa ve Kanada'nın ortak yürüttüğü Euro-Quebec projesi ile Kanada'da hidrogüçle üretilen sıvı hidrojenin deniz yoluyla Avrupa'ya taşınması planlanmaktadır [www.eie.gov.tr, 2005].

İzlanda'da hükümet, üniversiteler, taşıma şirketleri, fabrikalar ve çok uluslu otomobil ve petrol şirketlerinin oluşturduğu konsorsiyum, İzlanda'nın 2030 yılına kadar tamamen hidrojen enerjisine geçmesi için çalışmalarına başlamıştır. Ayrıca ilk hidrojen dolum istasyonu Shell tarafından İzlanda'da açılmıştır [www.eie.gov.tr, 2005].

İspanya'da INTA solar hidrojen tesisi projesi, Almanya, İtalya ve Norveç'te küçük ölçekli fotovoltaiik hidrojen sistemleri yürütülmektedir. Ayrıca Almanya'da POHOEBUS pilot tesisi projesi başlatılmıştır [www.eie.gov.tr, 2005].

Tayvan'da kullanılan araçların %65'inin scooter olması dolayısıyla yakıt hücresiyle çalışan scooter kullanımı teşvikleri yapılmaktadır. Asya Pasifik Yakıt Pili Teknolojisi Ltd. ve Kwang-Yang Motor Co. İşbirliğiyle ZES (sıfır emisyonlu scooter) üretimi yapılmaktadır [www.eie.gov.tr, 2005].

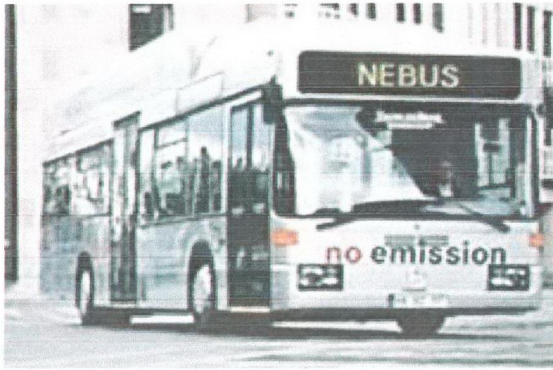
Brezilya ve Güney Amerika'daki en büyük hidrojen tesisi olan Haipu'da elektrolitik hidrojen gazı üretilmektedir [www.eie.gov.tr, 2005].

Kuzey Amerika'da yapılan well-to-wheel projesi General Motors ve Amerikan Argonne Ulusal laboratuvarları işbirliğiyle gerçekleştirilmektedir. BP, ExxonMobile ve Shell'in desteklediği temiz enerji kaynaklarına yönelim projesi kapsamında hidrojen kullanımına yönlendirme çalışmaları yapılmaktadır [Winter U. and Weidner H., 2003].

Londra'da bulunan Royal Dutch Shell firması Shell Hidrojen adında bir araştırma merkezi kurmuştur. Buraya 500 milyon \$'lık yatırım yapılmıştır. Bunun yanı sıra BP de hidrojen konusunda çalışmalarına başlamıştır [www.eie.gov.tr, 2005].

1993'den bu yana hidrojenle çalışan birçok prototip araç üretilmiştir. Daimler Chrysler sıvı hidrojenle çalışan NECAR4'ü ve metanol dönüştürücülü NECAR5'i üretmiştir. General Motors 75kW'lık yakıt hücresi ile çalışan Opel Zafira'yı üretmiştir. Ford'un ürettiği Think FC5, Toyota'nın ürettiği RAV-4 ve Fine-N de yine hidrojenle çalışmaktadır. Nissan Renessa ve Mitsubishi, Daihatsu, Honda ve Mazda ortaklığıyla üretilen Demio FCEV ve Renault'un yakıt hücresiyle çalışan Laguna modeli bu prototiplere örnek olarak verilebilir.

Büyük şehirlerde Mercedes-Chrysler tarafından çevre kirliliğini azaltmak için denenilen 30 adet 70 kişilik toplu taşıma aracı, 10 Avrupa başkentine dağıtılmış durumdadır [www.eie.gov.tr, 2005].



Şekil 7.2 Mercedes-Chrysler Hidrojenle Çalışan Toplu Taşıma Aracı
[www.eie.gov.tr, 2005]

Canada, Montreal'de 1993 yılından beri %15-20 hidrojen ve %80-85 doğalgaz karışımı ile çalışan bir otobüs denenmektedir [www.eie.gov.tr, 2005].

Amerika'daki Duffy Boats firması her biri 1,5 kW gücündeki 4 yakıt hücresiyle çalışan bir tekne üretmiştir [www.eie.gov.tr, 2005].

