

**GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ PEM
ELEKTROLİZLERİNDE HİDROJEN ÜRETİMİNİN
DENEYSEL İNCELENMESİ**

**2014
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

İsmail DOĞU

**GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ PEM ELEKTROLİZLERİNDE HİDROJEN
ÜRETİMİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

İsmail DOĞU

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Haziran 2014**

İsmail DOĞU tarafından hazırlanan “GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ PEM ELEKTROLİZLERİNDE HİDROJEN ÜRETİMİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç.Dr. Mehmet ÖZKAYMAK

Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 25/06/2014

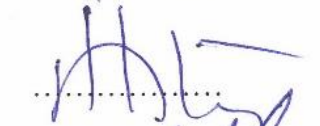
Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

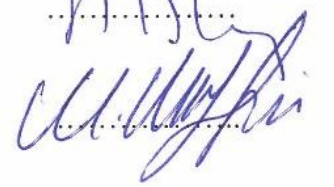
Başkan : Doç.Dr. Yaşar YETİŞKEN (KBÜ)



Üye : Doç Dr. Mehmet ÖZKAYMAK (KBÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Muhammet KAYFECİ (KBÜ)



...../...../2014

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Mustafa BOZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

İsmail DOĞU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ PEM ELEKTROLİZLERİNDE HİDROJEN ÜRETİMİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

İsmail DOĞU

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK

Haziran 2014, 66 Sayfa

Alternatif enerji kaynaklarına olan talebin giderek artması, enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılan güneş, rüzgar, biokütle gibi enerji kaynaklarının verimli bir şekilde kullanımını ön plana çıkartmıştır. Alternatif enerji kaynaklarının yaygın olduğu bölgelerde enerji üretimi üzerine çalışmalar devam etmektedir.

Günümüzde sürdürülebilir yaşam alanları oluşturmak için sürdürülebilir enerji stratejilerini uygulamak, iklim değişimi ve küresel ısınma ile mücadelede önemli hale gelmiştir. Hidrojen enerjisi ve yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen elde edilmesi bu problemlerin çözümünde önemlidir. Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi yoluyla elektrik enerjisi ve hidrojen üretilmesi incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler : Hidrojen enerjisi, elektroliz, fotovoltaik.

Bilim Kodu : 905.1.033

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HYDROGEN PRODUCTION WITH SOLAR ASSISTED PEM ELECTROLYSIS

İsmail DOĞU

**Karabük University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Energy Systems Engineering**

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK

June 2014, 66 Pages

Ever-growing increase in the demand for the alternative power resources has given rise to the issue of effective use of such power energy like sun, wind, biomass that are utilized to meet the demand to the electricity. The concerns on and search for the use of existing alternative power resources within potential areas are under progress.

Today, implementing sustainable energy strategies for creating a sustainable living space is important for combating against climate change and global warming. Hydrogen energy and production of hydrogen from renewable energy sources is important for the solution of these problems. In this study, production of electrical energy and hydrogen using photovoltaic energy was studied.

Key Word : Hydrogen energy, electrolyser, photovoltaic.

Science Code : 905.1.033

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans öğrenimim sırasında ve tez çalışmalarım boyunca gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı kıymetli hocam Doç. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK' a çok teşekkür ederim.

Ayrıca tezin hazırlanması ve deney uygulamalarında bilgi ve tecrübeleri ile bana her konuda yardımcı olan değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Muhammet KAYFECİ' ye teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarımda beni sabırla destekleyen aileme ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
BÖLÜM 1.	1
GİRİŞ	1
1.1. DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE ENERJİ GÖRÜNÜMÜ	2
1.2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI.....	4
BÖLÜM 2.	6
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	6
2.1. GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ ELEKTRİK ÜRETİM SİSTEMLERİ PİLOT PROJELER	6
2.1. YENİLENEBİLİR ENERJİ DESTEKLİ HİDROJEN ÜRETİM SİSTEMLERİ PİLOT PROJELER.....	9
2.2.1. Nemo Projesi	9
2.2.2. Freiburg Güneş Evi Projesi.....	10
2.2.3. Saphys Projesi.....	10
2.2.4. TroisRivières Projesi	11
2.2.5. Inta Projesi	11
2.2.6. Schatz Projesi.....	12
BÖLÜM 3.	13
GÜNEŞ ENERJİSİ VE HİDROJEN.....	13

	<u>Sayfa</u>
3.1. GÜNEŞ ENERJİSİ	13
3.1.1 Güneş Pillerinin Tarihsel gelişimi	13
3.1.2. Güneş Pillerinin Çalışma Prensib	14
3.1.2.1. N Jonksiyon	15
3.1.2.2. P Jonksiyonu	15
3.1.2.3. P-N Jonksiyonu	15
3.1.3. Güneş Pillerinin Çeşitleri	18
3.1.3.1. Kristal Silisyum Güneş Pilleri	18
3.1.3.2. Monokristal Silisyum Güneş Pilleri	18
3.1.3.3. Semikristal (Yarıkristal) Silisyum Güneş Pilleri	19
3.1.3.4. Ribbon Silisyum Güneş Pilleri	19
3.1.3.5. Polikristal Silisyum Güneş Pilleri.....	19
3.1.3.6. İnce Film Güneş Pilleri	19
3.1.3.7. Amorf Silisyum Güneş Pilleri	19
3.1.3.8. Bakır İndiyum Diselenoid Güneş Pilleri.....	20
3.1.3.9. Diğer Yapılar	21
3.1.4. Güneş Pillerinin Verimini Sınırlayan Etkenler	21
3.1.4.1. Sıcaklık Etkeni.....	21
3.1.4.2. Yüzey Parametresi Etkeni	22
3.1.4.3. Spektral Etkeni	23
3.1.4.4. Foto Açısız Etken	23
3.2. HİDROJEN ENERJİSİ	23
3.2.1. Hidrojenin tanımı.....	24
3.2.2. Hidrojenin Kullanım Alanları.....	25
3.2.3. Hidrojen Enerjisinin Dünyadaki Gelişimi	25
3.2.4. Hidrojen Enerjisi Üzerine Türkiye’de Yapılan Çalışmalar	27
3.2.5. Hidrojen Üretimi	28
3.2.5.1. Kömür Gazlaştırılması.....	28
3.2.5.2. Biyokütleden Hidrojen Üretimi	29
3.2.5.3. Elektroliz İle Sudan Hidrojen Üretimi.....	29
3.2.5.4. Bor Mineralinden Hidrojen Üretimi	31
3.2.6. Hidrojenin Depolanması.....	32

	<u>Sayfa</u>
3.2.6.1. Sıvı Olarak Tanklarda Depolama	33
3.2.6.2. Gaz Olarak Tanklara Depolama	34
3.2.6.3. Metal Hidrürler Şeklinde Depolama.....	34
3.2.6.4. Sodyum Alanatlarda Depolama	36
3.2.6.5. Sodyum Bor Hidrür Esaslı Depolama	37
3.2.6.6. Nanotüplerde Depolama	37
BÖLÜM 4.	38
MATERYAL VE METOD	38
4.1. DENEY TESİSATINDA KULLANILAN MATERYALLER	38
4.1.1. Deney Tesisatı	38
4.1.2. Elektrolizör	39
4.1.3. Akım ve Gerilim Ölçer	40
4.2. EKSERJİ ANALİZİ	41
4.3. FOTOVOLTATİK SİSTEMİN ANALİZİ.....	43
4.3.1. Fotovoltaik Sistemlerin Modellenmesi.....	43
4.3.2. Fotovoltaik Sistemlerde Enerji ve Ekserji Analizi	47
4.4. PEM ELEKTROLİZ SİSTEMİNİN ANALİZİ	50
4.4.1. PEM Elektroliz Sisteminin Modellenmesi	50
4.4.2. PEM Elektroliz Enerji ve Ekserji Analizi.....	54
BÖLÜM 5.	57
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	57
BÖLÜM 6.	61
SONUÇ VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR	62
ÖZGEÇMİŞ	67

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Silisyuma bor ve fosfor ilave edilmiş P-N tipi yarıiletken	16
Şekil 3.2. Elektron-delik çifti oluşması.....	17
Şekil 3.3. Taramalı elektron mikroskobu altında özel yapılı silisyum yüzeyin Görünümü	22
Şekil 3.4. Taramalı elektron mikroskobu altında özel yapılı silisyum yüzeyin görünümü	23
Şekil 3.5. Kömür gazlaştırma işlemi.....	29
Şekil 3.6. Biyokütleden hidrojen üretimi	29
Şekil 3.7. Elektroliz ile hidrojen üretimi.....	31
Şekil 3.8. Dikey tip metal hidrür depolama	36
Şekil 4.1. Deney Standı.....	39
Şekil 4.2. 2 hücreli PEM elektrolizör.....	40
Şekil 4.3. Dijital Avometre	41
Şekil 4.4. Fotovoltaik Hücrenin tek diyotlu modeli.....	43
Şekil 4.5. Fotovoltaik panellerin hücre sıcaklığının ortam sıcaklığı ile değişimi.....	45
Şekil 4.6. Fotovoltaik panel için Matlab-Simulink blokları.....	46
Şekil 4.7. Fotovoltaik panelin maksimum çalışma noktası.....	48
Şekil 4.8. PEM elektroliz için hazırlanan MatlabSimulink Modeli.....	54
Şekil 4.9. Elektroliz prensip şeması	55
Şekil 5.1. Akım ve gerilim değerinin değişimi	58
Şekil 5.2. Işınmın şiddetine bağlı PV gücünün geçişimi	58
Şekil 5.3. PV panel gücünün panel sıcaklığına bağlı değişimi	59
Şekil 5.3. Üretilen hidrojen miktarının PV panel sıcaklığına bağlı değişimi	59

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1. Fosil Kaynakların ortalama ömrü büyük rezerv sahibi ülkeler.....	2
Çizelge 1.2. Dünyada ve Türkiye’de birincil enerji kaynakları dağılımı.....	3
Çizelge 3.1. Hidrojen depolama yöntemlerinin kıyaslanması	33
Çizelge 3.2. Hidrür depolamada kullanılan alaşımların performans kıyaslamaları ...	35
Çizelge 4.1. Enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması	39

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Cd	: Kadmiyum
CuInSe	: Bakır indiumselenoid
Ge	: Germenyum
Ga	: Galyum
I_{p1}	: Deliklerin oluşturduğu akım
I_{p2}	: Azınlık deliklerin oluşturduğu akım
I_{n1}	: Elektronların oluşturduğu akım
I_{n2}	: Azınlık elektronların oluşturduğu akım
Mwe	: Mega Watt Elektriksel Güç
MWt	: Mega Watt Isısal Güç
N	: N tipi yarıiletken
P	: P tipi yarıiletken
PV	: Fotovoltaik
Si	: Silisyum
Te	: Tellür
TW	: TeraWatt
TWh	: Teravat Saat
KWh	: Kilovat Saat
KW	: Kilovat
O ₂	: Oksijen
A	: Amper
V	: Volt
Mbar	: Milibar

KISALTMALAR

EIE	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi
DMİ	: Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nün
IHEA	: Uluslararası Hidrojen Enerjisi Birliği
İKÜ	: İstanbul Kültür Üniversitesi
MIS	: Metal-Yalıtkan-Yarıiletken Güneş Pilleri
RES	: Rüzgar Enerjisi Santralleri
TE	: Termoelektrik Modül
TEP	: Ton Eşdeğer Petrol
THEME	: Hidrojen Ekonomisi Miami Enerji Konferansı
TTGV	: Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Enerji, günlük hayatımızda ihtiyaçlarımızı karşılama ve yaşamımızı devamlı kılabilmek için vazgeçilmezdir. Günümüzde temiz ve yenilenebilir enerjiye her zamankinden fazla ihtiyacımız var. Eriyip tükenen enerji kaynakları bu gün bir kere daha alternatif enerji kaynaklarına olan gereksinimimizi hatırlatmaktadır. Doğadan ilham almanın ve çevremizde canlı cansız her şeyle barış içerisinde olmamızın ve dayanışmamızın hatırlatmasıdır belki de. Enerji bu yönleriyle toplum ve doğa arasındaki etkileşimde vazgeçilmez bir unsurdur.

Günümüzde enerji üretiminde kömür, petrol, doğalgaz gibi fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Enerji üretiminde fosil kaynaklı yakıtlar kullanıldığı düşünüldüğünde ve Çizelge 1.1'de fosil yakıtların rezerv ömürleri incelendiğinde yakın gelecekte fosil yakıtların tükenme risk ile karşı karşıya olduğu görülmektedir. Önümüzdeki 50 yıl içerisinde fosil yakıtların yerini alacak güvenilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır.

1970'li yıllarda ortaya çıkan petrol krizleri, enerji fiyatlarında yaşanan yükseliş ve 1990'lı yıllarla gelişmeye başlayan temiz çevre bilinci, geleneksel enerji üretim ve tüketiminin hem çevre hem de doğal kaynaklar üzerinde yerel ve küresel seviyede olumsuz etkilerinin olduğunun anlaşılmasıyla, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi daha da artırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini artıran öğelerin başında, toplumların taşıdığı çevresel kaygılar gelmektedir. Küresel ısınma, iklim değişikliği, atmosfer kirliliği veya sera etkisi gibi değişik kelimelerle adlandırılacak bu kaygıların temelinde, yoğun kullanılan fosil yakıtların atmosfere bıraktıkları zararlı gazların artması yatmaktadır.

Çizelge 1.1. Fosil kaynakların ortalama ömrü büyük rezerv sahibi ülkeler.

Kaynaklar	İspatlanmış Rezerv	Yıllık Üretim	Rezerv Ömrü(yıl)	Rezerv sahibi ülke	Ülkedeki pay (%)
Petrol (milyar ton)	164,50	3,914	42	Suudi Arabistan	22
Doğalgaz (trilyon ton)	181,46	2865	63	Rusya	26.3
Kömür (milyar ton)	909,06	6,195	147	A.B.D	27.1

1.1. DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE ENERJİ GÖRÜNÜMÜ

Son yıllarda, araştırmacıların ve politikaların merkezinde enerji gelmektedir. Genel enerji dengesi içinde dünyada ve ülkemizde kullanılan birincil enerji kaynaklarında kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar ağırlıklarını korumaktadırlar. Tüketilen birincil enerji kaynaklarının dağılımına bakıldığında bu durum Çizelge 1.2.'de açık şekilde görülmektedir. Dünyadaki genel enerji ve nüfus durumuna bakıldığında, 1900 yılında nüfusu 1,6 milyar, birincil enerji tüketimi yaklaşık 1000 Mtep olan Dünya'nın, 2000 yılında nüfusu yaklaşık 6,6 milyara ve birincil enerji tüketimi ise 8534 Mtep düzeyine ulaşmıştır. Buna göre 100 yıllık süreçte dünya nüfusunun yaklaşık 4,1 katı, birincil enerji tüketiminin ise 8,5 katına arttığı görülmektedir. 2003 yılı itibariyle, dünyada kişi başına düşen elektrik enerjisi tüketimi incelendiğinde, 16,968 kWh/kişi ile Kanada ilk sırada yer almaktadır. Kalkınmanın göstergesi olarak tanımlanan kişi başına düşen elektrik enerjisi tüketiminde, 2000 yılı itibariyle dünya ortalamasının 2,343 kWh/kişi olduğu görülmektedir. Buna karşılık ülkemizde kişi başına düşen elektrik enerjisi üretimi 1,564 kW/kişi değeriyle dünya ortalamasının oldukça altındadır (Atılğan, 2000).

Çizelge 1.2. Dünyada ve Türkiye’de birincil enerji kaynakları dağılımı.

Yıl	Ülke	Oran(%)					
		Kömür	Doğal Gaz	Hidrolik	Nükleer	Petrol	Diğer
1990	Türkiye	30.5	5.9	3.8	-	45.1	14.6
	Dünya	27.5	22.1	6.1	5.6	38.7	-
2006	Türkiye	26.6	28.5	5.0	-	32.6	7.3
	Dünya	28.4	23.7	6.3	5.8	35.8	-

Fosil yakıtların rezerv sorunu, arz güvenliği ve çevresel etkiler sebebiyle yenilenebilir enerji konusunda en ciddi yatırımlar Avrupa Birliğinde yapılmaktadır ve 2009 yılında yıllık rüzgar güç kapasitesinin 10163 MW artarak 74767 MW olduğu görülmektedir. Bu oran bir önceki yıla göre % 23 artışa karşılık gelmektedir. Ayrıca yine 2009 yılı boyunca yenilenebilir enerji güç kapasitesindeki artış 26363 MW büyüklüğünde gerçekleşmiştir. Bu dönemde AB ülkeleri kömür doğal gaz ve nükleer enerji seçeneklerinden uzaklaşmıştır. İspanya, Almanya ve İtalya’nın bu dönemde en fazla rüzgar güç kapasitesini artırdığı görülmüştür. Yenilenebilir enerjinin bu dönemde toplam yeni güç kapasitesi 26363 MW’a ulaşmıştır. Bunun 10163 MW (%39) rüzgar, 6630 MW (% 25) doğal gaz, 4600 MW (% 17) fotovoltaik, 581 MW (% 2.2) biomas olmuştur (www.ewea.org, 2009).

Türkiye’nin 1990–2008 yılları arası nüfus artışı hızı % 1.6 oranında iken üretilen enerjideki artış miktarı % 7 oranında olup 198.6 milyar kWh değerine ulaşmıştır. 2007 yılında yenilenebilir enerji kaynakları üretim ve tüketimi, 36 milyar kWh ve toplam birincil enerji kaynakları arzının da % 23’ü olarak gerçekleşmiştir (Erdogan, 2008). Yenilenebilir enerji kaynakları üretimi, toplam kömür üretiminden sonra ikinci en yüksek üretime sahip kaynaklardır. Yenilenebilir enerji kaynakları arzının yaklaşık üçte ikisini biomas (odun, hayvan ve bitki artıkları) oluşturmaktadır. Geri kalan üçte birlik kısmında ise hidrolik enerji yer almaktadır. Türkiye’de bugün yenilenebilir kaynaklardan en çok hidrolik enerji ve klasik biomas enerji kullanılmaktadır. Türkiye’nin brüt hidrolik potansiyeli 430 milyar kWh/yıl, teknik

potansiyeli 215 milyar kWh/yıl ve kullanılabilir hidrolik potansiyeli de 125 kWh/yıl olarak verilmektedir. 2007 yılı yıllık ortalama enerji üretimi 35.85 milyar kWh'dir. TEAŞ tarafından hazırlanan "Enerji Üretim Planlaması" çalışmalarına göre, ülkemizdeki kurulu güç kapasitesinin, 2010 yılında 60000 MW'a, 2020 yılında ise 104000 MW'a çıkartılması öngörülmüştür (Ültanır, 1998).

Ülkemiz coğrafi konumu açısından güneş kuşağı içerisinde bir ülke olarak tanımlanmaktadır. Yıllık ortalama güneş alma süresi 2609 saat olup, yılın yaklaşık % 30'unu güneş alarak geçirmektedir. Türkiye'de şimdilik kurulu 3 milyon m² güneşli su ısıtıcı kolektörlerle kullanılan güneş enerjisi 120 Btep/yıl düzeyinde olup, ekonomik potansiyelin % 0.5'ine karşılıktır. Kurulu kolektör alanı ile en az 500 MW'lık ısı güce karşılıktır. Ortalama güneş enerjisi yoğunluğu günlük metrekaşe başına 3.6kWh'dir. Türkiye'nin güney ve batı bölgelerinde güneş kolektörleri su ısıtmak amacıyla yaygın olarak kullanılmakta ve gün geçtikçe de artmaktadır (Şenaktaş, 2005).

1.2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

Yenilenebilir enerji kaynakları, sürekli devam eden doğal süreçlerdeki var olan enerji akışından elde edilen enerjilerdir. En genel olarak, yenilenebilir enerji kaynağı; enerji kaynağından alınan enerjiye eşit oranda veya kaynağın tükenme hızından daha çabuk bir şekilde kendini yenileyebilmesi olarak tanımlanır. Yenilenebilir enerji kaynakları tükenmeyen ve konvansiyonel enerji kaynaklarından çevreye en az zarar veren kaynaklardır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının her biri çeşitli uygulamalar için özel avantajlara sahiptir. Bu kaynakların hiçbiri işlemleri boyunca ne sıvı ne de gaz olarak kirlilik oluşturmazlar. Yenilenebilir enerji kaynaklarının bir diğer önemli yanı, yeni iş alanları yaratmasıdır. Modern yenilenebilir enerji çeşitleri şunlardır;

- Hidroelektrik Enerji
- Jeotermal Enerji
- Rüzgar Enerjisi
- Biyokütle Enerjisi
- Deniz Kökenli Yenilenebilir Enerji

- Hidrojen Enerjisi
- Güneş Enerjisi

Yenilenebilir enerji kaynakları kullanımında pasif (direkt, doğrudan) ve aktif (endirekt, dolaylı) olmak üzere iki sistemden yararlanılmaktadır. Direkt kullanım örnekleri, jeotermal ısıtma, su veya rüzgâr değirmenleridir. Bu örneklerde ısıtma ve soğutma maliyetleri önemli oranlarda azaltılarak enerji korunumu sağlanabilir. Endirekt (aktif) sistem ise güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik ve ısı enerjisi elde etmek amacıyla yapıya bütünleşmiş edilen mekanik donanımlarla sağlanmaktadır. Örnek olarak, elektrik üretiminde kullanılan rüzgâr türbinleri veya fotovoltaik piller verilebilir.