General Motors'un üretmiş olduğu hidrojenle çalışan Zafira model aracı, son olarak HydroGen3 olarak piyasaya sunulmuştur. HydroGen3, daha önce üretilmiş olan HydroGen1 ve HydroGen2'nin geliştirilmiş halidir. 2001'den beri birkaç adet HydroGen3 üretilmiştir. Hem sıkıştırılmış hem de sıvı hidrojen kullanılabilen bu sistemde 4, 6 kg sıvı hidrojen depolanabilmektedir. Araç bu yakıtla 400 km yol alabilmektedir [Helmolt R.V., 2004].

İstanbul'da bulunan Uluslararası Hidrojen Enerjisi Teknolojileri Merkezi projeleri kapsamında İstanbul'a hidrojen yakıtlı otobüslerin çalıştırılması ve Bozcaada'da bir hidrojen üretim merkezi kurulma çalışmaları da yer almaktadır. Ayrıca merkezin projeleri arasında Suudi Arabistan'da bir güneş-hidrojen üretim merkezinin kurulup Türkiye'ye ve Türkiye üzerinden Avrupa'ya hidrojen nakletme projeleri yer almaktadır [www.eie.gov.tr, 2005].

8. TÜRKİYE VE GÜNEŞ ENERJİSİ

Türkiye, sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli bakımından birçok ülkeye göre şanslı bir konumdadır. Elektrik İşleri Etüt İdaresi'nin yapmış olduğu çalışmaya göre Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat, günlük toplam 7,2 saat, ortalama toplam ışıınım şiddeti yılda 1311 kWh/m², günlük toplam 3,6 kWh/m² olarak hesaplanmıştır. Aşağıdaki tabloda Türkiye'nin aylara göre güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi değerleri verilmektedir [www.eie.gov.tr].

Tablo 8.1 Türkiye'de Aylara Göre Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Güneşlenme Süreleri [www.eie.gov.tr]

	Aylık Toplam Güneş Enerjisi		Güneşlenme
	(Kcal/cm ² ay)	(kWh/m ² ay)	Süresi (Saat/ay)
Ocak	4,45	51,75	103
Şubat	5,44	63,27	115
Mart	8,31	96,65	165
Nisan	10,51	122,23	197
Mayıs	13,23	153,86	273
Haziran	14,51	168,75	325
Temmuz	15,08	175,38	365
Ağustos	13,62	158,40	343
Eylül	10,60	123,28	280
Ekim	7,73	89,90	214
Kasım	5,23	60,82	157
Aralık	4,03	46,87	103
Toplam	112,74	1311	2640
Ortalama	308,0 cal/cm ² gün	3,6 kWh/m ² gün	7,2 saat/gün

Türkiye'nin en çok güneş alan bölgesi Güney Doğu Anadolu bölgesidir. Onun hemen ardından Akdeniz Bölgesi gelmektedir. Aşağıdaki tabloda bölgelere göre güneş enerjisi potansiyeli dağılımı ve güneşlenme süreleri verilmiştir [www.eie.gov.tr].

Tablo 8.2 Türkiye'nin Yıllık Güneş Enerjisi Potansiyelinin Bölgelere Göre Dağılımı [www.eie.gov.tr].

Bölge	Toplam Güneş Enerjisi (kWh/m ² yıl)	Güneşlenme Süresi (Saat/yıl)
G.D. Anadolu	1460	2993
Akdeniz	1390	2956
D. Anadolu	1365	2664
İç Anadolu	1314	2628
Ege	1304	2738
Marmara	1168	2409
Karadeniz	1120	1971

Türkiye’de güneş enerjisinden daha çok su ısıtma sistemlerinde yararlanılmaktadır. 2001 yılı için ülkemizde 7,5 milyon m² civarında kurulu güneş kolektörü bulunmaktadır. Yine 2001 yılı verilerine göre Türkiye’nin ısısal güneş enerjisi bakımından Çin, A.B.D. ve Japonya’dan sonra 4. sırayı aldığı görülmektedir. Türkiye’de kullanılan güneş pili kurulu gücü ise 300 kW civarındadır. Ülkemizde güneş pili kullanılan yerler, telekom istasyonları, Orman Genel Müdürlüğü yangın gözetleme istasyonları, deniz fenerleri ve otoyol aydınlatmasıdır [www.eie.gov.tr].

8.1. Güneş-Hidrojen Enerjisi Maliyetleri

Dünyada üretilen hidrojenin %4’lük bir kısmı suyun elektroliziyle üretilmektedir. Bu düşük yüzdenin sebebi, elektroliz yöntemi için gerekli olan elektrik enerjisinin fazla olmasından dolayı pahalı bir yöntem olmasıdır. Solar-hidrojen sistemlerinde fotovoltaiik sistem kurulum maliyeti hidrojen maliyetinin %85’i kadardır [www.nap.edu, 2004].

Gelecekte global enerji ihtiyacının güneş enerjisinden karşılanacağı düşünülmektedir. Solar enerjiden yararlanarak hidrojen üretimi için iki yöntem bulunmaktadır. Birinci metod fotovoltaiik pil kullanarak elde edilen elektrik enerjisini suyun elektrolizinde kullanıp hidrojen elde etme yöntemidir. İkinci bir yöntem ise

foto-elektrokimyasal veya termokimyasal yöntemler kullanarak sudan direkt hidrojen üretme yöntemidir [www.nap.edu, 2004].

Günümüzde kullanılan ticari fotovoltaiik modüllerin yaklaşık %85'i tek kristal ve polikristal silikon yapıdadır. İkinci bir fotovoltaiik teknolojisi ise ince film amorf teknolojisidir [www.nap.edu, 2004].

Günümüzde solar modül maliyet değerleri 3-6 $\$/W_p$ civarındadır. Solar pillerin geleneksel elektrik üretim yöntemleriyle rekabet edebilmesi için bu değeri 1 $\$/W_p$ 'a düşmesi gerekmektedir [www.nap.edu, 2004].

Bugünkü teknolojiyle, kurulum maliyetleri 3,28 $\$/W_p$, elektrik maliyeti ise 0,32 $\$/W_p$ ve hidrojen maliyeti ise 28,19 $\$/kg$ olarak hesaplanmıştır. Gelecekteki olası teknolojiye göre ise kurulum maliyetinin 1,011 $\$/W_p$ 'a düşürülmesi beklenmektedir. Bu da ancak elektrik maliyetinin 0,098 $\$/kWh$ ve hidrojen maliyetinin ise 6,18 $\$/kg$ olmasıyla gerçekleşecektir [www.nap.edu, 2004].

Foto-elektrokimyasal yöntemler kullanılarak solar enerjinin suyun direkt bozunmasıyla hidrojen elde edilmesi konusunda araştırmalar olumlu sonuç vermektedir. Bu metotta ışık, elektrik enerjisi ve kimyasal enerjiye dönüşür. Katı inorganik oksit bir elektrod, fotonları absorbe etmeye ve oksijen ve elektron sağlamaya yarar. Elektronlar harici bir devre yardımıyla metal elektroda doğru hareket eder ve hidrojen bu elektrodta serbest bırakılır. Bu yöntemde kullanılabilecek inorganik oksitler, $SrTiO_3$, $KTaO_3$, TiO_2 , SnO_2 ve Fe_2O_3 'tür. Bu yöntemle daha düşük maliyetlerle güneş enerjisinden hidrojen elde edilebilir [www.nap.edu, 2004].

Kısa vadede ince film solar pillerin maliyeti düşürüldüğünde, orta ve uzun vadede organik polimer yapılı solar piller ve uzun vadede yoğunlaştırılmış güneş enerjisi kullanılarak suyun direkt bozunmasıyla hidrojen üretimi yöntemlerinin maliyetleri düşürüldüğünde solar hidrojen enerjisi yöntemi maliyet açısından uygun bir yöntem haline gelecektir [www.nap.edu, 2004].

8.2. Güneş-Hidrojen Sistemi Uygulaması

Burada bir örnek çalışma olarak güneş enerjisinden faydalanarak elektrik enerjisi üretimi ve bu üretilen elektrik enerjisinin dolum istasyonlarına aktarılmasıyla hidrojen üretimi konulu bir model ele alınmıştır. Üretilen hidrojen, dolum istasyonunda araca aktarılacak ve araç bu hidrojenin mekanik enerjiye dönüştürülmesiyle hareket edecektir. Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü ışması yüksek bir kolektör sahasında güneş panelleri yardımıyla yapılmaktadır. Elde edilen enerji yüksek gerilim hatlarıyla, gerekli dönüşümler yapıldıktan sonra elektrik şebekesine verilebilir. Dolum istasyonunda güneş enerjisinden elde edilmiş bu temiz elektrik enerjisi elektroliz ile hidrojen eldesi için harcanmaktadır. Emisyon olarak oksijen açığa çıkmaktadır. Hidrojenin araçta depolanması basınçlı gaz tankı sayesinde olmaktadır. Buradaki uygulamada güneş paneli maliyetleri açısından ve yakıt sarfiyatı mukayesesi ilişkisiyle inceleme yapılmaktadır. Elektrik enerjisi dönüşümü, aktarımı ve elektroliz gibi yatırımlar ve masraflar ihmal edilmektedir. Bununla birlikte güneş ışınımı süresinin günde 4,5 saat ve panel veriminin %14 gibi düşük değerler seçilmesiyle bu ihmallerin karşılandığı düşünülmektedir. Panel verimlerinin günümüzde %20'lere çıktığı ve gelişen teknolojiyle daha da verimli hale geleceği düşünülürse hesapta kullanılan panel verim değerinin düşük olduğu görülür. Ayrıca fosil yakıt fiyatlarının da giderek artması hidrojen enerjisiyle arasındaki farkı giderek azaltmaktadır. Otomobilin yakıt hücreli olacağı kabul edilmekte ve bu teknolojinin getireceği ek maliyet buradaki hesaba dahil edilmemektedir.