Yenilenebilir enerji, ücretsiz enerji olarak kategorize edilebilse de, çoğu yenilenebilir enerji kaynağına normalde ücretsiz enerji denemez. Mühendislikte, ücretsiz enerji ile kastedilen direkt olarak doğadan elde edilebilen ve insanlar tarafından tüketilmesi mümkün olmayan enerjidir.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. GÜNEŞ ENERJİ DESTEKLİ ELEKTRİK ÜRETİM SİSTEMLERİ PİLOT PROJELER

Güneş enerjisi ile elektrik elde etme üzerine birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan bazıları araştırılmış ve aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Külünk ve Eyice, yenilenebilir enerji kaynakları ve bunların sistem dizaynı ve hesaplarını teorik olarak incelemiştir. Güneş enerjisi, düşük, orta ve yüksek sıcaklık uygulamalarıyla beraber güneş tarlaları ve tuz eriyikli sistemlerin teorik hesaplarını ve yaşayan örneklerini inceleyip açıklamışlardır. Sistem verimi hakkında teorik hesaplar yapmışlardır (Külünk ve Eyice, 1983).

Uyarel ve Öz, güneş enerjisinin uygulama alanlarını ve nerelerde güneş enerjisi kullanıldığını incelemiştir. Bilinen güneş enerjisi sistemlerinin yanında Fotovoltaik sistemler ve elektrik enerjisi elde edilmesi detaylandırılmış ve örneklenmiştir. Güneş geometrisi ve güneşe ait tüm hareket ve açı hesapları teorik olarak formülize edilmiştir (Uyarel ve Öz, 1987).

Kılıç ve Öztürk, güneş enerjisinin geçmişten günümüze gelişimini açıklamıştır. Güneşli sistemlerin ilk günkü ve bugünkü durumu incelenmiştir. Bununla birlikte ışınım şiddetinin yoğunlaştırılması, toplayıcılarını optik analizleri ve hesapları incelenmiştir. Enerjinin en basitten karmaşığa depolanması da incelenmiştir (Kılıç ve Öztürk, 1983).

Pırasacı ve Sivrioğlu yayınladıkları makalelerinde güneşe göre yönünü çevirmeye gerek kalmayan bir odaklayıcı sistem hesabı üzerinde çalışmışlardır. Sistem bir

parabolü andıran tasarımın daha da gelişmiş halidir. Toplam üç adet yansıtıcısı mevcuttur. Her yansıtıcı kendine düşen güneşi odaktaki bulunan boruya odaklamaktadır. Böylelikle güneş hangi açı ile gelirse gelsin tamamen odakta buluşmaktadır. Bu çalışma mantığına göre sistemi güneşi takip eden bir donanımla desteklemeye gerek kalmamaktadır. Bu yönü ile avantaj teşkil etmektedir. Fakat üretimi zor olan bu sistemin deneysel sonuçları bilinmemektedir (Pırasacı ve Sivrioglu, 2002).

Güven vd, yayınladıkları makalelerinde güneş enerjisinin ısı uygulamaları ve alternatif uygulamaları üzerinde çalışmışlardır. Güneş kulelerini inceleyip hayata geçirilmiş çeşitli uygulamalar hakkında bilgi vermişlerdir. Çalışan ya da tasarım aşamasındaki sistemlerin kıyası, kullanılan parametreler ve sistemlerin fayda-maliyet analizleri hakkında bilgi vermişlerdir (Güven vd, 2004).

Bulut, yayınladığı makalesinde termoelektrik soğutma ile ilgilenmiştir. Termoelektrik soğutma nedir, çalışma sistemi, sistem tasarımı, sistem parametreleri ve termoelektrik soğutma sistemlerin tasarımındaki önemli parametreleri açıklamışlardır. Termoelektrik soğutucuların kullanım alanları, avantaj ve dezavantajları da makale içerisinde yer almaktadır (Bulut, 2005).

Thomas vd, yaptıkları çalışmada, enerji geri kazanımı hakkında çalışma yapmışlardır. Makalede biyolojik yani çevreci enerji kaynaklarını incelemişlerdir. Bunlar fotovoltaiik sistemler, termoelektrik sistemler şeklindedir. Sistem performanslarını analiz edip en iyi verimle kullanımı ve çalışan çevreci olmayan sistemlere eklenmesi ve enerji geri kazanımı hakkında teorik bilgi sunmuşlardır (Thomas et al, 2006).

Lertsatitthanakorn, soba kullanılan evlerde sobanın ölü kısmında (duvar dönük yüzünde) meydana gelen yüksek sıcaklığın TE modüllerin sıcak yüzeyine, TE modüllerin diğer yüzeyini ise duvara (dış duvar-dış yüzey) yerleştirerek elde edilen sıcaklık farkı ve bu farktan faydalanan TE modülden elde edilen elektrik enerjisi üzerinde çalışmışlardır. TE biokütle fırınlı soba için bir TE çalışması yapmıştır. Bu çalışmada sonuçlar göstermektedir ki 150 °C sıcaklık farkında sistem 2,4 W güç

üretmiştir. Bu üretilen güç küçük radyo veya bir akkor ampulün çalışmasına yetecek güçtedir. Kesintili ve kararsız bir elektrik kaynağının olduğu ortamlarda bu çalışmanın potansiyel pazarı mevcuttur (Lertsatitthanakorn, 2004).

Chen vd, yarıiletken TE modüllerin yeni kombine sistemler için parametrelerinin optimum ayarlanması üzerine teorik olarak çalışmışlardır. Çalışma performansları ve soğutma performansları analiz ederek tablolastırmışlardır (Chen et al, 2005).

Eakburanawatand Boonyaroonate, yaptıkları çalışmada, mikroçip kontrolü ile birlikte TE batarya şarjörü maksimum güç noktası izleme tekniği geliştirmişlerdir. Şarjör gücünü TE modülden almaktadır. Sistem direk ısı enerjisini elektrik enerjisine çeviren TE modülden batarya şarj etmek için kullanılacağını belirtmişlerdir. Bir mikro kontrol sistemi ile en yüksek güç noktasını izlemişler ve 7.99 W güç elde etmişlerdir. Kullanılan TE eleman TEP1-1264-1.5' dir. Bu modülü farklı sıcaklık ve dirençler için denemişlerdir (Eakburanawatand Boonyaroonate, 2005).

Khataband Shenawye, makalelerinde TE modüller vasıtasıyla yapılmış bir sistemin tüm yıl boyunca sürekliliği üzerinde çalışmışlardır. Sistemde TE modülün çalışma prensibi nedeniyle bir yüzey soğutulurken diğer yüzey ısıtılması gerekmektedir. Yapılan matematiksel analizler vasıtası ile sistemin yıl boyunca en yüksek verimde nasıl çalışacağı analiz edilmiştir. Güneş enerjisinden yararlanarak TE jeneratörden elektrik elde edilmesi ve bu elektrikle TE soğutma yapılmasını teorik olarak hesaplamıştır. 30° kuzey enlemindeki bir bölge için bütün yıl ve farklı TE eleman sayıları için soğutma gücü hesaplanmıştır (Khataband Shenawye, 2004).

Vorobiev vd, yaptıkları çalışma, karışık güneş enerji sistemini yüksek sıcaklık ortamında tanımlamışlardır. Sistem radyasyon yoğunlaştırıcı, fotovoltaik güneş hücrelerini, güneş motorlarını veya TE jeneratörleri içermektedir. Sistemde kullanılan yarıiletkenler bunların çalışma performansı ve etkinlikleri grafik şeklinde gösterilmiştir (Vorobiev et al, 2005).

Chen vd, makalelerinde TE yarıiletkenlerin performans optimizasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. TE modüllerin en yüksek güç çıkışı verebilmesi ve bu değerde

ne kadar etkin çalışabileceği çalışmada yer almaktadır. TE modüllerin askeriye, roket, endüstriyel ve mesleki alanlarda kullanımı mevcuttur (Chen et al, 2005).

Xi vd, yaptıkları çalışmalarında güneşi temel alan TE teknolojilerinin uygulamalarını ve geliştirmelerini incelemişlerdir. Sistemlerin geliştirilmiş hali ile çevresel zararları daha düşük olan klima, buzdolabı gibi sistemlerin ve elektrik üretiminin yapılabilirliği üzerinde durulmuştur (Xi et al, 2005).

2.2. YENİLENEBİLİR ENERJİ DESTEKLİ HİDROJEN ÜRETİM SİSTEMLERİ PİLOT PROJELER

Bu bölümde yenilenebilir hibrid enerji sisteminin yardımıyla hidrojen elde eden ve farklı ülkelerde kurularak araştırmaya yönelik altı önemli proje incelenmiştir. İncelenen projelerin ortak noktası, sistemlerin tekil ve toplam performansı, enerji verimlilikleri, rüzgar, elektrolizör ve fotovoltaik arasındaki etkileşimin araştırılmasıdır. Bugüne kadar çok az sayıda yenilenebilir enerji destekli hidrojen eldesi sistemi projesinde rüzgar enerjisi kullanılmıştır. Hidrojenin depolanması basınçlı veya metal hidrat tanklarla sınırlanmıştır. Genellikle yakıt pilleri, proton dönüşümlü zar teknolojisine dayanmaktadır. Farklı projelerin karşılaştırılmasında gözlenen en genel sonuç yardımcı ekipmanların sistemin işletilmesinin aksamasına ve düşük enerji verimliliklerinin ana sebebi olduğudur. Projelerin çoğu devlet destekli araştırma kurumları veya akademik kurumlar tarafından yürütülmüştür (Galli ve Stefanoni, 2000), (Schucan, 2001).

2.2.1. Nemo Projesi

Finlandiya'daki güneş enerji destekli hidrojen pilot sistemi (1-2 kWh/günlük yük) projesi iki safhada incelenmiştir. İlk safha (1990–92) bileşenlerin ve entegre sistemin fizibilitesini belirlemek, ikinci safhanın amacı ise hidrojenin uzun süre depolamanın geri-dönüşüm verimliliğini, teorik ve deneysel yöntemlerin güvenilirliğini ispatlamaktır.

Fotovoltaik sistem (1,3 kWp), Alkalin elektroliz (0,8 kW) ünitesi, aküler (12 kW) ve yakıt pilinin kullanıldığı sistemde elektrolizör'ün ve yakıt pilinin kontrolü batarya şarj-durumuna dayandırılmaktadır. Şarj-durumu, şarj/deşarj akımının belirlenmesiyle hesaplanır. Sistem kontrolünün amacı, elektrolizör sürekli olarak fotovoltaik ile elektrik üreterek elektrolizöre doğrudan enerji akışını maksimize etmektir. Aküler sadece gece fotovoltaik sistemden enerji sağlanamaması durumunda kullanılır. Farklı bileşenlerin dikkatli eşleşmesi gerektirmektedir. Küçük-ölçekli sistemler için, sistem yardımcıların optimizasyonu bileşenlerin optimizasyonu kadar önemlidir. Helsinki'de yapılacak sistem için % 100 kendine-yeter çalışma için, PV sistemin çıkış gücünün yükün üç katı kadar büyük boyutlandırmasını zorunlu kılmıştır. Yakıt pili % 60 verimliliğine ulaşmıştır. NEMO projesi (Vanhanen, 1996), depolama sistemlerindeki en önemli kayıp mekanizmalarının elektro-kimyasal bileşenlerdeki dönüştürme kayıpları olduğunu göstermektedir. Bu yüzden faraday akım ve gerilim verimleri için hidrojen depolama sistemini optimize etmek için oldukça önemlidir. Uzun süre çalıştırıldıklarında yakıt pili yaklaşık % 38, elektroliz sistemi % 71 verimle çalışmıştır.

2.2.2. Freiburg Güneş Evi Projesi

Kendi kendine-yeten güneş enerjili bir ev Freiburg, Almanya'da Fraunhofer Enstitüsü Güneş Enerji Sistemleri tarafından inşa edilmiştir (Vossvd, 1996). Evin tüm enerji gereksinimi güneş enerjisi tarafından elde edilmektedir. Sistem kontrolü akü şarj durumuna göre yapılmıştır. Fotovoltaik sistem (4,2 kWp), Alkalin elektroliz (3,5 kW) ünitesi, aküler ve yakıt pilinin (3,5 kW) kullanıldığı sistemde, sistemin valflar, sensörler ve gaz analizi gibi tüm çevresel parçaları yaklaşık % 75 verime sahiptir. Üç yıllık çalışma boyunca batarya kapasitesindeki kayıp, gelişmiş bir şarj-durum kontrol algoritmasına duyulan gereksinim belirlenmiştir.

2.2.3. Saphys Projesi

Fotovoltaik (5,6 kWp), elektrolizör (5 kWp), aküler (51 kWh), yakıt pili (3 kW) sistemi yükü beslemek için ortak DC barasına bağlanarak kendi başına hidrojen üreten ve depolayan sistem İtalya'da kurulmuştur (Galli ve Stefanoni, 2000).

Elektrolizör ve yakıt pili, sırasıyla bir düşürücü ve yükseltici ile D.C barasına bağlanmıştır. Akü gerilimi kontrol parametresi olarak kullanılmıştır. Akülerin dinamik davranışların kontrol için oldukça önemli olduğu belirtilmiş ve akü şarj ve deşarj sırasında dinamik dalgalanmasından dolayı akü voltajını doğru belirlemek için enerji yönetim sistemi içinde batarya düzeltmesi gerektiği belirtilmiştir.

2.2.4. Trois Rivières Projesi

Rüzgar ve güneş enerjisinden hidrojen üretilmesine dayanan bir enerji sistemi Kanada'daki Hidrojen Araştırma Enstitüsü'nde (HRI) geliştirilerek ve kurulmuştur (Schucan, 2001). Rüzgar türbini (10 kW), fotovoltaiik (1 kWp), elektrolizör (5 kWp), aküler (42 kWh) ve yakıt pili (5 kW) sistemi AA yükleri beslemek için kullanılmıştır. Hidrojenin uzun-sürelili enerji depolanması ile otonom bir enerji sisteminin gerçekleştirilebileceğini ve böyle bir sistemin çalıştırılmasının güvenli ve güvenilir olduğunu göstermekti. Bir AA yükünü beslemek için sistem DA/AA çeviricileri ile bir DA arasına bağlanmıştır. Performans analizi, kontrol algoritmasındaki yük profilini, programlanabilir güç kaynağı ile enerji seviyesi değiştirerek gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, PEM yakıt pili sistemi için oksidant olarak O₂'nin depolanması, saflaştırılması, kurulanması ve yeniden-kullanılması da sağlanmıştır.

2.2.5. Inta Projesi

1989'da INTA hidrojen teknolojisi güneşten elektrik elde edilmesi ve hidrojenin bir depolama aracı olarak kullanılması ile insanlı uzay çalışmalarına entegre edilebilecek sistemlerinin elde edilmesi amaçlanmıştır (Schucan, 2001). Fotovoltaiik (8,5 kWp), elektrolizör (5,2 kWp), aküler (30 kWh) ve yakıt pili (10 kW) sistemi AA yükleri beslemek için kullanılmıştır. 1994'ten beri çalışmalar hidrojenin ulaşımında temiz yakıt olarak kullanılması yanında yakıt pillerinde kullanılması üzerine yoğunlaştırılmıştır. Sistem bileşenleri bir DA şebeke üzerine entegre edilmiştir. Elektrolizöre enerji sağlayan fotovoltaiik sistem doğrudan bağlantıyla veya değişken sayıdaki pillerle ve bir maksimum güç nokta takipçisi ile birlikte sisteme bağlanmıştır. Yakıt pilleri ve elektrolizörler gibi elektro-kimyasal bileşenlerin

çalıştırılması, takılacak pillerin sayısı açısından bileşenlerin dikkatli dizayn edilmesini gerektirdiği sonucuna varılmıştır.

2.2.6. Schatz Projesi

Projenin amacı, hidrojenin güneş enerjisini depolamak için pratik bir araç olarak çalışabileceğini ve bir yakıt pili vasıtasıyla kimyasal enerjiyi tekrar elektrik enerjisine dönüştürmektir. Fotovoltaik (9,2 kWp), elektrolizör (6 kWp), aküler (42 kWh) ve yakıt pili (1,5 kW) sistem, bir hava kompresörünü (600 W) çalıştırılmıştır (Schucan, 2001). Fotovoltaik enerji sistemi bir dönüştürücü kullanılmadan doğrudan elektrolizöre bağlanmıştır. Nominal çalışma koşullarında, fotovoltaik sistem ve elektrolizör gerilimi iyi bir eşleşme sağlanmıştır. Bir şarj göstergesi bataryanın şarj ve deşarj edilip edilmediğini belirlemek için kullanılmıştır. 1990'lı yılların başlarında yapılan çalışmada hidrojen eldesin toplam veriminin % 6,2 olduğu belirtilmiştir.

BÖLÜM 3

GÜNEŞ ENERJİSİ VE HİDROJEN

3.1. GÜNEŞ ENERJİSİ

3.1.1. Güneş Pillerinin Tarihsel Gelişimi

Güneş pilleri (fotovoltaik diyotlar) üzerine güneş ışığı düştüğünde, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren düzeneklerdir. Bu enerji çevriminde herhangi devingen (hareketli) parça bulunmaz. Güneş pillerinin çalışma ilkesi, Fotovoltaik olayına dayanır. İlk kez 1839 yılında Becquerel, elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilim, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğu gözlemleyerek Fotovoltaik olayını bulmuştur. Katılarda benzer bir olay ilk olarak selenyum kristalleri üzerinde 1876 yılında G.W. Adams ve R.E. Day tarafından gösterilmiştir. Bunu izleyen yıllarda çalışmalar bakır oksit ve selenyuma dayalı foto diyotların, yaygın olarak fotoğrafçılık alanında ışık metrelerinde kullanılmasını beraberinde getirmiştir. 1914 yılında fotovoltaik diyotların verimliliği %1, değerine ulaşmış ise de gerçek anlamda güneş enerjisini %6 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik diyotlar ilk kez 1954 yılında Chapin tarafından silikon kristali üzerine gerçekleştirilmiştir. Fotovoltaik güç sistemleri için dönüm noktası olarak kabul edilen bu tarihi izleyen yıllarda araştırmalar ve ilk tasarımlar, uzay araçlarında kullanılacak güç sistemleri için yapılmıştır. Fotovoltaik güç sistemleri 1960'ların başından beri uzay çalışmalarının güvenilir kaynağı olmayı sürdürmektedir.

1970'li yılların başlarına kadar, güneş pillerinin uygulamaları ile sınırlı kalmıştır. Güneş pillerinin yeryüzünde de elektriksel güç sistemi olarak kullanılabilmesine yönelik araştırma ve geliştirme çabaları 1954'lerde başlamış olmasına karşın, gerçek anlamda ilgi 1973 yılındaki 1. petrol bunalımını izleyen yıllarda olmuştur. Amerika'da, Avrupa'da, Japonya'da büyük bütçeli ve geniş kapsamlı araştırma ve

geliştirme projeleri başlatılmıştır. Bir yandan uzay çalışmalarında kendini ispatlamış silikon kristaline dayalı güneş pillerinin verimliliğini artırma çabaları ve diğer yandan alternatif olmak üzere çok daha az yarı iletken malzemeye gerek duyulan ve bu neden ile daha ucuza üretilebilecek ince film güneş pilleri üzerindeki çalışmalara hız verilmiştir.

Güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirmenin, basit, çevre dostu olan fotovoltaik sistemlerin araştırılması ve geliştirilmesi, maliyetinin düşürülerek yaygınlaştırılması misyonu uzun yıllar üniversitelerin yüklendiği ve yürüttüğü bir görev olmuş ve bu nedenle kamuoyunda hep laboratuarda kalan bir çalışma olarak kalmıştır. Ancak son yirmi yılda dünya genelinde çevre konusunda duyarlılığın artmasına bağlı olarak kamuoyundan gelen baskı, çok uluslu büyük şirketleri fosile dayalı olmayan yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları konusunda çalışmalar yapmaya zorlamışlardır. Büyük şirketlerin devreye girmesiyle fotovoltaik piller konusundaki teknolojik gelişmeler ve güç sistemlerine artan talep ve buna bağlı olarak büyüyen üretim kapasitesi, maliyetlerin hızla düşmesini de beraberinde getirmiştir. Yakın geçmişe kadar alışıla gelmiş elektrik enerjisi üretim yöntemleri ile karşılaşıldığında çok pahalı olarak değerlendirilen fotovoltaik güç sistemleri, artık yakın gelecekte güç üretimine katkı sağlayabilecek sistemler olarak değerlendirilmektedir. Özellikle elektrik enerjisi üretiminde hesaba katılmayan ve görünmeyen maliyet olarak değerlendirilebilecek “sosyal maliyet” göz önüne alındığında, fotovoltaik sistemler fosile dayalı sistemlerden daha ekonomik olarak değerlendirilebilir (<http://www.eie.gov.tr>).