Güneş paneli olarak kullanılan model;

Sharp US 42 Solar Panel

Pil Verimi :%14

Pil Alanı :1,3 m²

Max. Güç :150 W

Fiyatı :947 \$

Panelden;

$150 \text{ W} \div 1,3 \text{ m}^2 = 115 \text{ W/m}^2$ 'lik enerji elde ederiz.

Bu hesaba göre solar panel maliyeti;

$947 \$ \div 1,3 \text{ m}^2 = 750 \$/\text{m}^2$

Gün içerisinde güneş ışıını değişim gösterdiğinden (ortalama 800W/m^2), güneş ışığından tam verimle ortalama 4,5 saat faydalanabildiğimiz düşünölürse, bir güneş panelinden

$$800 \times 4,5 \times 14 \div 100 = 500\text{W/m}^2 \text{ 'lik elektrik enerjisi elde ederiz.}$$

Araç : HYUNDAI Tucson

Yakıt : Hidrojen (350 bar)

Yakıt Tankı : 152 litre (3,5 kg)

Yol : 300 km

Bir aracın günde ortalama 40 km yol katettiğı düşünölürse,

Bu aracın 0,46kg/gün'lük hidrojen tüketimi vardır.

0,46kg hidrojeni elektrolizle elde etmek için 25 kWh'lik elektrik enerjisi harcamamız gerekmektedir.

25 kW'lık güç elde etmek için

$$25 \text{ kW} \div 500\text{W/m}^2 = 50 \text{ m}^2 \text{ 'lik solar panel alanına ihtiyacımız vardır.}$$

Bir araç için: $750\$/\text{m}^2 \times 50\text{m}^2 = 37.500 \$$ 'lık solar panele ihtiyacımız vardır.

Bir araç yılda ortalama 15.000 km yol katetmektedir.

10 yılda;

$$15.000 \times 10 = 150.000 \text{ km}$$

Solar panel fiyatı 2,5 $\$/\text{W}$ 'a düşünölürse, kurulum maliyeti ise

$$115\text{W/m}^2 \times 2,5\$/\text{W} = 320 \$/\text{m}^2 \text{ 'ye düşer.}$$

Kurulum maliyeti ise bir araç için;

$$320 \times 50 = 16.000 \$ \text{ hesaplanır.}$$

Yine bir aracın günde 40 km yol katettiğı düşünölürse;

Dizel yakıtların yakıt sarfıyatı 4 $\$/\text{gün}$ 'dür. Bu da yılda 14.600 \$ etmektedir. Bir araç için solar-hidrojen enerji sisteminin maliyetiyle yaklaşık aynı değerdedir.

Sistemin kurulumu için kişi başına 15.000 $\$$ 'ı kurulum maliyetine karşılık alınsın. Devletin bu sistemin kurulumundan kazanacağı vergi kişi başına 6.000 \$ olsun. 6.000 $\$$ 'ın 10 yıl sonraki değeri yaklaşık 15.000 \$ olur. Devletin, fosil yakıtlı aracın tüketiminden aldığı verginin 10 yıl sonraki değeri 17.000 $\$$ 'dır. Devletin kazanacağı para değeri yaklaşık olarak aynıdır. Bu sistem devlet için uzun vadede uygulanabilir bir sistem olarak göröllebilir. Kullanıcı açısından ise araç maliyetleri düşünölmedikçe maddi açıdan karlı bir sistem olarak görölmemektedir.



Şekil 8.1 Hyundai Tucson Hydrogen Car

[www.yehey.com/lifestyle/motoring/article2.aspx?id=11462]

Elektroliz için gerekli enerjiyi yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemlerinden Merkezi Kule sistemiyle elde edecek olursak;

Merkezi Kule sisteminin kurulum maliyeti 3000 Euro/kW'tır.

$3000 \text{ Euro/kW} = 3 \text{ Euro/W} = 3,65 \text{ \$/W}$ bulunur.

(Euro/\$ = 1,2152)

Bu sistemin verimi %30'dur. Güneş yoğunlaştırıcı sistemlerin teknolojilerinin gelişmesiyle hem elektroliz, hem de termokimyasal su ayrıştırma metotları için kullanımında daha olumlu sonuçlar elde edilmesi beklenmektedir.

9. SONUÇ

Bu çalışmada 21. yüzyılın enerjisi olarak görülen hidrojen enerjisinin dünyadaki durumu incelenmiş, değişik üretim ve depolama seçeneklerinin kıyaslaması yapılmış, dünya ve Türkiye için güneş enerjili bir uygulama seçeneği üzerinde durulmuştur. Hidrojen birincil enerji kaynağı olmayıp, bir enerji taşıyıcısıdır. Yenilenebilir bir enerji olan hidrojen enerjisi, çevresel yönden çok temiz ve çok verimli bir enerji türüdür. Hidrojen üretimi için fosil yakıtlardan yararlanılacağı gibi güneş, rüzgâr, hidrolik ve jeotermal gibi yenilenebilir enerjilerden de yararlanılabilir. Bunlar arasında en uygunu güneş-hidrojen sistemi olarak görülmektedir. Türkiye güneş enerjisi açısından şanslı bir ülkedir. Güneş enerjisinin kullanılabilir düzeyde olduğu güneş kuşağı içinde yer almaktadır. Güneş enerjisiyle elde edilen elektrikle suyun ayrıştırılarak hidrojen elde etme yöntemi Türkiye’de uygulanabilir bir yöntemdir. Bu yöntemle hidrojen üretimi hem yerli, hem de çevre dostu bir yöntemdir. Gelişen teknolojiyle beraber güneş enerjisi sistemlerinin verimlerinin de artırılmasının, dünyada ve Türkiye’de solar hidrojen sisteminin gelişmesini sağlayacağı düşünülmektedir.

Fosil yakıtların kullanımı gelişen teknolojiyle beraber artmaya devam etmektedir. Bu da çevre kirliliğinin ve beraberinde getirdiği sorunların da artması anlamına gelmektedir. Bu sorunların aşılması için yeni ve yenilenebilir, çevre dostu enerji sistemlerinin kullanılmasına ağırlık verilmelidir. Bu konuda en çok öne çıkan enerji çeşidi hidrojen enerjisidir. Maliyeti fosil yakıtlardan fazla görünse de fosil yakıtların çevreye verdiği zarar da hesaba katıldığında hidrojenin fosil yakıtlara göre daha ucuz bir yakıt olduğu ortaya çıkmaktadır. Gelişen teknolojiyle beraber hidrojen üretim ve depolama maliyetlerinin de düşmesi beklenmektedir. Ayrıca hidrojen üretiminde fosil yakıtların değil, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması da dikkat edilmesi gereken bir husustur. Hidrojen üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile çevre dostu bir üretim sağlanmış olur.

Bu tez çalışmasında yapılmış olan fotovoltaik güneş-hidrojen üretim sistemi kurulum maliyeti hesabı uygulaması, fotovoltaik pil teknolojisinin gelişmesiyle bu sistemin uygulanabilirliğini göstermiştir. Sistem devlet açısından uzun vadede uygulanabilir görülmektedir. Kullanıcı açısından bakıldığında ise bu yöntemle

Üretilen hidrojen yakıtının kurulum maliyetinin fosil yakıt kullanım maliyetine yakın olduğu görülmüştür. Buradaki analizde diğer kurulum ve kullanım maliyetleri ihmal edilmiştir. Fakat çevreyi kirletici emisyonu olmadığı da hesaba katılırsa, efektif maliyet açısından çok daha karlı bir enerjidir.

Türkiye güneş enerjisi açısından şanslı bir ülke konumundadır. Güneş yoğunlaştırıcı sistemler kullanılarak suyun yüksek sıcaklıkta hidrojen ve oksijene ayırıtılması yöntemiyle hidrojen üretimi de Türkiye için uygulanabilecek bir yöntemdir.

Türkiye hidrojen enerjisi uygulamaları için uygun bir ülke pozisyonundadır. Hidrojen enerjisinin kullanımıyla Türkiye'deki enerji ile ilgili dışa bağımlılık ve evre kaygılarının önüne geçilebilir.