3.1.2. Güneş Pillerinin Çalışma Prensibi

Bazı maddelerin elektriksel özellikleri ışığa bağlı olarak değişmekte ve güneş pillerinde elektrik üretimini bu özellikler oluşturmaktadır. Birbirine benzemeyen herhangi iki malzemenin eklemi ile fotovoltaik etki oluşturabilmektedir. Fakat güneş pillerinde iletken metallere ile yalıtkan malzemeler arasındaki değerlerde olan yarıiletken malzemeler kullanılır. PV piller güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken kristallerdir. Yarıiletken maddelerin güneş pili olarak kullanılabilmesi için N ya da P tipi katkılanmaları gereklidir. Katkılama, saf

yarıiletken eriyik içerisinde istenilen katkı maddelerinin kontrollü olarak eklenmesiyle yapılır. Elde edilen yarıiletkenin N, P ya da P-N tipi olması katkı maddesine bağlıdır.

3.1.2.1. N Jonksiyon

En yaygın güneş pili maddesi olarak kullanılan Silisyum ya da Germanyum'dan N tipi yarıiletken elde etmek için Silisyum/Germanyum eriyiğine periyodik cetvelin 5. grubundan bir element, örneğin Fosfor ya da Antimon eklenir. Silisyum/Germanyumun dış yörüngesinde 4, Fosfor/Antimonun dış yörüngesinde 5 elektron olduğu için, Fosforun/Antimonun, fazla olan tek elektronu kristal yapıya bir elektron verir. Bu nedenle V. grup elementlerine verici ya da N tipi katkı maddesi denir (İKÜ temel elektronik,2005).

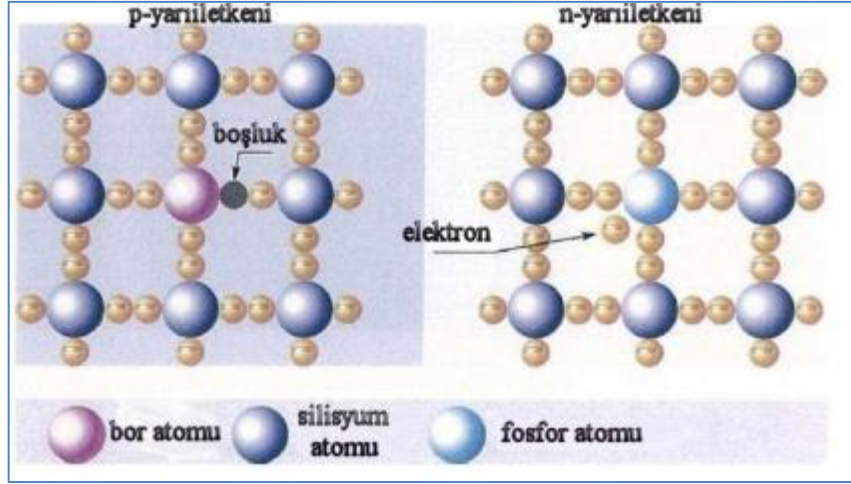
3.1.2.2. P Jonksiyon

P tipi yarıiletken elde etmek için ise, Silisyum/Germanyum eriyiğe 3. gruptan bir element (Alüminyum, indiyum, Bor gibi) eklenir. Katkı yapılan atomların son yörüngesine üç adet elektron olduğundan, yabancı atomun girdiği yerde bir elektron eksikliği meydana gelecektir. Buna boşluk veya delik adı verilir. Sıcaklık veya uyarılma gibi nedenlerle bu boşluklar serbest elektronlar ile doldurulur.

Böylece, yapı içerisinde bir tür boşluk hareketi, başka bir ifade ile pozitif yük hareketi oluşacaktır. Boşluk hareketi bir tür pozitif yük hareketi olduğundan, bu tip yapıya pozitif tip (P-tipi) yarıiletken adı verilir (İKÜ temel elektronik, 2005). P-tipi yarıiletkenin elde edilmesinde kullanılan üç değerlik elektronlu atoma alıcı (acceptor) iyon adı verilir.

3.1.2.3. P-N Jonksiyonu

PV çalışması P-N jonksiyonlu yarıiletkenin çalışma prensibine dayanır. P ve N tipi katkılandırılmış malzemeler Silisyum içerisinde bir araya getirildiğinde yarıiletken eklemler oluşturulur. Fosforla katkılandırma (N-katkı) yapıldığında, kristal kafes yapı içindeki her bir fosfor atomu için bir adet fazlalık elektron bulunur (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Silisyuma bor ve fosfor ilave edilmiş P-N tipi yarıiletken.

Bu elektron kristal içinde serbest olarak hareket eder. Borla katkılandırma (P-katkı) ise, kafes içindeki her bir bor atomu için bir adet boşluk (bağda eksik elektron) bulunur. Komşu silisyum atomlarındaki elektronlar bu boşlukları doldurabilir, bu da başka bir yerde bir boşluğun oluşması anlamına gelir. Her ikisi de P ve N tipi yarıiletkenler bir araya gelmeden önce, elektriksel bakımdan nötrdür. Yani P tipinde negatif enerji seviyeleri ile delik sayıları eşit, N tipinde pozitif enerji seviyeleri ile elektron sayıları eşittir. P-N eklem oluştuğunda, N tipindeki çoğunluk taşıyıcısı olan elektronlar, P tipine doğru akım oluştururlar. Doğal olarak bu akış sırasında, N'den P'ye fazlalık elektronlar akarken, tersine N'den P'ye fazlalık delikler (boşluklar) akacaktır. Çoğunluktaki deliklerin meydana getirdiği akım, ise N tarafındaki azınlık taşıyıcıların P'ye geçişleri sırasında oluşturdukları akım olsun. Aynı durum elektronlar için de söz konusu olacaktır. , çoğunluktaki elektronların oluşturdukları akımı, ise P'deki azınlık elektronların oluşturduğu akımı ifade etsin (İKÜ temel elektronik, 2005).

Delikler için:

$$I_{p1} = I_{p2} \quad (3.1)$$

Elektronlar için:

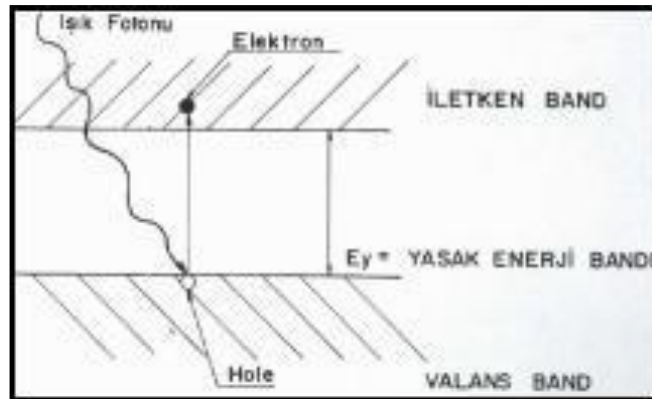
$$I_{n1} = I_{n2} \quad (3.2)$$

Toplam halde ise,

$$I_{p1} + I_{n1} = I_{p2} + I_{n2} \quad (3.3)$$

olacaktır. Denge halinde bu akımlar aynı olacaktır. Eğer böyle olmasaydı, bir tarafta delikler toplanmış olurdu.

P-N tipi yarıiletkenin ara yüzeyinde, yani eklem bölgesinde, P bölgesi tarafında negatif, N bölgesi tarafında pozitif yük birikir. Bu eklem bölgesine geçiş bölgesi ya da yükten arındırılmış bölge denir. Bu bölgede oluşan elektrik alan yasak enerji bandı (E_y) olarak adlandırılır. Yasak enerji aralığı tarafından ayrılan iki enerji bandına valans bandı ve iletkenlik bandı denilir. Bu yasak enerji aralığına eşit veya daha büyük enerjili bir foton, yarıiletken tarafından soğurulduğu zaman, enerjisini valans banttaki bir elektrona vererek, elektronun iletkenlik bandına çıkmasını sağlar. Böylece, elektron-delik çifti oluşur. Şekil3.2. elektron–delik çifti oluşmasını göstermektedir. Bu olay, P-N eklem güneş pilinin ara yüzeyinde meydana gelmiş ise elektron - delik çiftleri buradaki elektrik alan tarafından birbirlerinden ayrılır. Bu şekilde güneş pili, elektronları N bölgesine, delikleri de P bölgesine iten bir pompa gibi çalışır. Birbirlerinden ayrılan elektron-delik çiftleri, güneş pilinin uçlarında yararlı bir güç çıkışı oluştururlar.



Şekil 3.2. Elektron-delik çifti oluşması.

Bu süreç yeniden bir fotonun pil yüzeyine çarpmasıyla aynı şekilde devam eder. Yarıiletkenin iç kısımlarında da, gelen fotonlar tarafından elektron-delik çiftleri

oluşturulmaktadır. Fakat gerekli elektrik alan olmadığı için tekrar birleşerek kaybolmaktadırlar.

3.1.3. Güneş Pillerinin Çeşitleri

Güneş pili teknolojisi, kullanılan maddeler ve yapım türleri açısından son derece zengindir. Güneş pili yapımı için şu anda kullanılmakta olan bir düzineden fazla maddenin yanı sıra, yüzlerce maddenin de üzerinde çalışılmaktadır. Belli başlı güneş pili türleri aşağıda anlatılmaktadır (Günkaya, 2001).

3.1.3.1. Kristal Silisyum Güneş Pilleri

Silisyum yarı iletken özellikleri tipik olarak gösteren ve güneş pili yapımında en çok kullanılan bir maddedir ve uzun yıllarda bu konumunu koruyacak gibi görünmektedir. Fotovoltaik özellikleri daha üstün olan başka maddeler de olmakla birlikte, silisyum hem teknolojisinin üstünlüğü nedeniyle hem de ekonomik nedenlerle tercih edilmektedir.

3.1.3.2. Monokristal Silisyum Güneş Pilleri

İlk ticari güneş pillerinde, Chrozalski kristal çekme tekniği ile büyütülen tek kristal yapı silisyum kullanılmıştır. Fotovoltaik endüstride hala en çok kullanılan yöntem olan bu teknikte öncelikle ark fırınlarında silisyum oksit çeşitli kimyasal ve termal reaksiyonlardan geçirilerek saf silisyum elde edilir. Daha sonra silisyum eriyiğe çekirdek denen tek kristal yapı silisyum parçası batırılır. Bu çekirdek eriyikten çıkarıldığında soğuyan silisyum eriyik, çekirdeğin üzerine külçe şeklinde yığılmış olur. Bu silisyum külçe olur olmaz bir keski ile dilimlere ayrılır. Bu, iki aşamada olur. Önce külçe dikdörtgen bloklar şeklinde kesilir. Daha sonra bu bloklar dilimlere ayrılarak pil şeklinde işlenir. Verimleri %15 civarındadır. Yapım sırasında malzeme kaybının çok fazla olması bu pillerin dezavantajıdır.

3.1.3.3. Semikristal (Yarıkristal) Silisyum Güneş Pilleri

Bu tip piller, sıvı silisyumun soğutulmasıyla elde edilen kümelenmiş küçük silisyum kristallerinden oluşur. Bu pillerin verimleri %14 civarında olup, kümelenmiş silisyum taneciklerinin sınırlarındaki kayıplara bağlıdır.

3.1.3.4. Ribbon Silisyum Güneş Pilleri

Bu piller, malzeme kaybının azaltılması amacıyla levha halinde silisyum tabakalarından yapılırlar. Çeşitli yöntemlerle (Efg, Dendritik ağ) elde edilen bu piller, halen geliştirme aşamasındadır. Verimleri laboratuvar şartlarında %13-14 arasındadır.

3.1.3.5. Polikristal Silisyum Güneş Pilleri

Bu piller de ribbon silisyum teknolojisiyle yapılıp, yapıları polikristal özellik gösterir. Halen laboratuvar aşamasındaki bu pillerin verimleri %10'dur.

3.1.3.6. İnce Film Güneş Pilleri

Bu teknikte, absorban özelliği daha iyi olan maddeler kullanılarak daha az kalınlıkta (tek kristalin 1-500'ü kalınlığında) güneş pilleri yapılır. Örneğin amorf silisyum güneş pillerinin absorpsiyon katsayısı kristal silisyum güneş pillerinin katsayısından daha fazladır. Dalga boyu katsayısı 0,7 mikrondan küçük bir bölgedeki güneş radyasyonu 1 mikron kalınlığında amorf silisyum ile absorblanabilirken, kristal silisyumda ise aynı radyasyonu absorblamak için 500 mikron kalınlıkta malzeme kullanılması gerekmektedir. Bu yüzden amorf yapılu güneş pillerinde daha az malzeme kullanılır ve montaj kolaylığı nedeniyle bir avantaj sağlar.

3.1.3.7. Amorf Silisyum Güneş Pilleri

Amorf silisyum güneş pilleri (a-Si), ince film güneş pili teknolojisinin en önde gelen örneğidir. İlk yapılan a-Si piller Schottky bariyer yapısında iken, daha sonraları p-i-n

yapıları geliştirilmiştir. P-i-n yapısındaki pillerin fabrikasyonu kalay oksitle kaplı iletken bir yüzeyin üzerine çöktürme yöntemi ile yapılır, bu yüzeyin arkası daha sonra metalle kaplanır. Verimleri %5-8 arasındadır. Ancak bu piller, kısa zamanda bozunuma uğrayarak çıkışları azalır.

3.1.3.8. Bakır İndiyum Diselenoid Güneş Pilleri

Periyodik tablonun birinci, üçüncü ve altıncı gruptan elementlerin üçüncünün ya da daha fazlasının bir araya gelmesi ile oluşan bu bileşik yarı-iletkenlerin soğurma katsayıları oldukça yüksek olup, yasak enerji aralıkları güneşin spektrumunu ile ideal bir şekilde uyuşacak biçimde ayarlanabilir. Bakır indiyum ve selenyumdan yapılan üçlü bileşik yarı-iletkenle başlayan bu grup (CIS) güneş pilleri olarak anılır. CdTe güneş pillerine en yakın rakip olarak gözükmektedir. Bu gün CIS ince film güneş pillerinin çoğunluğu içerisinde Ga elementinin katılması ile daha yüksek verimlilikler elde edilir. Ancak yarı-iletkeni oluşturan element sayısı artıkça gereken teknoloji ve malzemenin özelliklerinin denetimi de bir o kadar karmaşık duruma gelmektedir. Laboratuardaki küçük alan pillerin verimliliği %18'e kadar ulaşırken, 900cm² yüzey alana sahip modüllerin verimlilikleri ancak %15 dolayındadır. CIS pillerde uygulanan teknolojilerden iki tanesi öne çıkmıştır. Bunlardan birincisi, elementlerin eş zamanlı olarak vakumda buharlaştırılmasıdır. İkinci yöntem, herhangi bir yöntemle büyütülen bakır-indiyum ince film alaşımının uygun bir ortamda selenyumla tepkimeye sokulmasıdır (Selenizasyon). Her iki durumda da soğurucu olarak kullanılan CIS yarı-iletken, CdS ile bir araya getirilerek hetero eklem diyot oluşturulur. CdS tabakaların üretilmesinde ortaya çıkan yöntem CdTe tabakalarında olduğu gibi burada da kimyasal banyo yöntemidir. Metal elementlerin buharlaştırılmasının ardından selenizasyonu seçen ISET, Shell-Showa ve Siemens Solar gibi firmalardan Siemens Solar 5-10 W değerinde küçük modül üretiminde ABD başlamıştır. CIS tabakaların büyütülmesinde Stuttgart Üniversitesi (Almanya) tarafından geliştirilen ve yine bir alman firması olan ZSW tarafından üretime hazır hale getirilen eş zamanlı olarak vakumda buharlaştırma yöntemi üretim yöntemlerinden birisidir. Bu ince film güneş pillerinde test altındaki uzun dönem modül verimlilikleri %10 değerinin altında kalmaktadır.

3.1.3.9. Diğer Yapılar

Bakır indiyum diselenoid (CuInSe) maddesinden yapılan ve verimleri %13 civarında olan piller halen gelişme aşamasındadır ve daha kararlı çıkışa sahip olduğu için absorban özelliği yüksek, verimleri de %12 civarındadır. Bu güne kadar elde edilen en yüksek verime (%24) galyum arsenitten yapılan piller ulaşmıştır. Bu madde ile çeşitli türde piller elde edilebilmekle birlikte, pahalı olduğu için pillerin, güneş spektrumunun daha büyük bir bölümünden yararlanabilmesi amacı ile denenen bir yöntem ise, birden fazla ince film yapısının üst üste konmasıyla elde edilen çok eklemli film yapılarıdır. Bunların dışında, güneş ışınımının yüksek verimli pillerin üzerine optik olarak yoğunlaştıran sistemler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bu tür sistemlerde güneşin hareketini izleyen düzeneklerin yanı sıra, güneş ışığını kıran (mercek) ya da yansıtan (ayna) eleman kullanılır.

3.1.4. Güneş Pillerinin Verimini Sınırlayan Etkenler

Güneş pillerinin verimini sınırlayan etkenler: sıcaklık etkeni, yüzey parametresi etkeni, spektral etken ve foto açısal etkendir (Demirci, 1996).

3.1.4.1. Sıcaklık Etkeni

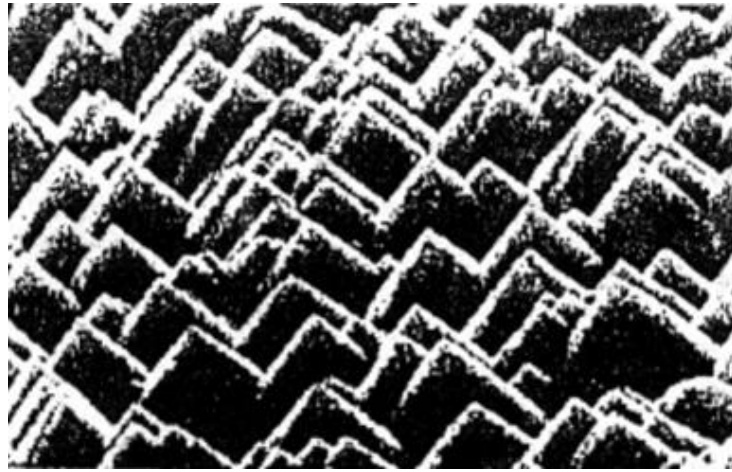
Güneş pillerinin çalışma sıcaklığı, çeşitli kullanım alanlarına göre geniş bir aralıkta değişim gösterir. Bu yüzden sıcaklığın güneş pilinin verimi üzerine etkisinin bilinmesi gerekir. Güneş pilinin kısa devre akımı sıcaklığa pek fazla bağlı değildir. Sıcaklığın artmasıyla, kısa devre akımında az bir artma eğilimi gözlenir. Bunun nedeni, sıcaklık artmasıyla yarıiletken yasak bant aralığının azalması ve bunun sonucunda ısınım soğurulmasında çoğalmanın meydana gelmesidir. Diğer güneş pili parametreleri olan açık devre voltajı ve fill faktörü sıcaklık artışıyla azalır (Engin,1995).

Sıcaklıktaki değişim, daha çok açık devre voltajını etkilediği için güneş pilinin çıkış gücü ve verimi sıcaklık arttıkça azalır (Demirci, 1996). Silisyumdan yapılmış bir güneş pilinin güç çıkışı, 1 derecelik sıcaklık artısında %4-5 oranında azalır. Bu

sıcaklık bağımlılığı, geniş bant aralıklı yarıiletkenlerde daha azdır (Engin,1995). Sıcaklığı düşük tutarak, yüksek verim elde etmek için uzayda kullanılan pillerin üzeri erimiş silikondan yapılmış, şeffaf bir örtü ile kaplanır. Bu örtü, çok katlı bir filtre özelliği göstererek, mor ötesi ısınları pil yüzeyinden yansıtır (Köse,1986).

3.1.4.2. Yüzey Parametresi Etkeni

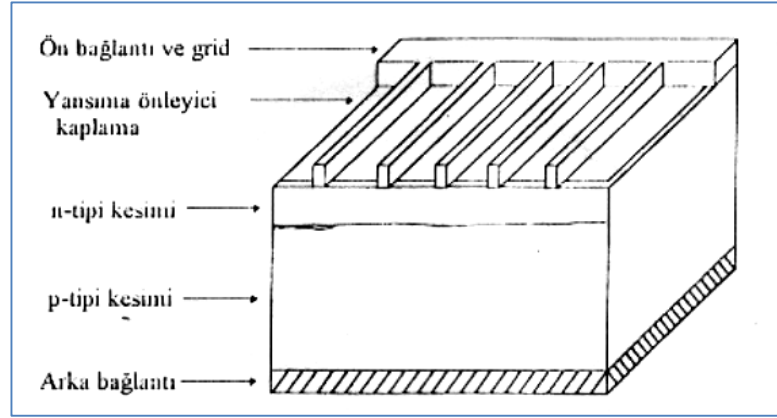
Güneş pili üzerine gelen ısınlardan bir kısmı, yarıiletken içine girmeden üst yüzey tarafından yansıtılır. Güneş pilinin üst yüzeyine gelen ısınlardan yansıtma miktarı, yapıldığı yarıiletken maddenin cinsine bağlı olarak değişir. Güneş pilinin üst yüzeyine gelen fotonların yansıtılması, pilin veriminde azalmaya sebep olur. Bu azalma miktarı, yansıtma miktarıyla doğru orantılıdır. Güneş pili yüzeyine gelen ısınlardan yansıtmasını azaltmak için kullanılan yaklaşımlardan biri, özelyapılı yüzeyler oluşturmaktır. Bu yaklaşım altında, güneş pili yapımında yüzeyi desenli silisyum dilimleri kullanılmaktadır. Seçici dağlama yöntemi ile silisyum tabakalarının yüzeylerinde küçük piramitler elde edilmektedir. Bu piramitlerin yüzeylerinden yansıyan ışık, diğer piramitlerin de yüzeylerinden yansıyarak pilin içine girer. Taramalı elektron mikroskobu altında bu piramitlerin görünümü Şekil3.3.'de görüldüğü gibidir. Bu yapıya ek olarak yansıtma önleyici kaplama da kullanılarak, güneş pilindeki yansıtma kayıpları en aza indirilebilir (Demirci,1996-Engin,1995).Ancak bu kayıplar tamamen ortadan kaldırılamaz (Çetinkaya, 2001).



Sekil 3.3. Taramalı elektron mikroskobu altında özel yapılı silisyum yüzey görünümü (Engin,1995).

3.1.4.3. Spektral Etkeni

Yarıiletken üzerine gelen monokromatik ışık, yarıiletkende elektron-hol çiftlerinin oluşumuna sebep olur. Kısa dalga boylu ısınlılar için Z çok büyük olduğundan, yarıiletkene gelen bu ısınlılar hemen soğurular. Fakat kısa dalga boylu ısınlılar için kuantum verimliliği çok düşük olur. Kuantum verimliliği görünür dalga boylarında en yüksek değere ulaşırken, kızılötesi bölgelerde oldukça düşüktü (Demirci, 1996), (Engin, 1995). Güneş piline gelen ışığın dalga boyu arttıkça; monokromatik güç başına kısa devre çıkış akımı önce artar, sonra azalır (Engin, 1995). Bir güneş pilinin temel kesimleri, Şekil 3.4'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Bir güneş pilinin temel kesimlerinin şematik görünümü (Engin, 1995).

3.1.4.4. Foto açılal etken

Yarıiletken güneş piline gelen fotonlar yüzeye çarpınca; gelen ışığın bir kısmı yüzey tarafından yansıtılırken, ışığın geri kalan kısmı yarıiletken tarafından soğurular veya malzemeden geçer (Demirci, 1996).

3.2. HİDROJEN ENERJİSİ

Hidrojen, yunanca “su “ anlamına gelen “hydro” kelimesi ile oluşturan anlamına gelen “genes” kelimelerinden oluşur. İlk kez Henry Cavendish tarafından elde edilmiştir. 1784 yılında Antoine Laurent de Lavoiser tarafından ismi hidrojen olarak verilen Hidrojen kızdırılmış metal üzerinden su buharı geçirilerek elde edilmiştir.

Hidrojen kainattaki tüm elementlerin anası olarak bilinir ve tüm elementler yüksek sıcaklıklarda farklı hidrojen konfigürasyonları şeklinde kendi bilinirlikleri ile var olurlar, bilinen ve yeni bulunan tüm elementlerin kaynağı ve temel taşı bir atom ve kütle numarasına sahip hidrojen atomudur (<http://tr.wikipedia.org>, 2007).

Hidrojen 1,00794 g/mol atom ağırlığı ile normal koşullarda renksiz kokusuz ve havadan 14 kat daha hafif bir gazdır. En hafif gaz olması sebebi ile atmosferdeki tüm moleküler çarpışma ve hafiflik etkileri ile atmosferin en dış tabakasına yükselir ve egzosfer olarak tanımlanan bu tabaka içerisinde cm^3 birkaç yüz atom kadar seyrek olarak bulunur. Serbest Hidrojenin toplam atmosferdeki varlık oranı ise 1 ppm den daha azdır (<http://tr.wikipedia.org>, 2007).

Hidrojen Jüpiter ve diğer dev gaz gezegenlerinin de ana unsurudur, bu büyük gezegenin çekirdeğine doğru yüksek basınç ile hidrojenin metalik katı formda bulunduğu tahmin edilmektedir. Hidrojenin metalik formunun süper iletkenlik özellikleri gösterebileceği öngörülerek 1973 yılında bir grup Rus bilim adamı tarafından 2,8 Mbar basınç altında metalik forma ulaşılmıştır. Hidrojenin ergime noktası $-253\text{ }^\circ\text{C}$ olduğu için sıvı hidrojen düşük sıcaklık malzemeleri olan kriyojeniklerde de süper iletken araştırmalarında kullanılmaktadır (<http://tr.wikipedia.org>, 2007).

Enerji kaynağı veya taşıyıcısı anlayışının oluşması 1839 yılında William Grove'un "yakıt hücresi" ismini verdiği ve hidrojen üreten sistemleri keşfetmesi ile başlamıştır. Ancak bu yöndeki çalışmalar, 1876 yılında petrol ile çalışan içten yanmalı motorların icadı ile fosil yakıtların kullanımı ile ilgili teknolojilerin gelişmesine hidrojen ile ilgili çalışmaların zayıflamasına neden olmuştur.

Hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak elektriğin transferindeki gibi yüksek kayıp içermemesi, temiz ve sınırsız enerji için çalışmalar anlam kazandıkça araştırmaları sürmüş ve yakıt hücresi geliştirme çalışmaları hidrojen ile çalışan içten yanmalı motorların yapılması (Rudolf Eren tarafından 1930 yılında yapılmıştır.) 1960 yılında ise Almanya da hidrojen ile çalışan ilk aracın üretilmesiyle sürmüştür. Günümüzde hidrojen üretim maliyetleri itibariyle petrol ürünleri ile rekabet edecek seviyede karlı

olmadığı için, çalışmalar üretim depolama ve taşıma maliyetleri ve teknolojileri arasında gelişme sürecindedir (<http://tr.wikipedia.org>, 2007).

3.2.2. Hidrojenin Kullanım Alanları

Hidrojen, rafineriler, kimyasal üretim prosesleri, elektrik üretimi, yakıt ve yiyecek endüstrilerinde kullanılmaktadır (Ültanır, 1998). Rafinerilerde desülfirizasyon işlemlerinde, kimyasal üretim proseslerinde toluen, diamin, hidrojen peroksit, amonyak, sentez gazı elde üretiminde kullanılmaktadır ayrıca çelik endüstrisinde, cihaz üretiminde ve yiyecek endüstrisinde özellikle sıvı yağların hidrojenasyonunda kullanılmaktadır. Hidrojenin yakıt olarak kullanılması sonucunda hiçbir şekilde CO₂ gazı açığa çıkmaması ve yalnız su oluşturması hidrojeni tam anlamıyla çevreci bir yakıt kılmaktadır. Hidrojenin gelişmekte olan yakıt pillerinde elektrik enerjisi üretimi için kullanılması bu teknolojiyi taşımaya başlayan enerji santrallerinin ve otomobillerin de çevreci hale gelmeleri anlamını taşımaktadır(Yıldız,2004).

3.2.3. Hidrojen Enerjisinin Dünyadaki Gelişimi

İdeal bir yakıt konumunda olan hidrojenin, üretim, uygulama ve ekonomik yönlerinde karşılaşılan sorunların çözülmesi ile yaygın bir şekilde kullanılacağı açıkça görülmektedir. Bu alanda dünyada özellikle ABD, Japonya ve Almanya başta olmak üzere, birçok ülkede yoğun araştırmalar sürmektedir. Yapılan çalışmalar, hidrojenin yaygın kullanımı için halen en büyük sorun olarak ortaya çıkan maliyet konusunun kısa zaman içinde çözüleceğini ve hidrojen fosil yakıtlarla yarışabilecek duruma gelebileceğini göstermektedir. Burada üzerinde önemle durulması gereken bir diğer nokta da, fosil yakıtların maliyeti içine sokulmayan çevre kirliliği, yani sosyal maliyettir. Günümüzde bu alanda bir çok çalışma yapılmakta olup, fosil yakıtların aşırı kullanımından kaynaklanan sağlık sorunları ile, asit yağmurlarının neden olduğu zararlar ciddi bir şekilde ele alınıp ayrıntılı bir maliyet hesabı yapılmaktadır. Bu konuda, Miami Temiz Enerji Enstitüsünün (ABD) yaptığı çalışmanın verilerine göre, fosil yakıt salınımlarının dünyaya verdiği zarar 2,7 trilyon dolar, yani dünya brüt gelirinin %14 ü olarak hesaplanmıştır. Her yıl gittikçe

şiddetini arttıran fırtınalar, seller ve kuraklığın açtığı maddi ve manevi zarar göz önüne alındığında bu rakamın giderek büyüyeceği açıkça görülmektedir.

Hidrojen enerjisi teknolojisinin giderek yaygınlaşabilmesi için önemli bir konu da, bu yakıtın taşınması, emniyeti, bunları kullanacak uçak, otomobil gibi taşıtlarda yapılacak değişiklikler, elektrokimyasal çevrimler ve tüm uygulama alanları için standartların saptanmasıdır. Yeni bir teknolojiyi standartlar olmadan kullanmak ve yaymak olanaklı değildir. Uluslararası Enerji Ajansı Hidrojen Programı Yürütme Komitesi ve Uluslararası Standartlar Organizasyonu tarafından oluşturulan SO/TC-197 Komitesi bu alanda çalışmalar yapmış ve birçok standart belirlenmiştir. Ancak, henüz gelişmekte olan bazı yeni teknolojiler konusunda çalışmalar sürmektedir.

Taşıtlarda hidrojenin içten yanmalı motorlar veya yakıtlı piller aracılığıyla kullanımı konusunda da, Daimler-Benz şirketinin sıfır salımlı minibüsü, BMW, Dodge, Buick, Suzuki firmalarının deneme otomobilleri, Macchi-Ansaldo'nun ve MAN firmasının SL202 otobüsleri, Kanada demiryollarının Lokomotifleri ile Almanya, Avustralya ve Kanada donanmaları için imal edilen deniz altılar sayılabilir.

Bunların dışında, %15-20 hidrojen ve %80-85 doğal gaz karışımından oluşan hytane adlı yakıt ile çalışan yeni bir otobüs 1993 senesinden beri Montreal de (Kanada) denenmektedir.

1970'li yıllarda hidrojene enerji taşıyıcısı olarak pek dikkatle bakılmadığı söylenebilir. O yıllarda "hidrojen enerjisi", "hidrojen ekonomisi" ve "hidrojen enerji sistemi" gibi kavramlar enerji literatürlerinde yer almıyordu. Ancak, roket yakıtı olarak hidrojen kullanılıyor, süper devletler hidrojen çalışmalarını gizlilik içinde yürütüyordu. 1974 yılında ABD Florida Miami Üniversitesi Temiz Enerji Araştırma Enstitüsü'nde, Enstitü Direktörü Türk bilim adamı Prof. Dr. Nejat Veziroğlu'nun başkanlığında düzenlenen Hidrojen Ekonomisi Miami Enerji Konferansı (THEME), bu konuların yayılması ve hidrojen enerjisi kullanımına başlangıç oluşturması açısından önemlidir. Bu toplantı ile Uluslararası Hidrojen Enerjisi Birliği (IHEA) kurulmuştur.

Hidrojen enerjisi üzerine araştırmalar hızla artmaktadır. Japonya Uluslararası Ticaret ve Endüstri Bakanlığı'nca finanse edilen WE-NET programı, hidrojen enerji sisteminde ilerleme sağlamak amacı ile 2020 yılına kadar 4 milyon dolar harcamayı planlamaktadır. Brezilya ve Güney Amerika'da en büyük hidro-güç tesisi Haipu'dur.

Burada elektrolitik hidrojen üretilir. Üretilen hidrojen gaz halindedir. Almanya'da ise Neurenburg yakınlarında mini bir hidrojen enerji sisteminin kurulduğu bir program yürütölmektedir. Diğer bir uluslar arası başarılı program, Avrupa ve Kanada arasındaki Euro-Quebec'tir. Bu programda, nispeten ucuz olan hidro-güçten üretilerek Avrupa'dan Kanada'ya ithal edilecek sıvı hidrojenin deniz aşırı taşınması, depolanması ve kullanım alanları araştırılmaktadır. İzlanda'da ise hükümet, üniversiteler, taşıma şirketleri, fabrikalar ve çok uluslu araba ve petrol şirketleri konsorsiyum oluşturmuş ve 2030 yılına kadar İzlanda'nın tamamen hidrojen endüstrisine geçmesini planlamışlardır. Bunlardan başka, son yıllarda hidrojenin kara taşıtlarında kullanımına yönelik olarak hidrojen yakıtını kullanan araçlar gösterime girmiştir.

3.2.4. Hidrojen Enerjisi Üzerine Türkiye'de Yapılan Çalışmalar

Türkiye'deki birçok üniversitede hidrojenin üretilmesi, depolanması ve kullanımı ile ilgili geniş araştırmalar yapılmaktadır. Birleşmiş Milletlere bağlı olarak çalışan Uluslararası Hidrojen Enerjisi Teknolojileri Merkezi (UNIDO-ICHET), Prof. Dr. Nejat Veziroğlu'nun çalışmalarıyla İstanbul'da kurulmuştur. Ayrıca biri ulusal, diğeri uluslararası olmak üzere iki Hidrojen Kongresi (UHK ve IHEC) her yıl dönüşümlü olarak Türkiye'de gerçekleştirilmektedir. Konu bilimsel bir platformda araştırılmakta ve yeni buluşlar tartışılmaktadır.

ICHET'in çalışma kapsamı konuları:

- Hidrojen enerjisi politikası oluşturulması, büyük miktarlarda hidrojen üretimi ve hidrojen enerji teknolojilerinin uygulanmasının ve çevresel çalışmaların ekonomik analizi

- Diğer yenilenebilir enerji sistemleriyle hidrojen üretim tekniklerinin entegre edilmesi
- Hidrojen depolama teknikleri
- Klima sistemleri ve hidrojen depolamada metal hidrürlerin kullanımı
- Boru ile hidrojen nakli
- Hidrojenle çalışan taşıtlar
- Yakıt pili uygulamalarıdır.

TÜBİTAK'ta devam eden çalışmalardan bazıları ise şöyledir:

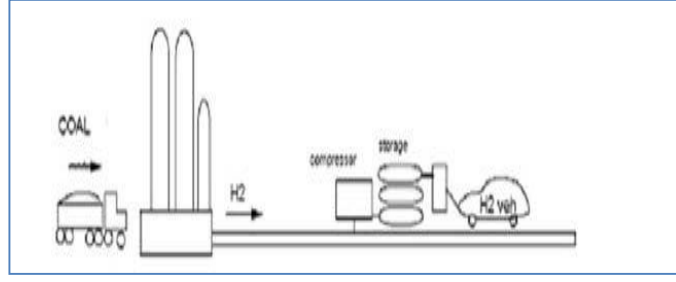
- PEM yakıt pilli güç üretim kaynağının geliştirilerek evsel uygulamalarda kullanımı
- Hidrojen üretim, dönüşüm ve depolama tekniklerinin geliştirilmesi
- Elektrikli araç teknolojileri

Ayrıca, hidrojen enerjisi ve yakıt hücreleri konusu üniversitelerin müfredatlarında her geçen sene daha çok yer bulmaktadır. Liselerde ise hidrojen enerjisi ile ilgili eğitime yer verilmeye başlanması ve yakıt hücresi laboratuvarları açılması için öğretmenlere eğitim seminerleri düzenlenmekte, lise yönetimleri buna teşvik edilmektedir.

3.2.5. Hidrojen Üretimi

3.2.5.1. Kömür Gazlaştırılması

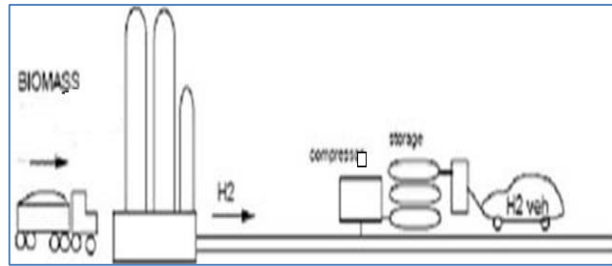
Kömür gazlaştırılması işleminde toz haline getirilmiş kömür atmosferik basınç altında oksijen ve buhar ile hızlıca parçalanarak oksidasyona uğratılır. Kömür gazlaştırılması işlemi özellikle katı yakıt taşıma gerekliliği ve büyük miktardaki kül atığından dolayı çok karmaşık bir işlem halini almaktadır. 800-2000 °C arası sıcaklık ve 40 bar basınç gibi yüksek süreç değerlerinde hidrojen üretimi gerçekleşmekte ayrıca %55 gibi düşük reaksiyon tamamlanma derecesinde kalmaktadır. Genel olarak kömür ucuz bir yakıt olmasına karşın kömür gazlaştırma işlevi hidrojen elde etmek için ucuz bir yöntem değildir.



Şekil 3.5. Kömür gazlaştırma işlemi.

3.2.5.2. Biyokütleden Hidrojen Üretimi

Biyokütleden hidrojen bir piroliz/gazlaştırma işlemi ile elde edilebilir. Biyokütle bir reaktör içinde yüksek sıcaklık ve düşük basınç altında işleme alınır. İşlem sonunda hidrojen, metan, karbondioksit, karbonmonoksit ve azot elde edilir. Gaz akımlarının yüksek sıcaklıkta bulunmalarından dolayı hidrojen içeriği artar ve bu işlem sonunda oldukça yüksek saflıkta hidrojen elde edilebilir. Tüm sistem biyokütle hazırlama birimi ve reaktör dizaynı dışında kömür gazlaştırma santraline çok benzer. Ayrıca biyokütlenin daha düşük kalori değerinden dolayı kömür gazlaştırma santralinden daha büyük bir alana kurulmuşlardır.



Şekil 3.6. Biyokütleden hidrojen üretimi.

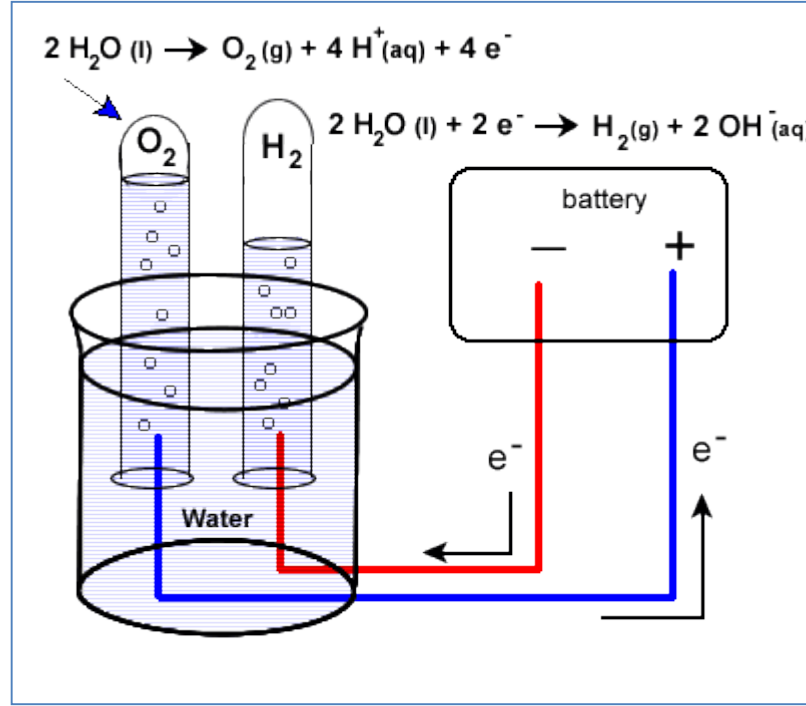
3.2.5.3. Elektroliz ile Sudan Hidrojen Üretimi

Su, doğru akım kullanılarak, elektroliz ile hidrojen ve oksijenlerine ayrılabilir. Hidrojen üretimi için en basit yöntem olarak bilinmektedir. İlke olarak, bir elektroliz hücresi içinde, genelde düzlem bir metal veya karbon plakalar olan, iki elektrot ve bunların içine daldırıldığı, elektrolit olarak adlandırılan iletken bir sulu çözelti bulunmaktadır. Doğru akım kaynağı bu elektrotlara bağlandığında akım iletken

çözelti içinde, pozitif elektrottan negatif elektroda doğru akacaktır. Bunun sonucu olarak da, elektrolit içindeki su, katotta hidrojen ve anotta oksijen çıkararak ayrışacaktır. Burada yalnız suyun ayrışmasına karşılık, su iyi bir iletken olmadığı için elektrolitin içine iletkenliği arttırıcı olarak genelde potasyum hidroksit gibi bir madde eklenir.