KAYNAKLAR

Akkerman, I. and et.al. "Photobiological Hydrogen Production: Photochemical Efficiency and Bioreactor Design". International Journal of Hydrogen Energy 27, 2002

Akgün, N., 2005 "Rüzgar Enerjisi Nereden Gelmektedir" www.meteor.gov.tr [PDF]

Altmann M., Dr. Niebauer, P., Pschorr-Schoberer, E., Dr. Zittel, W., (2005) "WHySE Wind-Hydrogen Supply of Electricity Markets – Technology – Economics", www.hyweb.de/Wissen/pdf/windpw00.pdf

Atlas, N., Fikret H., Çelebi E., (1998), "Enerji İstatistikleri" TUBITAK-TTGV

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

Bak T., Nowotny J., Rekas, M., Sorrell C.C., 2002, "Photo-electrochemical hydrogen generation from water using solar energy. Materials-related aspects", International Journal of Hydrogen Energy 27 (2002) 991 – 1022

Bartholomy, O., "Renewable Hydrogen From Wind in California", National Hydrogen Association, March, 2005

Baykara, Z.S., "Sudan Hidrojen Üretimi ve Enerji Sektöründe Hidrojen", YTÜ, Kim.Müh.Böl., İstanbul, 2003

Baykara Z.S., 2004, "Hydrogen production by direct solar thermal decomposition of water, possibilities for improvement of process efficiency", International Journal of Hydrogen Energy 29 (2004) 1451 – 1458

Baykara Z.S. ve Bilgen E., "Solar Hidrojen Production From Water and Coal : an Engineering and Economic Assessment", 14. Dünya Enerji Konferansı (14th. WEC), 17-22 Eylül 1989, Montreal, Kanada

Bilici U., "Enerji Taşıyıcısı Hidrojen, Hidrojen Taşıyıcısı Sodyum Bor Hidrür", Maden Mühendisleri Odası Madencilik Bülteni, Sayı 67, 2003

Bilim ve Teknik Dergisi, "Güneş Pillerinin Yapısı ve Çalışması", Sayı: 432 (Kasım 2003)

Bodek, P. And Alxneit, I., "Rekin, an Experiment to Study The Kinetics of the Oxidation of Zinc Vapor — Conceptual Overview and Design", 1998

Choudhury, S.R., Deshmukh, M.B., Rengaswamy, R., "A Two Dimensional Steady-State Model For Phosphoric Acid Fuel Cells", Journal of Power Sources 112, 137-152, 2002

Chuan Wu, Huaming Zhang, Baolian Yi, "Hydrogen generation from catalytic hydrolysis of sodium borohydride for proton exchange membrane fuel cells", Catalysis Today 93-95 477-483, 2004

Çalık A., "Türkiye'nin Bor Madenleri ve Özellikleri" Mühendis ve Makina Dergisi, Sayı 508, Mayıs 2002

Çelik, A.N., "A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey" Renewable Energy 29 593-604, 2003

Çetinkaya, M, Karaosmanoğlu, F., "Yakıt Pilleri" Mühendis ve Makina Dergisi, Sayı 520, Mayıs 2003

Diñçer, I., "Technical, Environmental and Exergetic Aspects of Hydrogen Energy Systems", International Journal of Hydrogen Energy 27, 2002

Doğanay, H., (1995), "Türkiye Ekonomik Coğrafyası", Öz Eğitim Yayınları, İstanbul

Energy Information Administration August Monthly Energy Review,
www.eia.doe.gov/emeu/mer/dataunits.html, 2005

European Research on "Concentrated Solar Thermal Energy", Community Research,
2004

Hawkes, A.D., Aguiar, P., Hernandez-Aramburo, C.A., Leach, M.A., Brandon, N.P.,
Green, T.C., Adjiman, C.S., "Techno-economic modelling of a solid oxide fuel cell
stack for micro combined heat and power", Journal of Power Sources, 2005

Helmolt, R.V., (2004), "Fuel Cell Vehicles at General Motors", Fuel Cells 4, No. 4,
Weinheim

Hiç, S., (1990), Türkiye Ekonomisi, Mentеше Kitabevi, İstanbul

Huang, C. and Raisi A.T., Analysis of sulfur-iodine thermochemical cycle for solar
hydrogen production. Part I: decomposition of sulfuric acid", Solar Energy 78 632–
646, 2005

İmalı, Z. (2003), "Hidrojen Enerjili Sistemlerde Ekserji Analizi". Yüksek Lisans
Tezi. Marmara Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul

Kadırgan, F., "Hidrojenli Yakıt Hücreleri Teknolojilerinde Son Gelişmeler",
www.hidrojenforumu.com/html/makale02.htm, 2002

Kadiroğlu O.K. ve Sökmen C.N., "Nükleer Enerji İle Elektrik Üretimi", Bilim ve
Teknik Dergisi Haziran-1994, Sayı:319

Kalafatoğlu, İ.E. ve Örs, S.N., "21. Yüzyılda Bor Teknolojileri ve Uygulamaları"
Balıkesir Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5-1, 2003