Suyun elektrolizi için, normal basınç ve sıcaklıkta, ideal olarak 1,23 volt yeterlidir. Tepkimenin yavaş olması ve başka nedenlerle, elektroliz işleminde daha yüksek gerilimler de kullanılır. Hidrojen üretim hızı, gerçek akım şiddeti ile orantılı olduğundan, ekonomik nedenlerle yüksek akım yoğunlukları yeğlenmektedir. Bundan dolayı pratikte suyun ayrıştırılması için hücre başına uygulanan gerilim genelde 2 volt dolayındadır. Kuramsal olarak, her m³ oksijen için 2,8 kW/h elektrik enerjisi yeterli olmakla birlikte, yukarıda özetlenen nedenlerle pratikte kullanılan elektrik enerjisi miktarı 1 m³ hidrojen üretimi için 3,9-4,6 kW/h arasında değişmektedir.

Buna göre elektroliz işleminin verimi %70 dolayında olmaktadır. Ancak, son yıllarda bu alanda yapılan çalışmalar ve gelişen teknoloji sayesinde %90 verim elde edilmiştir. Pratikte kullanılan elektroliz hücrelerinde, nikel kaplı çelik elektrotlar kullanılmaktadır. Elektroliz bol miktarda hidrojen üretimi için fosil yakıt devrinde geliştirilebilecek olan tek yöntem olarak gözükmektedir. Su elektrolizinden hidrojen üretimi uzun yıllardır bilinen basit bir altyapıya sahip olan, verimliliği yüksek ve hareketli parçası olmayan bir sistemdir.



Şekil 3.7. Elektroliz ile hidrojen üretimi.

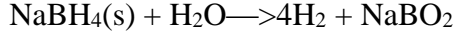
3.2.5.4. Bor Mineralinden Hidrojen Üretimi

Ülkemiz, bor minerali rezervlerinin büyük bir çoğunluğuna sahiptir. Bu miktar doğru kullanılabilirdiği takdirde çok büyük bir potansiyeldir. Bor minerali endüstride çok fazla alanda kullanılmaktadır. Bor, uzun yıllardan bu yana üzerinde en çok araştırma yapılan minerallerden biridir. Bu noktada bor mineralinin 3 özelliği üzerinde durulabilir.

- Hidrojen taşıyıcısı olarak bor kullanımı
- Hidrojenden daha iyi bir enerji hammaddesi olması
- Füzyon reaktörlerinde yakıt olarak kullanımı

Bor üzerinde yapılan araştırmalardan birinde geliştirilen bir teknolojiye enerji elde etmek için kullanılan hammaddeler saf su ve sodyum borhidrürdür. Sodyum borhidrür sodyumlu bor tuzunun rafinasyonu sonucu elde edilen ve deterjan sanayinde de kullanılan bir üründür. Geliştirilen bu teknoloji taşımacılığın yanı sıra taşınabilir enerji sağlayıcı piller için de uygulanabilir bir teknoloji olmuştur. Yakıt

pillerinde sodyum borhidrür kullanımı fosil yakıtlardan daha pahalı olan ve eldesi, depolanması, nakli zor olan hidrojenin de dezavantajını ortadan kaldırmıştır.



Su içerisinde çözünen sodyum borhidrür, bir karışım olarak depolanmakta, enerji üretmek için hidrojene ihtiyaç duyduğunda bu karışım içine tatbik edilen katalizör vasıtasıyla kimyasal reaksiyon başlatılmaktadır. Reaksiyon sonucunda gaz halinde kalan hidrojen ya yakıt pili vasıtasıyla elektriğe dönüştürülmekte ya da doğrudan İçten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılmaktadır ([http:// www.bilgiustam.com](http://www.bilgiustam.com), 2009).

3.2.6. Hidrojenin Depolanması

Hidrojenin etkin ve verimli kullanılabilmesi doğru ve ekonomik şekilde depolanabilmesine bağlıdır. Taşınabilir uygulamalarda depolamada hafiflik ve farklı şartlar altında güvenlik önem kazanmaktadır. Hidrojen gaz veya sıvı olarak saf halde tanklarda depolanabileceği gibi fiziksel olarak nanotüplerde veya kimyasal olarak hidrür bileşikleri şeklinde depolanabilmektedir. Hidrür şeklinde depolama işlemi hem katı halde hem de sıvı halde depolama imkanı sunmaktadır. Farklı depolama yöntemleri ile hidrojen miktarı, hacimsel yoğunluk, enerji yoğunluğu bilgilerini içeren bilgiler hidrojen depolama uygulamaları bölümünde verilmiştir (Eward, 1998). Hidrojenin depolama yöntemleri ve farklı depolama usullerine ait depolama kapasitesi ağırlıkça % hidrojen içeriği gibi verileri Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Hidrojen depolama yöntemlerinin kıyaslanması (www.bilgiustam.com, 2009).

Depolama tipi	Hidrojen miktarı (% Ağırlık)	Depolama kapasitesi g/ml	Yanma ısısının Enerji Yoğunluğu	
			Cal/g	Cal/ml
MgH ₂	7,0	0,101	2373	3423
MgNiH ₄	3,16	0,081	1071	2745
VH ₂	207	-	701	-
FeTiH _{1.95}	1,75	0,096	593	3245
TiFe _{0.7} Mn _{0.2} H _{1.9}	1,72	0,090	583	3050
LaNi ₅ He ₇	1,37	0,089	464	3051
R.E.Ni ₅ H	1,35	0,090	458	3050
Sıvı Hidrojen	100	0,070	33900	2373
Gaz Hidrojen (100 atm basınçta)	100	0,007	33900	244
N-Oktan	-	-	11400	8020

3.2.6.1 Sıvı Olarak Tanklarda Depolama

Hidrojen yaklaşık 20 K ve 2 bar basınç altında sıvılaşmaktadır. Bu düşük sıcaklık için süper izoleli çift cidarlı tasarlanmış kaplar ile depolama yapılmaktadır. Bu sıvılaştırma ve taşınır hale getirme yöntemleri Japonya Almanya ve Amerika'da gösterim amaçlı olarak kullanılmaktadır. Yaygın kullanıma engel olan faktörler aşağıda belirtilmiştir (Eward, 1998).

- Depolama sistemlerinin yüksek hacmi
- Sıvı Hidrojen maliyetinin yüksekliği
- Hidrojenin buharlaşma kayıpları

Sıvı hidrojen tankları ağırlık olarak diğer yakıt depolarına göre fazlaca ağır olmamalarına karşılık hacim olarak büyüktürler örneğin bir sıvı Hidrojen (LH₂)

deposu için 117 lt'lik bir depo 65 kg tank ağırlığına ve sistem olarak 73 kg'a ulaşmaktadır.

3.2.6.2. Gaz Olarak Tanklara Depolama

Gaz olarak depolama bazı ülkeler tarafından kullanılmış petrol ve doğal gaz mağaralarında, madencilik sektörüne ait kullanılmayan madenlerde halen gaz depolaması şeklinde yapılmaktadır. Fransa'da Baynes yakınlarında petrol ve doğal gaz mağarası içerisinde hidrojen depolanmaktadır. Difüzyon ve pompalama sisteminden kaynaklanan kayıplar yaklaşık gazın % 3'ü olmaktadır. Suni depolamaların yerleşim bölgeleri için önerilen depolama şekli olması ve kullanım kapasitesine uygun ölçülerde yapılması çalışmaları sürmektedir (Eward, 1998).

Hidrojenin doğal gazların depolandığı şekilde Alüminyum tanklar içerisinde 200 bar altında saklanması mümkün değildir bunun için 690 bar basınçta karbon /alüminyum depolama kabı ile depolanabilmekte ancak aynı amaçla kullanılacak bir başka yakıt deposundan yaklaşık 3 kat daha ağır ve 9 kat daha büyük olmaktadır (Yıldız,2004).

3.2.6.3. Metal Hidrürler Şeklinde Depolama

Hidrojenin metal hidrürleri şeklinde depolanması işlemi küçük hacimler için tercih edilmektedir. Metal alaşımları ile kimyasal bileşikler şeklinde depolanabilen ve daha sonra sistemin ısıtılması şeklinde hidrojenin tekrar gaz haline getirildiği sistemlerdir. Şarj prosesinin ekzotermik vedeşarj prosesinin endotermik olduğu reaksiyonlar Denklem 5.1 ve 5.2'de verilmiştir (Ültanır, 1998).

Şarj işlemi $M + xH_2 \rightarrow MH_{2x} + Is_1$

Deşarj işlemi $MH_{2x} + Is_1 \rightarrow M + xH_2$

Reaksiyon hızının metal yüzey alanı ile doğru orantılı olduğu sistemler genellikle reaksiyon hızının artması için toz veya granül haldeki metal ile muamele edilirler. En çok kullanılan metaller Demir, Magnezyum, Nikel, Manganez ve Titanyumdur. Bu amaçla kullanılacak metalin seçiminde esas alınan kriterler aşağıda sunulmuştur.

- Fiyatının düşüklüğü
- Enerji yoğunluğunun yüksek olması
- Atık miktarının az olması
- Yüksek hidrojen absorbe kapasitesine sahip olması
- Gaz içerisinde bulunabilecek yabancı maddelere karşı dirençli olması
- İşlem sonrası hacimsel genişlemenin düşük olması

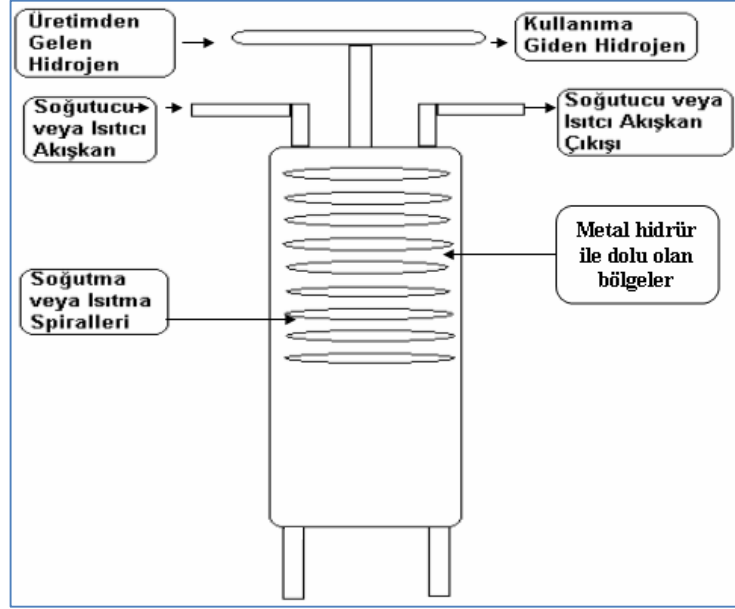
Hidrür şeklinde depolama uygulamaları için kullanılmakta olan farklı alaşımların hidrojen depolamadaki performansları Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Hidrür depolamada kullanılan alaşımların performans kıyaslamaları (Evvard, 1998).

Hidrürü Maddeler	100 g metale düşen Hidrür miktarı (g)	Diğer Gazların Etkisi (Su ve Oksijen)	Absorbsiyon Oranları
LaNi ₅	1,52	Az	Hızlı
LaCuNi ₄	1,3	Az	Hızlı
La _{0,7} Ce _{0,3} Ni ₅	1,6	Az	Hızlı
MmCO ₅	0,67	Az	Hızlı
MmNi ₅	1,5	Az	Hızlı
Mm _{0,85} Ce _{0,15} Ni ₅	1,5	Fazla	Hızlı
Vanadyum	5,9	Fazla	Hızlı
Niyobyum	2,1	Fazla	Hızlı
Magnezyum	7,6	Fazla	Hızlı
FeTi	1,8	Fazla	Hızlı
Mg _{0,93} Ni _{0,07}	5,7	Fazla	Hızlı
V(Si%0,93)	5,6	Fazla	Hızlı

Hidrojenin metal hidrürleri şeklinde depolama amaçlı olarak tasarlanan ve kullanılan yatay ve dikey tiplerde tanklarda depolanması güncel uygulamalardandır. Hidrojen depolama uygulamaları için Şekil 3.8’de örnek tank verilmiştir. Sistem hidrojen gazının ısıl etki ile tanka beslenmesi sonrası kimyasal bağlanma ile depolanması ve

kullanım amaçlandığında ise yine ısıtma işlemi vasıtasıyla tersine işlem uygulanarak hidrojenin açığa çıkması ve çıkış hattından alınması şeklinde kullanılmaktadır.



Şekil 3.8. Dikey tip metal hidrür depolama tankı (Yıldız,2004).

Metal hidrürler şeklinde depolama işleminin gram metal başına depolanan hidrojen hacminin ağırlıkça % 0-5 ile 2 arasında olması bu yöntemin yüksek depolama verimi sunmadığı için mobil kullanımlar için uygun olmadığı gerçeğini ortaya koymaktadır. Ayrıca bu yöntemde esas olan Hidrojenin safsızlık içerme ihtimali metal yapının tekrarlı şarj deşarj işlemleri sonrası ciddi performans kaybını netice vermekte ve metal yapının değişim gerekliliği nedeni ile kullanımlarını sınırlandırmaktadır (Yıldız,2004).

3.2.6.4. Sodyum Alanatlarda Depolama

Hidrojen depolamada bir diğer yöntem olan Alanatların kullanımın şekilleri de yine toz olarak kullanımdır. Genel olarak sodyum alüminyum hidrürü üzerinde durulmaktadır ancak sodyum lityum alüminyum hidrür gibi daha kompleks alanatları konu alan çalışmalar da yapılmaktadır. Sodyum alanat ile ağırlıkça toplam % 7,4 hidrojen depolanabilmekte ama alanattan geri alınan normal koşullarda ağırlıkça %5,55 düzeylerinde kalmaktadır (Yıldız,2004).

3.2.6.5. Sodyum Bor Hidrür Esaslı Depolama

Bor elementinin yapısal özeliği nedeni ile çok hidrojen bağlayabileceği üzerine son yıllarda birçok çalışma yapılmaktadır. Bu amaçla sodyum bor hidrür kullanımı esas alınmaktadır. NaBH_4 katı halde ağırlıkça % 10,5 hidrojen içermektedir. Su ve NaOH ilavesi ile sodyum bor hidrür birlikte kullanılarak NaBH_4 'ün sıvı içerisindeki oranı ağırlıkça % 20-35 arasında olabilmektedir (Yıldız,2004).

Sodyum bor hidrür'ün depolamada tercih edilmesinin en önemli nedeni depolanan hidrojenin oda sıcaklığında geri alınabilmesidir. NaBH_4 'ün hidrojen depolamada yaygın olarak kullanılabilmesi için geri dönüşümünün nispeten basit ve ekonomik tercihen ayrıştırma gerektirmeyen yöntemlerle gerçekleştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

3.2.6.6. Nanotüplerde Depolama

Grafit tabakaların tüp şekline dönüştürülmesi ile elde edilen Karbon nano tüpleri, çapları birkaç nanometre veya 10-20 nano metre mertebesinde boyları ise mikron civarındadır. Nano tüpler tek cidarlı olarak üretilebileceği gibi çok duvarlı tüplerde üretilebilmektedir. Çeşitli ilavelerle oluşturulan, Li-K içeren nanotüpler de mevcuttur. Hidrojenin nanotüplerde depolanması iki şekilde gerçekleşmektedir. Fiziksel depolamada hidrojenin tamamı geri alınabilmekte ancak kimyasal depolamada ise ancak çok yüksek sıcaklıklara ulaşıldığında geri kazanım gerçekleşmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalar karbon nanotüplerinde % 4 ila 14 arasında hidrojen depolanabildiğini göstermiştir (Yıldız,2004).

Karbon nanotüplerinin hidrojen depolama kapasitesi tek veya çok duvarlı yapılar olmasına ve tüplerin kapalı veya açık olmasına tüp ölçülerine ve tüp yüzeylerinin aktifliğine göre değişiklik göstermektedir.

BÖLÜM 4

MATERYAL VE METOD

Deneysel sistem güneş pili, elektrolizör, su de iyonizer, batarya, şarj regülatörü, akım, gerilim, sıcaklık ve ışınım ölçerlerden oluşmaktadır. Güneş pilleri üzerine düşen güneş ışınımını DC akım üreterek şarj regülatörüne iletir. Regülatördeki DC akım istenilen değerlere ayarlanıp PEM elektrolizörün çalışması sağlanır. PEM elektrolizöre, de iyonizerden saf su beslemesi yapılmaktadır. PEM elektrolizörün anot tarafından beslenen su katalizör varlığında oksijen ve hidrojen iyonlarına ayrıştırılmakta, proton geçirgen zardan geçen hidrojen iyonları katot üzerinde yükseltgenme reaksiyonu ile elektronlarla birleşerek hidrojen molekülünü oluşturmaktadır. Deneysel çalışmalar Karabük Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Laboratuarlarında gerçekleştirilmiştir.

4.1. DENEY TESİSATINDA KULLANILAN MATERYALLER

4.1.1. Deney Tesisatı

Bu sistemde stand üzerine monte edilmiş olan güneş pili, üzerine düşen güneş ışınımını kendi bünyesinde DC akım üreterek yapılan kablo bağlantıları ile regülatöre iletir. Regülatördeki DC akım istenilen değere ayarlanıp PEM elektrolizörün çalışması sağlanır. PEM elektrolizöre bağlı bulunan tüpde saf su bulunmaktadır, bu saf su PEM elektrolizör içerisinde iyonlarına ayrıştırılarak hidrojen elde edilir.

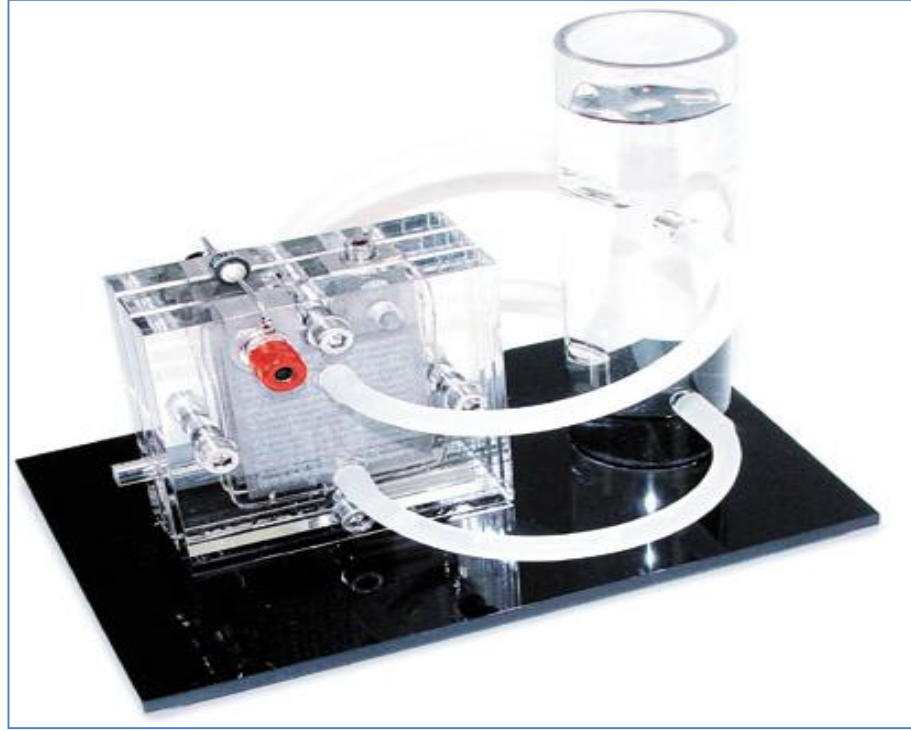


Şekil 4.1. Deney standı.

Deneysel çalışmalarda kullanılan elektrolizör Şekil 4'5'te gösterilmiştir. İki hücreli elektrolizörün anot tarafından de iyonize su beslemesi yapılarak anot üzerinde indirgenme, katot üzerinde yükseltgenme reaksiyonlarıyla oksijen ve hidrojen üretimi gerçekleşmektedir. Elektrolizöre 4 V gerilim ve 4 A akım değerlerinde maksimum 65 cm³/dak hidrojen üretim kapasitesine sahiptir. Hücreler seri olarak bağlanarak Gibbs serbest enerjisi olan hücre başına 1,229 V gerilim uygulanması gerekir. Ancak kayıplardan dolayı hücre başına 2 V gerilim uygulanmıştır. Üretilen hidrojen miktarı çekilen akımla doğru orantılı olarak değişmektedir.

4.1.2. Elektrolizör

- Çift-hücreli PEM elektrolitik yığını, distile su ile hidrojen üretimi için.
- Elektroliz 65 iki hücreli elektroliz yığını.
- Hücrenin merkezinde iki ayrı hücrelerin hidrojen tarafı ev sahipliği yapmaktadır.
- Hücrenin iki dış tarafında su sağlanması ve üretilen oksijen çıkarma işlevi vardır.
- İki ayrı hücre seri halde elektriksel olarak bağlanır.



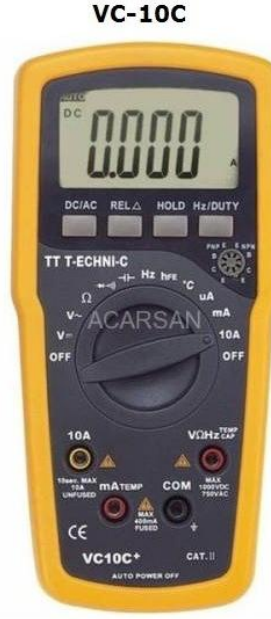
Şekil 4.2. 2 hücreli PEM elektrolizör.

Hidrojen Üretimi: $65 \text{ cm}^3/\text{dak}$ Güç: 15 W, YxGxD: 140x180x120 mm, Ağırlık: 460 g (www.uniterm.pl, 2013).

4.1.3. Akım ve Gerilim Ölçer

21mm LCD, $3\frac{3}{4}$ haneli el tipi dijital avometre Gerilim, akım, direnç, kapasitans, frekans, sıcaklık ölçümleri, diyot/kısa devre, transistör testi

- 21mm LCD Gösterge,
- $3\frac{3}{4}$ hane
- ölçüm limitleri
- gerilim : 1000V DC, 750 AC
- akım : 10A AC/DC
- direnç : 40M Ω
- kapasitans : 200 μ F
- frekans : 30 MHz
- sıcaklık : 100 °C



Şekil 4.3. Dijital Avometre

4.2. EKSERJİ ANALİZİ

Ekserji kelimesi, dıştaki (ex) ve güç/iş (ergon) kelimelerinden türetilmiş olup ilk kez, 1824 yılında Carnot tarafından ortaya atılmıştır. Yeni bir terim olarak ekserji, 1953 yılında Zoran Rant tarafından ileri sürülmüştür. Termodinamik açıdan ekserji, bir sistemin veya madde/enerji akışının referans ortamı ile denge durumuna geldiğinde üretebileceği en fazla iş miktarı olarak tanımlanmaktadır. Ekserji, belirli koşullarda tamamen tersinir bir değişime uğrayan bir sistemin, çevresiyle denge durumuna geldiğinde elde edilebilen en yüksek tersinir iştir.

Ekserji, enerjinin faydalılığının, kalitesinin bir ölçüsüdür ve bir maddenin çevreyle etkileşim potansiyelinin etkin bir ölçümüdür. Ekserji analizi ile işlemin geliştirme olanakları ve sistem bileşenlerindeki tersinmezliklerin dağılımı hakkında bilgi edinilebilir. Böylece sistemdeki tersinmezlikler belirlenebilmekte, enerji kayıpları minimize edilebilmekte ve enerjinin daha verimli kullanımı sağlanabilmektedir (Dinçer ve Şahin, 2004).

İşlem süresince gerçekleşen ekserji tüketimi, işleme ilişkin tersinmezlikler nedeniyle aratılan entropi ile orantılıdır. Mevcut sistemde iyileştirmelere nereden başlanacağı ve hangi noktada en çok enerji kaybı olduğunun bulunabilmesi için kullanılmakta olan enerji analizleri yeterli olmamaktadır. Çünkü enerji analizleri enerjinin kalitesi değil ancak miktarı hakkında bilgi edinilebilmesini sağlar (Dinçer ve Rosen, 2007). Çizelge 4.1. ile enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması verilmiştir.

Ekserji analizleri, enerji analizlerinden uygulamaya yönelik ve daha uygulanabilir sonuçlar vermektedir. Ekserji analizi (Dinçer, 2002):

Enerji-çevre ilişkisinde etkilerin belirlenmesinde bir araçtır.

- Enerji sistemlerinin tasarımı ve analizinde termodinamiğin ikinci yasası ile birlikte kütle ve enerjinin korunumu prensiplerini kullanan etkin bir yöntemdir.
- Daha verimli kaynak kullanımını, atık ve kayıpların yerlerini, tiplerini ve gerçek büyüklüklerini belirlemek mümkündür.
- Sistemlerdeki verimsizlikleri azaltarak, daha verimli enerji sistemlerini tasarlamak mümkündür.
- Sürdürülebilir kalkınmanın yanı sıra enerji politikalarının belirlenmesinde faydalanabileceği bir araçtır.

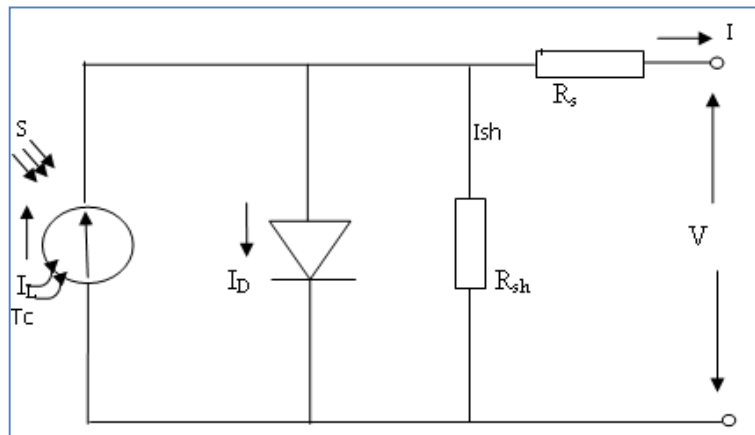
Çizelge 4.1. Enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması (Dinçer ve Rosen, 2007).

Enerji	Ekserji
Termodinamiğin birinci kanunu ile ilgilidir.	Termodinamiğin ikinci kanunu ile ilgilidir.
Daima korunur. Yoktan var edilemez veya yok edilemez.	Tersinir proseslerde korunur, tersinmez proseslerde daima kaybolur.
Enerji, hareket veya hareket üretebilme kabiliyetidir.	Ekserji, iş veya iş üretebilme kabiliyetidir.
Niceliğin bir ölçütüdür.	Niceliğin ve kalitenin bir ölçütüdür.
Sadece madde ve enerji akış parametrelerine bağlı, çevre parametrelerinden bağımsızdır.	Madde ve enerji akış parametrelerinin yanı sıra çevre parametrelerine de bağlıdır.

4.3. FOTOVOLTAİK SİSTEMİN ANALİZİ

4.3.1. Fotovoltaik Sistemlerin Modellenmesi

Fotovoltaik sistemler, gelen ışınlar sayesinde foton akım ve gerilimi oluşturan geniş alanlı düz beslemeli diyotlardır. Bir fotovoltaik sistemin akım gerilim karakteristiğini anlamak için tek diyotlu eşdeğer devresini iyi analiz etmek gerekir (Şekil 4.4.).



Şekil 4.4. Fotovoltaik hücrenin tek diyotlu modeli.

Şekil 4.4. incelendiğinde foton akımı I_L , diyot akımı I_D ve paralel koldan akan akım I_{sh} olmak üzere toplam panel çıkış akımı Denklem 4.1 ile verilmiştir (De Sotovd, 2006).

$$I = I_L - I_D - I_{sh} \quad (4.1)$$

Foton akımı güneş radyasyonuna ve kısa devre akımına bağlı değişirken aynı zamanda hücre sıcaklığı ve referans sıcaklık ($T_R=25^\circ\text{C}$) farkından elde edilen değer ile kısa devre akımının sıcaklık katsayısıyla çarpımıyla değişmektedir ve Denklem 4.2 ile hesaplanabilir.

$$I_L = I_s \cdot S_N + I_t(T_{hüc} - T_R) \quad (4.2)$$

Normalize güneş radyasyonunu, Denklem 4.2'de kullanabilmek için radyasyon değeri bine bölünerek elde edilir.

$$S_N = \frac{S_t}{1000} \quad (4.3)$$

Modelin sıcaklığa bağlı değişimi için diyot akımı, diyot doyma akımı I_0 için Denklem 4.4 verilmiştir (De Sotovd, 2006).

$$I_D = I_0 \cdot \left(e^{\frac{q(V+I.R_s)}{A k T_c}} - 1 \right) \quad (4.4)$$

Burada diyot doyma akımının çalışma noktasındaki değerini bulmak için aşağıdaki Denklem 4.5 kullanılır (De Sotovd, 2006).

$$I_0 = I_{0r} \cdot \left(\frac{T_r}{T_{hüc}} \right)^3 \cdot e^{\frac{q.E_g}{A.k} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_{hüc}} \right)} \quad (4.5)$$

Paralel direnç akımı denklemlerle verilmiştir ve toplam fotovoltaik akım foton akımından diyot akımı ve paralel akım değerinin çıkartılmasıyla Denklem 4.6 ile elde edilir.

$$I = I_S \cdot S_N + I_t \cdot (T_{hüc} - T_r) - I_D - I_{sh} \quad (4.6)$$

$$I_{sh} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (4.7)$$

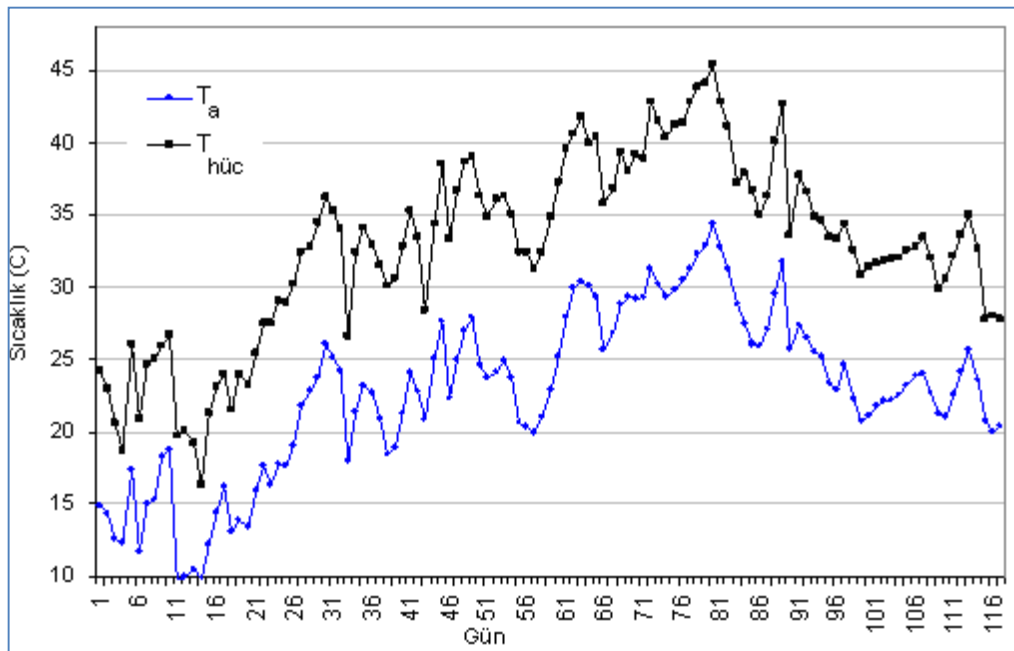
Fotovoltaik panellerden akım akmadığı yüksüz durum için açık devre gerilimi V_{ad} , Kv panel açık devre geriliminin sıcaklığa bağlı sabitesi olmak üzere Denklem 4.8 kullanılarak hesaplanır (campbell, 2007).

$$V_{ad} = V_{ad,n} + K_v \cdot (T_a - T_r) \quad (4.8)$$

Ayrıca hücre sıcaklığı, ortam sıcaklığı, güneş ışınımına ve normal çalışma hücre sıcaklığı ile nümerik olarak Denklem 4.9 ile elde edilir (campbell, 2007).

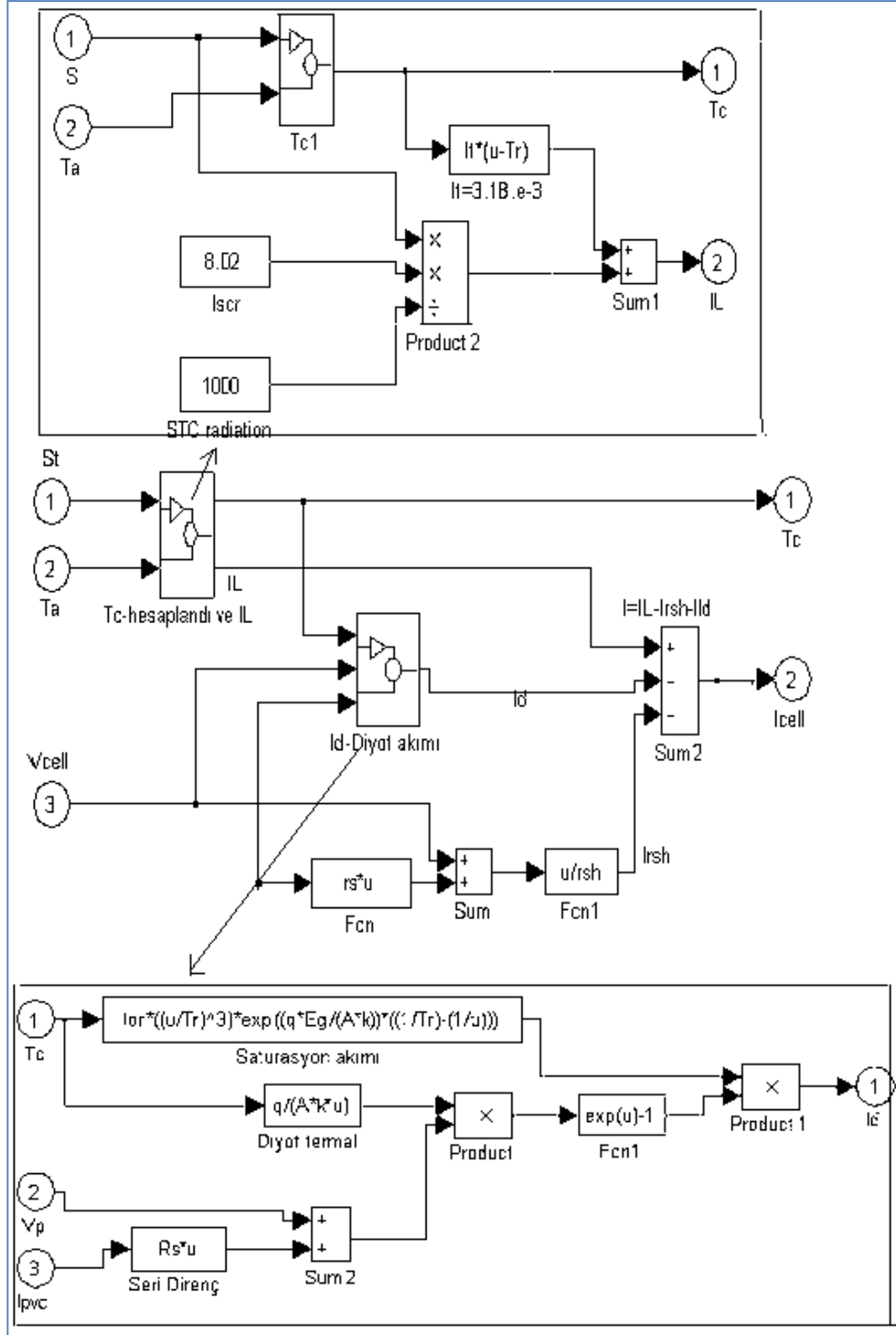
$$T_{hüc} = T_a + \frac{S_t}{800} (NOCT - 20) \quad (4.9)$$

Hücre sıcaklığının ortam sıcaklığına bağlı olarak değişimi Şekil 4.2. ile gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Fotovoltaik panellerin hücre sıcaklığının ortam sıcaklığı ile değişimi.

Fotovoltaik sistemin yukarda verilen denklemler ile oluşturulan Matlab- Simulink simülasyon modeline ait şema Şekil 4.6.'te verilmiştir. Farklı güneş ışınım ve ortam sıcaklıklarında çalışmasının modellendiği fotovoltaik sistem ile enerji ekserji hesaplamalarında mümkündür.



Şekil 4.6. Fotovoltaik panel için Matlab-Simulink blokları.

4.3.2. Fotovoltaik Sistemlerde Enerji ve Ekserji Analizi

Fotovoltaik sistemlerin enerji verimlerinin hesaplanması sistem performansının belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Ancak hesaplanmasında bazı güçlükler söz konusudur. Verim, sistemde üretilen toplam elektrik enerjisinin maksimum değerinin, birim alana düşen toplam güneş ışınımına oranı olarak Denklem 4.10 ile hesaplanır. Buda sadece fotovoltaik panellerden elektrik üretildiği anlar için uygun olmaktadır. Ayrıca hücre sıcaklığı, ortam sıcaklığı, ısı kapasitesi gibi parametreler direk olarak hesaba katılmamaktadır. Bu noktada daha kapsamlı ve daha fazla ortam parametresi ile hesaplama yapılabilen ekserji veriminde ise bu parametreler direk olarak hesaba katılmaktadır. Fotovoltaik sistemlerin enerji verimleri panel çıkış akım ve geriliminin maksimum değerlerinin, yüzeye gelen toplam güneş radyasyonuna oranı olarak Denklem 4.10 ile hesaplanmaktadır (Şahin ve Dinçer, 2007):

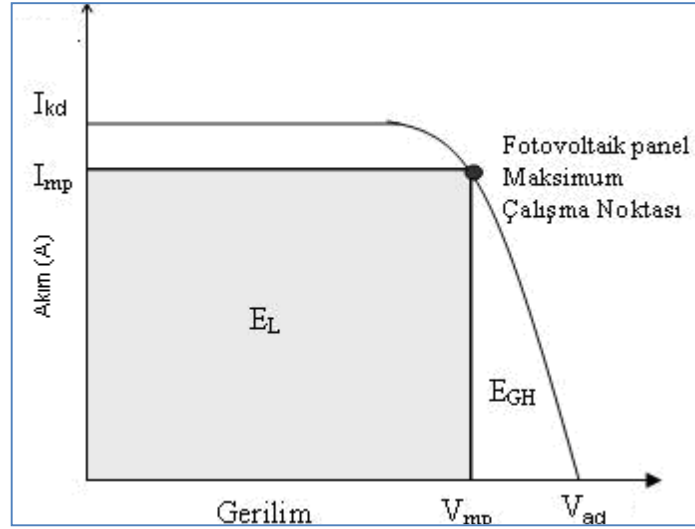
$$\eta = \frac{V_m \cdot I_m}{S_t \cdot A} \quad (4.10)$$

Güneş ışınımının ekserjisi, elektrik enerjisi ve termal enerji gibi farklı işlemlere dönüşme etkinliği açısından önemlidir. Işınım dönüşümü işlemlerinde, ekserji etkinliğinin dikkate alınarak tanımlanması gerekir. Işınım enerjisinin ısı enerjisine dönüşümü, tersinmez soğurma işlemi süresince belirli bir ekserji kaybı ile gerçekleşir.

Fotovoltaik veya termal kolektörlü sistemlerde ekserji analizinin esas amacı: (a) ısı ve kimyasal işlemlerin termodinamik hatalarının sebeplerini değerlendirmek, (b) enerji sistemlerindeki atık ve kayıpların gerçek değerleri, tipleri ve gerçekleştiği yerleri belirlemek (c) mevcut enerji sistemlerindeki etkinsizlikleri azaltarak, daha etkin sistem tasarım yöntemlerini geliştirmektir (Öztürk, 2005).

Fotovoltaik panellerin performansı dış ortam sıcaklığı, güneş ışınımı, hücre yüzey sıcaklığı gibi ortam şartlarının yanı sıra toplam ısı kayıp sabiti, açık devre gerilimi, kısa devre akımı, maksimum akım, maksimum gerilim ve yüzey alanı gibi çalışma ve tasarım parametrelerine bağlıdır. Sistemin performansı, genellikle enerji ve ekserji verimi olarak hesaplanmaktadır.