Kammen, D., Energy & Society, Lecture #24 :Fuel Cells, Energy Storage and
Hydrogen, 2001

Kaneko H., Gokon N., Hasegawa N., Tamaura Y., "Solar thermochemical process for hydrogen production using ferrites", *Energy* 30 2171–2178, 2005

Kapkin, S., "Black Sea, A Hydrogen Source", *Proceedings International Hydrogen Energy Congress and Exhibition IHEC 2005 Istanbul, Turkey, 13-15 July 2005*

Kepenek, Y., (1990), "Türkiye Ekonomisi", Verso Yayıncılık, 1. Baskı, Ankara

Kern M, Klipp W, Klemme J.H. "Increased Nitrogenase-Dependent H_2 Photoproduction by hup mutants of *Rhodospirillum rubrum*". *Appl Env Microbiol*; 60(6), 1994

Larminie, J. And Dicks A., "Fuel Cell System Explained" John Wiley and Sons, Ltd, Baffins Lane, Chichester, West Sussex, P019 1UD, ENGLAND, 2000

Licht S., 2004 "Solar water splitting to generate hydrogen fuel—a photothermal electrochemical analysis", *International Journal of Hydrogen Energy* 30 (2005) 459 – 470

Lindblad, P. and Tamagnini, P. "Cyanobacterial Hydrogenases and Biohydrogen: Present Status and Future Potential" in *Biohydrogen II: An Approach to Environmentally Acceptable Technology.*, Miyake, Matsunaga, Pietro:Editors, Elsevier Science Ltd. New York Pergamon, 2001

Mandacı, S. (2002), *Biyolojik Hidrojen Üretimi TÜBİTAK-Gen Mühendisliği ve Biyoteknoloji Araştırma Enstitüsü (GMBAE) Moleküler Biyoenerjetik laboratuvarı*

Marthai, S.M., "A Wind Driven Power Generating System: Preliminary Modeling of Power Curves", A Thesis of Bachelor of Science, Department of Physics, Houghton College, 2003

Momirlan, M. ve Veziroğlu, T.N., "Current Status of Hydrogen Energy", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2002

MPR Associates, Inc., "Hydrogen Production Methods", MPR-WP-0001, 2005

Nandi R. and Sengupta S. "Microbial Production of Hydrogen: An Overview". Critical Rev Microbiol; 24(1), 1998

Nolte, R., "Fuel cell vehicles at GM/OPEL", Journal of Power Sources 4573 1-7, 2001

Oral E., Çelik V., "İdroyen Yakıtlı Motor Teknolojisi" Mühendis ve Makina Dergisi Sayı 540, 2005

Pehr, K., Sauermann, P., Traeger, O. and Bracha, M. (2001), "Liquid Hydrogen for Motor Vehicles-the world's first public LH₂ filling station" International Journal of Hydrogen Energy 26

Perkins, C. and Weimer, A.W., 2004 "Likely near-term solar-thermal water splitting Technologies", International Journal of Hydrogen Energy 29 (2004) 1587 – 1599

Pinto F. and et.al. "A Brief Look at Three Decades of Research on Cyanobacterial Hydrogen Evolution". International Journal of Hydrogen Energy 27, 2002

Sahan, (2002), "Meraklısına Bor Raporu", www.bozkurt.net/cgi-bin/forum/rboard1/robboard.cgi

Sayın C., Çanakçı M., "Otomotiv Dünyasında İdeal Enerji Kaynağı: Yakıt Pilleri", Makina Tek Dergisi, Sayı 78, Nisan 2004

Sarı, Z., "Alkali Yakıt Pili Bileşen-Başarım İlişkisi", Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2002

Shtrakov S. and Stoilov A., (2004), "Finite Difference Method for Thermal Analysis of Passive Solar System With Massive Wall", Third International Conference on "Numerical Analysis and Applications", 2004, Rousse, Bulgaria

Smitha, B., Sridhar, S., Khan, A.A., "Solid Polymer Electrolyte Membranes for Fuel Cell Applications-A Review", Journal of Membrane Science 259, 10-26, 2005

Soruşbay, C. ve Arslan, E., "Hidrojen Yakıtlı İö-çten Yanmalı Motorlarda Yanma Performansı", Mühendis ve Makina Dergisi, Cilt 29, Sayı 339

Şahin A.D., “Türkiye Rüzgarlarının Alan-Zaman Modellemesi” İTÜ Fen bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2001

Şahin A.D., “Güneş-Rüzgar-Hidrojen Hibrit Sistemleri”, www.hidrojenforumu.com/kongre2konusma/ozet_ahmetduran.htm, 2004