Ancak enerji analizi temel olarak enerjinin miktarıyla ilgilendiğinden 1 W ısı enerjisini 1 W elektrik enerjisine eşit olarak kabul eder. Ekserji analizi ise bu bakış açısının ötesinde, proseslerin performansı açısından daha gerçekçi sonuçlar vermektedir ve bazı durumlar için enerji ve ekserji verimleri farklılık göstermektedir (Dinçer, 2002).



Şekil 4.7. Fotovoltaik panelin maksimum çalışma noktası

Şekil 4.7.de görüldüğü gibi fotovoltaik sistemden elde edilen maksimum elektrik gücü E_L , akımın maksimum değeri ile gerilimin maksimum değerinin çarpımı olarak doğrudan yazılabilir. Kullanılmayan termal ekserji, panel yüzeyi ve çevre sıcaklığı arasında gerçekleşen ısı transferinin kullanılabilir işe çevrilmesiyle hesaplanabilir ve ekserji yıkımı olarak ifade edilebilir. $(V_{ad}I_{kd} - V_mI_m)$ terimi elektriksel ekserji yıkımını ifade eder.

Fotovoltaik panelde gerçekleşen ekserji transferi Denklem 4.11 ve 4.12 ile hesaplanabilir (Joshivd, 2009)

$$\sum \dot{E} x_g = \sum \dot{E} x_c + \sum \dot{E} x_d + \sum \dot{E} x_k \quad (4.11)$$

$$\dot{E} x_c = E_{x_m} - \sum \dot{I} - \sum \dot{E} x_k \quad (4.12)$$

Şekil 4.4. ile görüleceği gibi açık devre gerilimi V_{ad} ve kısa devre akımı I_{kd} çarpımı fotovoltaik sistemden elde edilebilecek maksimum gücü ($E_L + E_{GH}$) ifade etmektedir. E_L bölgesi ise fotovoltaik tersinmezliklerden kaynaklanmaktadır.

$$E_{x_m} - \sum \dot{I} = V_{ad}I_{kd} - (V_{ad}I_{kd} - V_m I_m) = V_m I_m \quad (4.13)$$

Isı kaybı Q ise çevreye ısı enerjisi olarak atılmaktadır. Değeri ise Denklem 4.14 ile hesaplanabilir.

$$Q = h_c \cdot A \cdot (T_{hüc} - T_a) \quad (4.14)$$

Çevreye olan ekserji kaybını hesaplamak için, ısı taşınım katsayısı nümerik olarak $h_c = 5.7 + 3.8 \cdot V$ olarak ifade edilmiş ve aşağıdaki Denklem 4.15'te kullanılmıştır (Joshivd, 2009).

$$\sum \dot{E} x_k = \left(1 - \frac{T_0}{T_{hüc}}\right) \cdot [(5.7 + 3.8 \cdot V) \cdot A \cdot (T_{hüc} - T_a)] \quad (4.15)$$

Çıkış ekserji denklemi daha açık bir şekilde Denklem 4.16 ile ifade edilir [72].

$$\dot{E} x_c = V_m \cdot I_m - \left(1 - \frac{T_0}{T_{hüc}}\right) \cdot [h_c \cdot A \cdot (T_{hüc} - T_a)] \quad (4.16)$$

Ekserji veriminin hesaplanabilmesi için sistemin çıkış ekserjisinin yanı sıra sisteme güneşten gelen giriş ekserjisinin hesaplanması gerekmektedir. ve Denklem 4.17 ile hesaplanır (Joshivd, 2009).

$$\sum \dot{E} x_g = S_t \cdot A \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_g}\right) \quad (4.17)$$

Fotovoltaik panellerin ekserji verimi çıkış ekserji değerinin giriş ekserji değerine oranı olarak Denklem 4.18 ile hesaplanabilir (Joshivd, 2009).

$$\Psi_{PV} = \frac{\dot{E}_{x_c}}{\dot{E}_{x_g}} = \frac{V_m \cdot I_m - \left(1 - \frac{T_0}{T_{hüc}}\right) [h_c \cdot A \cdot (T_{hüc} - T_a)]}{S_t \cdot A \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_G}\right)} \quad (4.18)$$

4.4. PEM ELEKTROLİZ SİSTEMİNİN ANALİZİ

4.4.1. PEM Elektroliz Sisteminin Modellenmesi

Bir PEM elektrolizörün dinamik davranışını düzgün bir şekilde modelleyebilmek için anot, katot, membran, gerilim bölümlerini ve birbiriyle olan etkileşimini iyi anlamak gerekir. Elektrolizöre gerilim uygulandığında uygulanan gerilim değerine bağlı olarak Nernst eşitliğini kullanarak omik polarizasyon ve aktivasyon polarizasyon hesaplanabilir (Görgün, 2006).

Elektroliz reaksiyonun tümü için Denklem 4.19 ile verilen kimyasal reaksiyon için reaksiyona giren ürünler ve çıkan reaktantlar için stokiyometrik sabitler için, reaksiyondan çıkan ürünlerin işaretleri artı, giren reaktantların işaretleri eksi olarak kullanılmaktadır. A, B, C, D değerleri reaksiyona giren reaktantların ve reaksiyondan çıkan ürünlerin termodinamik özellikleridir.



Reaksiyonun ideal durumdaki Gibbs serbest enerjisi gazların ve suyun spesifik ısı kapasitesi modeliyle verilmektedir (Spiegel, 2008).

$$\Delta G^\circ = R \cdot T \cdot \left[\frac{\Delta G^\circ - \Delta GH_0^\circ}{R \cdot T_0} + \frac{\Delta GH_0^\circ}{R \cdot T} + \frac{1}{T} \int \frac{\Delta Cp^\circ}{R} dT - \int_{T_0}^T \frac{\Delta Cp^\circ}{R} \frac{dT}{T} \right] \quad (4.21)$$

ΔGH_0° ve ΔH_0° sıvı haldeki suyun referans sıcaklık değerinde (T_0) standart entalpi ve Gibbs enerji değeridir. Eşitlikte verilen ürünler ve reaktantların spesifik ısı kapasitelerinin sıcaklıkla değişimi ise (Spiegel, 2008);

$$\int_{T_0}^T \Delta C p^\circ dT = (\Delta A)T_0(\tau - 1) + \frac{\Delta B}{2}T_0^2(\tau^2 - 1) + \frac{\Delta C}{3}T_0^3(\tau^3 - 1) + \frac{\Delta D}{T_0}\left(\frac{\tau-1}{\tau}\right) \quad (4.22)$$

$$\int_{T_0}^T \frac{\Delta C p^\circ}{R} \frac{dT}{T} = \Delta A \ln \tau + \left[\Delta B T_0^2 + \left(\Delta C T_0^2 + \frac{\Delta D}{\tau^2 T_0^2} \right) \left(\frac{\tau+1}{2} \right) \right] (\tau - 1) \quad (4.23)$$

T reaksiyonun gerçekleştiği sıcaklık (K), R evrensel gaz sabiti ($8.314 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$) ve $\tau = \frac{T}{T_0}$ olarak tanımlanır.

Pratikte Gibbs serbest enerjisi iş yapmak için mevcut net iç enerjisidir. Standart basınç ve sıcaklıkta Gibbs serbest enerji değeri sıfır enerji noktası olarak tanımlanır ve bir sistemin enerjisindeki değişimi hesaplamakta kullanılır. Gibbs serbest enerji değeri maddenin durumu ve sıcaklığı ile değişir, sabit bir değere eşit değildir. Suyu hidrojen ve oksijene ayırmak için gereken tersinir gerilim, ürünler ve reaktantlar arasındaki serbest enerjisindeki değişiklik olarak tanımlanır (Spiegel, 2008).

$$E_0 = -\frac{\Delta G^0}{z.F} \quad (4.24)$$

E_0 bir elektroliz hücresinin teorik minimum tersinir gerilimi, z elektron sayısı (2), F faraday sabitidir ($96485 \text{ coulombmol}^{-2}$). Önemli miktarda suyu parçalamak için gereken gerçek gerilim değeri ise V_{el} , E_0 dan büyük olmalıdır. Gerilimlerin ikisi arasındaki fark ise aşırı gerilim, polarizasyon veya basit kayıplardır. Elektrolizör gerilimi V_{el} , E açık devre gerilimi, aktivasyon gerilimi ve omik polarizasyon gerilimlerinin toplamıyla elde edilmektedir [145].

$$V_{elk} = E + V_{akt} + V_{ohm} \quad (4.25)$$

Nerst potansiyeli (E) standart olmayan koşullarda ve reaksiyonun aktivitesinin değişimine karşı gelir (Görgün,2006).

$$E = E_0 + \frac{R.T}{2.F} \cdot \ln \left[\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right] \quad (4.26)$$

P_{H_2} , P_{O_2} , P_{H_2O} hidrojen oksijen ve suyun kısmi basınçlarıdır. P_{H_2O} suyun kısmi basıncı deneysel bir formülle bulunabilir. Deionizeden anot yığına giren suyun sıcaklık değişimine bağlı olarak değişmektedir (Görgün,2006).

$$P_{H_2O} = 610.78 \cdot \exp\left[\frac{T}{T+298.3}\right] (17.2694) \quad (4.27)$$

$$P_{H_2} = P_k - P_{H_2O} \quad (4.28)$$

Aktivasyon Aşırı Gerilimi: Elektro-kimyasal reaksiyon süreçlerinde reaksiyona giren reaktantların üstesinden gelmesi gereken enerji bariyerleri mevcuttur. Reaksiyona giren reaktantların üstesinden gelmesi gereken enerji bariyerleri aktivasyon enerjisi olarak bilinmektedir, ve buda aktivasyon aşırı geriliminin bir sonucudur. Elektrotlarda yürüyen kimyasal reaksiyonların hızının geçen akımdan daha düşük olması durumunda meydana gelir. Bu durumda elektrotlarda yürüyen reaksiyon hızını belli bir değerde tutabilmek için elektrot potansiyellerinin artırılması gerekir. Aktivasyon enerjisi iyonik ve elektronlar arasındaki transferdeki değişimlere bağlıdır. Anot ve katot aktivasyon aşırı gerilimi η_A ve η_c PEM yığınının tersinmez kayıplarını temsil eder ve toplam aşırı gerilim düşük akım yoğunluklarında daha etkin olmaktadır (Spiegel, 2008).

$$\eta_A = \frac{R.T}{\alpha_a \cdot z.F} \cdot \ln\left(\frac{i}{i_{a,0}}\right) \quad (4.29)$$

$$\eta_k = \frac{R.T}{\alpha_c \cdot z.F} \cdot \ln\left(\frac{i}{i_{c,0}}\right) \quad (4.30)$$

Burada aaveactransfer anot katot transfer sabitesidir. i_a ve i_c Anot katot değişim akımlarının yoğunluğu olup, i ise yığının akım yoğunluğudur.

Omik Kayıplar: Elektrotların, zarın ve etkileşim yüzeylerinde mevcut dirençler sebebiyle oluşmaktadır. Devreden hiç akım geçmezken ölçülen elektrot potansiyellerine denge potansiyeli denir. Devreden akım geçince elektrot potansiyellerinde polarizasyon nedeniyle değişimler olur. Denge durumunda elektrotların temel karakteristik davranışlarına bağlı olarak her bir elektrotta

ölçülebilen dinamik akımlar mevcuttur. Anot ve katot değişim akım yoğunlukları oksidasyon ve indirgenmenin bir oranı olarak tanımlanabilir. Büyük değişim akım yoğunluğu bir elektrotun hızlı bir kinetik ile anlık elektron transferinin büyük olduğunu, küçük akım yoğunluğu düşük kinetik ve elektron transferinin yavaş olduğunu göstermektedir. Anot katot akım değişim yoğunluğu sıcaklığın exponansiyel bir fonksiyonu olarak hesaplanabilir. Sıcaklığın artması ile daha hızlı kimyasal reaksiyon gerçekleşmesi bunun sonucunda yüksek kinetik enerji ile aktivasyon gerilimini düşürecek ve verimi yükseltecektir (Spiegel, 2008).

Omik kayıplar katı elektrolitteki iyonların hareketi ve elektrotlar boyunca elektron akışı neticesinde oluşur. Elektrolitteki iyon akışı ohm kanununa uyar. Omik aşırı potansiyel V_{ohm} eşitlikle tanımlanır ve yığın akım yoğunluğu (i), membranın kalınlığı φ , yığının iletkenliği σ olmak üzere

Denklem 4.31 ile hesaplanır;

$$V_{ohm} = i \cdot R_{ohm} \quad (4.31)$$

Burada σ (Siemens cm^{-1}) iyon transferindeki toplam membran direncini ve elektrotların elektriksel direncini içerir. Belirli bir kullanım süresi sonucunda iç polarizasyon kayıpları artar ve yığın geriliminde belirli akım değeri için artar. Omik polarizasyon ise (Görgün, 2006);

$$R_{ohm} = \frac{\varphi}{\sigma} \quad (4.32)$$

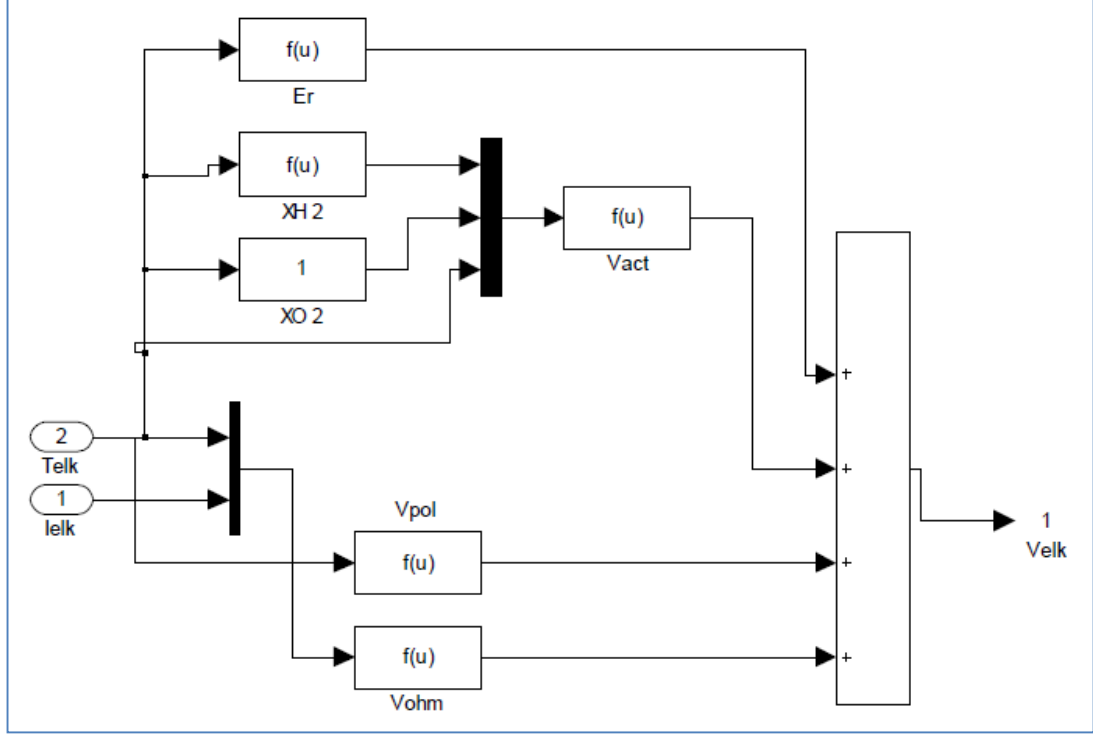
Yığının iletkenliği elektrolit ve sıcaklığa bağlı olarak Denklem 4.33 ile hesaplanır.

$$\sigma = (0.00514 \cdot \lambda_m - 0.00326) \cdot \exp\left(1268 \cdot \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{elk}}\right)\right) \quad (4.33)$$

Elektroliz ünitesinde saniyede üretilen hidrojen mol miktarı elektroliz akımı i faraday verimi η_F bağlı olarak Denklem 4.34 ile aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$N_{H_2} = \frac{n \cdot \eta_F \cdot i}{2 \cdot F} \quad (4.34)$$

Şekil 4.6.'da sıcaklığa ve akım yoğunluğuna bağlı olarak elektroliz gerilimini belirlemek için MatlabSimulink ile hazırlanan modelin blokları gösterilmiştir.



Şekil 4.8. PEM elektroliz için hazırlanan Matlab Simulink Modeli.

4.4.2. PEM Elektroliz Enerji ve Ekserji Analizi

PEM Elektroliz sisteminin verimi ve yığın verimi aşağıdaki denklemle verilmektedir. Sistemin veriminde hidrojenin üst ısı değeri (HHV= 39 kWh/kg) yada düşük ısı değeri kullanılabilir Yığının verimi ise çalışma sıcaklık ve basıncında ideal hücre gerilimi ve yığındaki hücre sayısını basınçla çarparak ölçülen sığın gerilimine bölünerek bulunmuştur (Spiegel, 2008).

$$\eta_{elk} = \frac{HHV \cdot N_{H_2}}{W_{elk}} \quad (4.35)$$

Sudan hidrojen üretilmesinde yaygın olarak kullanılan PEM elektrolizörlerinin termodinamik–elektrokimyasal modellerinin kullanılması sistemin çalışmasının iyi anlaşılmasını ve sistemde yapılacak optimizasyon çalışmalarını kolaylaştıracaktır. Ekserji verimi; reaksiyonadan çıkan ürünlerin ekserjileri ile reaksiyona giren

reaktantların (H₂O) ekserji farkının PEM elektrolizörünün giriş elektrik gücüne oranı olarak hesaplanır (Kazım, 2004).

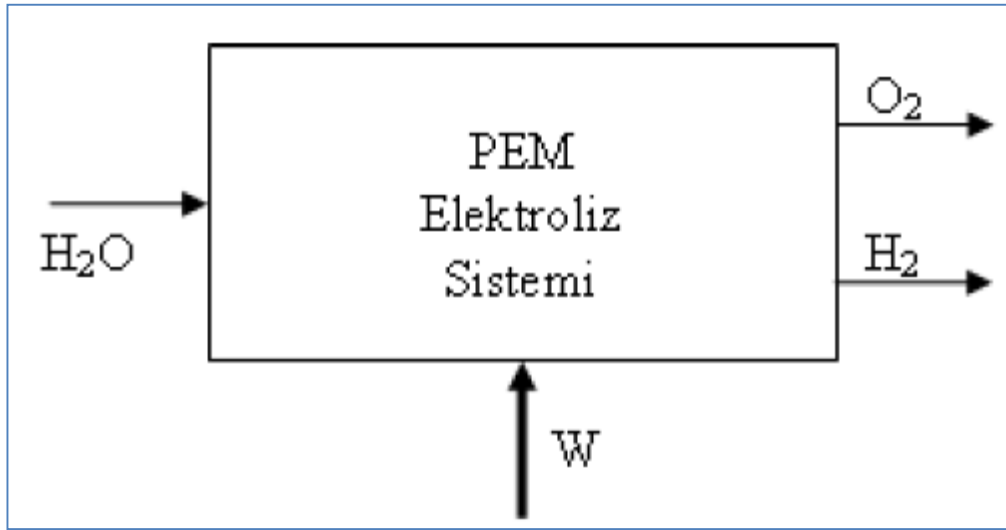
$$\psi_{elk} = \frac{(Ekserji)_{ürün} - (Ekserji)_{Reaktant}}{Elektrik-gücü} = \frac{(\dot{E}x_{H_2} + \dot{E}x_{O_2}) - (\dot{E}x_{H_2O})}{\dot{W}} \quad (4.36)$$

Reaktantların ve ürünlerin birim kütle için toplam ekserji transferi fiziksel ve kimyasal ekserjinin toplamıdır.

$$ex = ex_{fiz} + ex_{kim} \quad (4.37)$$

Fiziksel ekserji denkleminin en genel şekli aşağıda eşitlikle verilmiştir (Çengel vd, 2008).

$$ex_{fiz} = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0) \quad (4.38)$$



Şekil 4.9. Elektroliz prensip şeması.