Tezcan, E., “Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Kullanımı”, Mühendis ve Makina Dergisi, Sayı 485, Haziran 2000

Tsygankov A., “Hydrogen Photoproduction by Purple Bacteria: Immobilized vs. Suspension Cultures”. Biohydrogen II: An Approach to Environmentally Acceptable Technology. . Editors: Miyake, Matsunaga, Pietro. Elsevier, New York Pergamon p. 229-243. , 2001

Turner, J.A., 2003, Photoelectrochemical Water Splitting”, www.nrel.gov

Türe, E.. “Güneş Enerjisi ile Hidrojen Üretimi”, www.hidrojenforumu.com/kongre2konusma/ozet_ieture.htm, 2003

Türker, L., Eroğlu, İ., Yücel, M., Gündüz, U., “Hydrogen Capability of Carbon Nanotube Be@C₁₂₀”, International Journal of Hydrogen Energy 29 1643-1647, 2004

Türkiye 5. Enerji Kongresi- Dünya Enerji Konseyi - Türk Milli Komitesi, 22-26 Ekim 1990, Ankara(ENERJİ ve ÇEVRE)

T.C. Başbakanlık D.P.T. Müsteşarlığı Yayın No: DPT: 2414 – ÖİK: 474, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu, Kimya Sanayii Hammaddeleri Çalışma Grubu Raporu “Bor Mineralleri, Torona, Sodyum Sülfat, Stronsiyum Mineralleri, Tuz”, 1995

Ültanır, M.Ö., "21. Yüzyıla GİRERKEN Türkiye'nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi". Türk Sanayiciler ve İşadamları Derneği Raporu, TÜSİAD T/98-12/239, 1998

Ün Ü.T., “Hidrojen Enerjisi:Depolanması, Güvenliği, Çevresel Etkisi ve Dünyadaki Durumu” Mühendis ve Makina Dergisi, Sayı 525, Ekim 2003

Verma, A. And Basu, S., “Direct Use of Alcohols and Sodium Borhydride As Fuel In an Alkaline Fuel Cell”, Journal of Power Sources, 2005

Veziroğlu, T.N., Bockris, J.O’M. and Smith, D. , 1991. “Solar Hydrogen Energy”, Optima, London.

Veziroğlu, T.N. & Barbir, F., (1998) “Hydrogen Energy Technologies”, Emerging Technology Series, A1400., UNIDO, Vienna, Austria

Veziroğlu T.N. and Protsenka, A.N., “ Hydrogen Energy Progress VII (3 vols.), Proceedings of the 7 th WHEC”, Pergamon Press, Oxford, 1988.

Winter U. and Weidner H. (2003), “Results of GM/Opel’s Well-to-Wheel Studies in North America and Europe”, Fuel Cells 3, No. 3, Weinheim

İnternet Kaynakları:

www.antimai.org, 2004

www.asif.co.sr, 2004

www.balikesir.edu.tr, “<http://bor.balikesir.edu.tr/bor.html>”, 2002

www.bilim.org, 2005

www.biltek-tubitak.gov.tr, 2004

www.bp.com, BP-Statistical Review of World Energy Report-2005

www.eere.energy.gov, 2003

www.eie.gov.tr/hidrojen/teknolojik_gelismeler.html, 2005

www.fizikdosyasi.com, 2005

www.h2eco.org, 2004

www.iaea.org/NewsCenter/focus/NuclearPower/table_of-reactors.pdf, 2004

www.istanbul.edu.tr, 2005

www.kocri.boun.edu.tr, 2004

www.meteor.gov.tr, 2005

www.nap.edu, "The Hydrogen Economy, Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs", The National Academies Pres, Washington, D.C., 2004

www.nrel.gov/docs/fy01sti/27954.pdf, 2001

www.shec-labs.com/process.php, 2005

www.teraenerji.com, 2004

www.taek.gov.tr/taek/td/html/hidro.htm, 2004

www.tubitak.gov.tr, 2003, Çevre Dostu ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile İlgili Teknolojiler – Alt Grup Raporu, 2003

www.tubitak.gov.tr, 2005, Enerji Üretiminde Verimliliği Artırmaya, Çevreyi Korumaya Yönelik Teknolojiler-Alt Grup Raporu, 2005

www.uaf.edu/cop-ext/publications/freepubs/EEM-01256.pdf, 2005

www.annso.freesurf.fr/MCFC.html, 2005

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi : 27.03.1979
Doğum Yeri : İznik/BURSA
Lise : 1992-1995 Bursa Cumhuriyet Lisesi
Lisans : 1996-2000 Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi,
Enerji Öğretmenliği Bölümü
Yüksek Lisans : Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve
Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Anabilim Dalı