Yukarıdaki eşitlik reaksiyona giren reaktant (H₂O) için uygun bir hesaplamadır. Fakat reaksiyondan çıkan ürünler hidrojen ve oksijen ideal gaz olarak değerlendirilir ve bu durumda fiziksel ekserji değeri spesifik ısı değeri Cp ve spesifik ısı oranı k olmak üzere Denklem 4.39 ile hesaplanabilir (Kazım, 2004).

$$ex_{fiz} = C_p \cdot T_0 \cdot \left[\frac{T}{T_0} - 1 - \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) + \ln \left(\frac{P}{P_0} \right)^{(k-1)/k} \right] \quad (4.39)$$

h_0 ve s_0 standart koşullardaki entalpiye karşılık gelmektedir. Ürünlerin ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\dot{E}x_{H_2O} = \dot{m}_{H_2O} \cdot (ex_{fiz} + ex_{kim})_{H_2O} \quad (4.40)$$

Elektroliz esnasında oluşan kimyasal reaksiyonda reaktantların toplam ekserji oranı ise teker teker Denklem 4.41 ve Denklem 4.42 ile aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\dot{E}x_{H_2} = \dot{m}_{H_2} \cdot (ex_{fiz} + ex_{kim})_{H_2} \quad (4.41)$$

$$\dot{E}x_{O_2} = \dot{m}_{O_2} \cdot (ex_{fiz} + ex_{kim})_{O_2} \quad (4.42)$$

Hidrojen oksijen ve suyun kütle akışlarının hesaplanabilmesi için öncelikle mol akışları bulunmalıdır. Hidrojen mol miktarı akım yoğunluğu ve faraday sabitine bağlı olarak hesaplanabilir. Bulunan bu değer hidrojenin birim mol değeri başına kütlesiyle çarpılarak kütle akışı hesaplanır (Kazım, 2004).

$$N_{H_2} = \frac{i}{2.F} \quad (4.43)$$

Burada i akım yoğunluğu (F) Faraday sabiti olup, benzer olarak saniyedeki oksijen mol miktarı miktarı ise,

$$N_{O_2} = \frac{i}{4.F} \quad (4.44)$$

Elektroliz sisteminden dışarı atılan su miktarı sisteme giren su miktarından hidrojen ve oksijen saniyedeki mol miktarının çıkartılmasıyla Denklem 4.45 ile hesaplanır.

$$N_{H_2O,\zeta} = N_{H_2O} - N_{O_2} - N_{H_2} \quad (4.45)$$

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

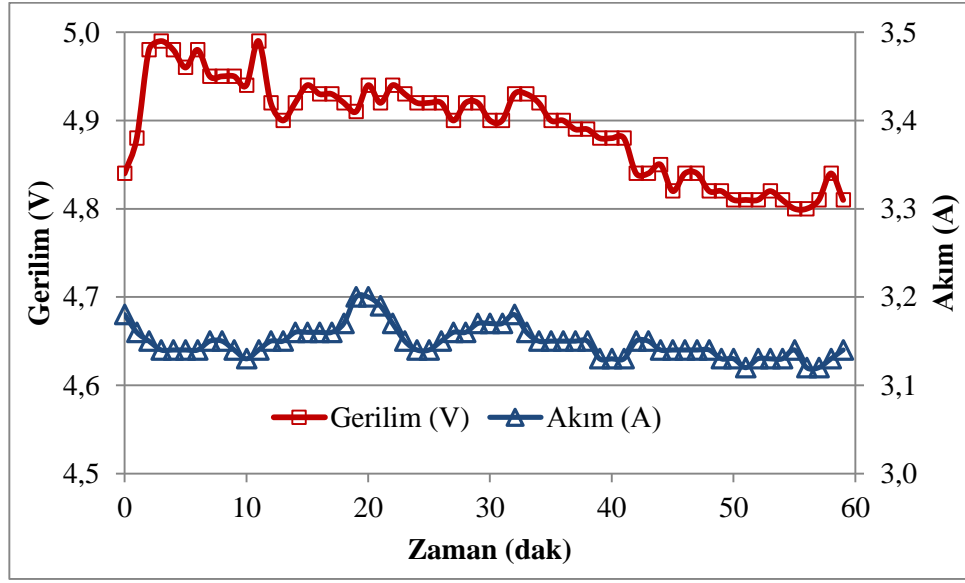
Yapılan bu çalışmada güneş enerji destekli bir PEM elektrolizör ile hidrojen üretimi deney sistemi tasarlanmış ve imal edilmiştir. Sistem elektroliz işlemi için gerekli gücü sağlayan güneş paneli, suyun oksijen ve hidrojene ayrıştırılmasını sağlayan elektrolizör, akım ve gerilim değerlerini elektroliz işleme uygun şekilde ayarlanabildiği regülatör, üretilen gücün depolanmasına imkan veren batarya ve deneysel verilerin ölçülmesinde ve kaydedilmesinde kullanılan bilgisayar akım gerilim, ışınım ve sıcaklık ölçüm cihazlarından oluşmaktadır.

Deneysel çalışmalarda elektrolizörün ve güneş pillerinin performanslarının ölçülmesi için iki deneysel çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda güneş ışınım şiddetine bağlı olarak, güneş pillerinde üretilen akım, gerilim, panel sıcaklığı gibi değerler ölçülmüştür. Yapılan birinci deneyde başlangıçta ışınım şiddeti 810 W/m^2 ölçülürken güneşin durumuna göre ışınım şiddeti 897 W/m^2 'ye kadar çıkmıştır. Bu değerlerde akım değeri 3,17-3,2 A arasında ölçülmüş, gerilim ise elektrolizör tarafından çekilen akıma bağlı olarak 4,6 ile 4,7 V arasında ölçülmüştür. İkinci deneysel çalışmalarda ise güneş ışınımı şiddeti başlangıçta 884 iken güneşin konumuna göre 956 W/m^2 'ye kadar çıkmıştır.

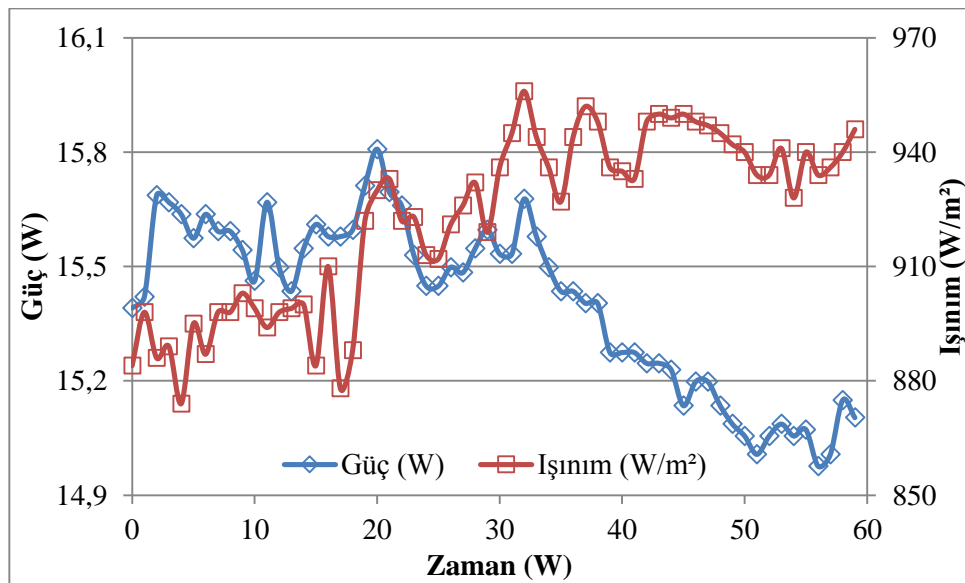
Şekil 5.1'de elektrolizör tarafından çekilen akım ve gerilim değerlerinin 60 dak zaman boyunca değişimi gösterilmiştir. Elektrolizörde hücre başına uygulanan gerilim sabit olmakla birlikte akım çekilmeye başlandığında gerilim değerlerinin de dalgalandığı görülmektedir. Ayrıca akım ve gerilim değerlerinde zamana bağlı olarak düşüş gözlenmektedir. Bu düşüş ışınım şiddetine, panel verimine ve elektrolizörde meydana gelen kayıplara bağlı olarak gerçekleşmektedir.

Güneş ışınım şiddetine bağlı panelde üretilen gücün değişimi şekil 5.2'de gösterilmiştir. Panel tasarlanırken flaş ışık altında üretebileceği maksimum akım ve

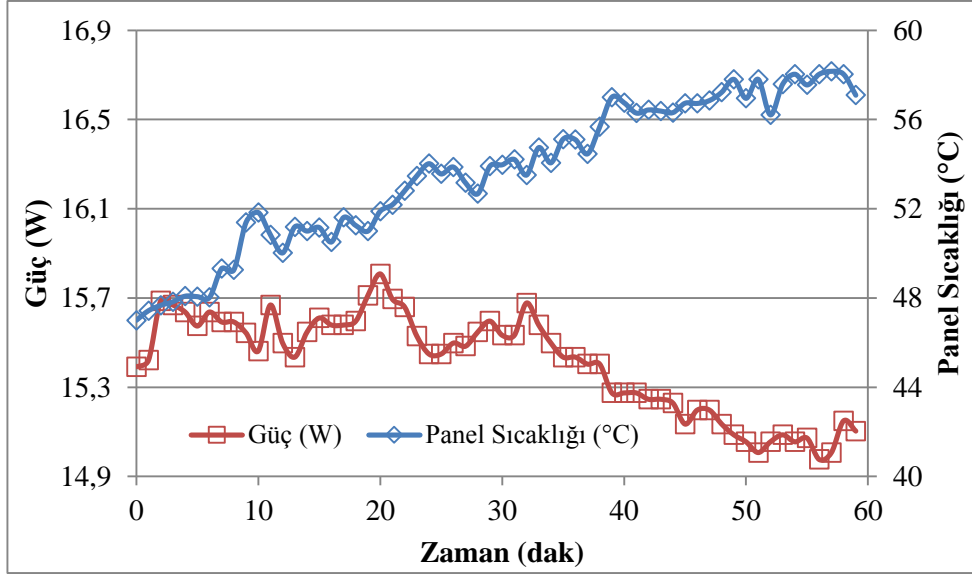
gerilim değerleri test edilerek verimleri hesaplanmaktadır. Ancak gerçek ortamda yapılan deneylerde birçok kayıplar ortaya çıkmaktadır. Şekilde de grldğu gibi ışınım Őiddetinde meydana gelen dalgalanmaya bağlı olarak üretilen güç değerinde değişimler meydana gelmiştir. IŞınım Şiddeti yaklaşık 850 ile 950 W/m² arasında değişirken üretilen güç miktarı yaklaşık 30 dakika boyunca 15,5 ile 15,8 W arasında değişirken panel veriminin düŐmesine bağlı olarak 14,9 W seviyelerine kadar gerilemiŐtir.



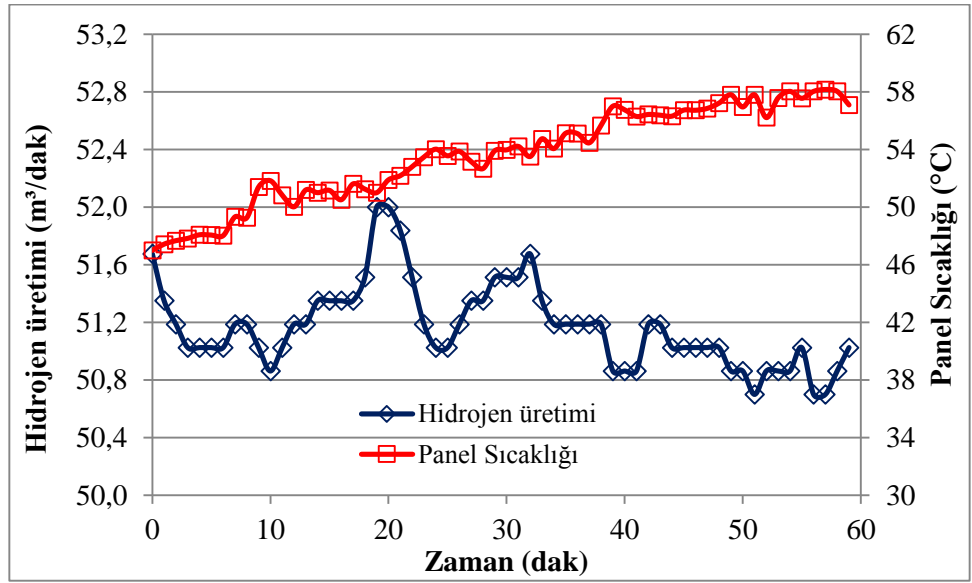
Şekil 5.1. Akım ve gerilim değerinin zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.2. IŞınım Şiddetine bağlı PV panel gücünün değişimi.



Şekil 5.3. PV panel gücünün panel sıcaklığına bağlı değişimi.



Şekil 5.4. Üretilen hidrojen miktarının PV panel sıcaklığına bağlı değişimi.

PV panel verimini etkileyen en önemli parametrelerden biride panel sıcaklığıdır. Flaş ışık altında test edilen PV paneller güneş ışığı altında yapılan testlerde verimlerinde önemli düşmeler meydana gelmektedir. Şekil 5.3'te panel sıcaklığına bağlı PV panel gücündeki değişim verilmiştir. Başlangıçta panel sıcaklığı 44 °C'de iken 15,7 W güç çekilirken sıcaklığın artmasına bağlı olarak güç üretimi düşmüş ve deneysel çalışma sonunda sıcaklık 58 °C'ye yükselmiş, bu sıcaklıklarda çekilen güç 14,9 W seviyelerine düşmüştür.

PEM elektrolizörde üretilen hidrojen miktarının panel sıcaklığına bağı olarak değişimi Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Sıcaklığın artmasına bağı olarak panel verimi düşükçe elektrolizörün çektiği akım değeri de düşmektedir. Elektrolizörün tam kapasite hidrojen üretebilmesi için Gibbs serbest enerjisi teorik gerilimin üzerine çıkılması gerekir. Bu değer hücre başına 2 V ve üzeri bir seviyededir. Üretilen hidrojen üretimi ise çekilen akımla doğru orantılı olarak değişmektedir. Cihaz maksimum 2 A akım çektiğinde 65 cm³/dak debisinde hidrojen üretebilmektedir. Burada 3,1-3,21 A arasında akım çekilmiştir. Panel sıcaklığı arttıkça panel gücü düşmüş ve üretilen hidrojen miktarı başlangıçta 51,6 cm³/dak iken deney sonunda sıcaklığın da etkisiyle 40 cm³/dak seviyelerine düşmüştür.

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada güneş enerji destekli bir PEM elektrolizör ile hidrojen üretimi deney sistemi tasarlanmış ve imal edilmiştir. Sistem elektroliz işlemi için gerekli gücü sağlayan güneş paneli, suyun oksijen ve hidrojene ayrıştırılmasını sağlayan elektrolizör, akım ve gerilim değerlerini elektroliz işleme uygun şekilde ayarlanabildiği regülatör, üretilen gücün depolanmasına imkan veren batarya ve deneysel verilerin ölçülmesinde ve kaydedilmesinde kullanılan bilgisayar akım gerilim, ışınlım ve sıcaklık ölçüm cihazlarından oluşmaktadır.

Deneysel çalışmalarda elektrolizörün ve güneş pillerinin performanslarının ölçülmesi için iki deneysel çalışma yapılmıştır. Yapılan birinci Deneyde başlangıçta ışınlım şiddeti 810 W/m^2 ölçülürken güneşin durumuna göre ışınlım şiddeti 897 W/m^2 'ye kadar çıkmıştır. Bu değerlerde akım değeri 3,17-3,2 A arasında ölçülmüş, gerilim ise elektrolizör tarafından çekilen akıma bağlı olarak 4,6 ile 4,7 V arasında ölçülmüştür. İkinci deneysel çalışmalarda ise güneş ışınlımı şiddeti başlangıçta 884 W/m^2 iken güneşin konumuna göre 956 W/m^2 'ye kadar çıkmıştır.

PEM elektrolizörde üretilen hidrojen miktarının panel sıcaklığına bağlı olarak değişimi Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Sıcaklığın artmasına bağlı olarak panel verimi düşükçe elektrolizörün çektiği akım değeri de düşmektedir. Elektolizörün tam kapasite hidrojen üretebilmesi için Gibbs serbest enerjisi teorik gerilimin üzerine çıkılması gerekir. Bu değer hücre başına 2 V ve üzeri bir seviyededir. Üretilen hidrojen üretimi ise çekilen akımla doğru orantılı olarak değişmektedir. Cihaz maksimum 2 A akım çektiğinde $65 \text{ cm}^3/\text{dak}$ debisinde hidrojen üretebilmektedir. Burada 3,1-3,21 A arasında akım çekilmiştir. Panel sıcaklığı arttıkça panel gücü düşmüş ve üretilen hidrojen miktarı başlangıçta $51,6 \text{ cm}^3/\text{dak}$ iken deney sonunda sıcaklığın da etkisiyle $40 \text{ cm}^3/\text{dak}$ seviyelerine düşmüştür.

KAYNAKLAR

Acarsan elektronik, www.acarsan.net, İnternet sayfası Erişim tarihi:24/05/2013

Atılğan, İ. , “Türkiye’nin Enerji Potansiyeline Bakış”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 15, 1, (2000), 31.

Bilen, K ,Özyurt, O., Bakırcı, K., Karılı, S., Erdogan, S., Yılmaz, M., andComaklı, O., “Energy production, consumption, andenvironment alpollution forsustainable development: A casestudy in Turkey”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, (2008), 1529.

Campbell. R.C., A circuit-basedphotovoltaicarray model forpowersystemstudies, Proceedings of 39th North AmericanPowerSymposium (NAPS), (2007), 97.

Chen, L., Li, J., Sun, F. And Wu, C., “Performance optimization of a two-stages emicinductor thermoelectric-generator”, *Appliedenergy*, 82 (2005) 300-312, 301, (2005)

Çengel, Y.A., and Boles, M.A., Thermo dynamics: An Engineering Approach, McGraw-Hill, 5.Baskı, (2008).

Çetinkaya, H. B., 2001, Günes Enerjisinden Elektrik Elde Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 154s.

Demirci, F.,1996, FotovoltaikGünes Pillerinin Çalışmasını Etkileyen Dıs Faktörlerin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 58s.

De Soto, W. Klein, S. A. And Beckman. W. A., “Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance”, *Solar Energy*, 80, 1, (2006), 78.

Dincer, I. and Sahin, A.Z., “A new model for thermo dynamic analysis of a drying process”, *International Journal of HeatandMass Transfer*, 47, (2004), 645.

Dincer, I.,and Rosen, M.A., Exergy: Energy Environment and Sustainable Development, Elsevier, (2007), p.13.

Dincer, I., “The role of exergy in energy policy making”, *Energy Policy*, 30, (2002), 137.

Eakburanawat, E. And Boonyaroonate, I., “Development of a thermo electric battery charger withmicro controller-based maximum powerpoint tracking technique”, *Appliedenergy*, 83 (2006) 687-704, 689, (2005)

Engin R., 1995, Güneş Pilleri, Yüzüncü *Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi Fizik Bölümü Yayınları* No:3, 151s.

European Windenergy (AWEA), *Wind in power 2009 European statistics* www.ewea.org/, (05.07.2010 tarihinde erişilmiştir).

Eward, R., “Requirements for advanced mobile storagesystems”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 23: 803-814 (1998).

Galli, S. and M. Stefononi , “*Stand Alone Photovoltaic Hydrogen Energy System*, Saphys.,Enea, 1337 (2000).

Görgün. H., “Dynamic modelling of a proton Exchange membrane (PEM) electrolyzer”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 31, 1, (2006), 29.

Güven, S. Y., Üçgül ve Senol, R. “Güneş enerjisi ısıl uygulamaları ve güneş kulelerinin incelenmesi”, *Mühendis ve makine*, 533, 1-3, 15, (2004)

Joshi, A.S.,Dincer, I., and Reddy, B.V., “Thermodynamic assessment of photovoltaic systems”, *Solar Energy*, 83, 8, (2009), 1139.

GÜNKAYA, Erkan, Güneş Enerjisinden Yararlanarak Elektrik Üretimi, *S.D.Ü., Mühendislik-Mimarlık Fakültesi*, Makine Mühendisliği Bölümü, Bitirme Ödevi, ISPARTA – 2001

Kazim, A., “Exergy analysis of a PEM fuelcell at variable operating conditions”, *Energy Conversion and Management*, 45,11-12, (2004), 1949.

Kılıç A. ve Öztürk A., “Güneş enerjisi”, 1-4, (1983).

K hattab, N. M. And Shenawy, E. T. el, “Optimal operation of thermo electric coolerdriven by solar thermo electric generator”, *Energy conversion and management*, 47 (2006) 407-426, 408, 2005

Köse, S., 1986, Yarıiletken Güneş Pilleri ve Verimlilikleri, Yüksek Lisans Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 78s.

Külünk, H. ve Eyice, S., “Yeni enerji kaynakları”, 2-5, (1983).

Lertsatitthanakorn, C., “Electrical performance analysis and economic evaluation of combined biomasscook stove thermoelectric (BITE) generator”, *Bioresearch technology*, 5, (2006)

Pırasacı, T. ve Sivrioglu M., “Yüksek konsantrasyonlu, sabit, üç yansıtıcılı güneş kollektörü”, *Mühendis ve makine*, 46 (549), 35 (20..)

Sahin, A.D.,and Dincer, İ., and Rosen, M.A., “Thermodynamic analysis of solar photovoltaic cell systems”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 91, (2007),153.

- Schucan, T., Case studies of integrated Hydrogen Energy Systems, IEA,(2001).
- Spiegel, C., PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB, Academic Press, (2008).
- Şenaktaş, B., Hidrojen Enerjisi, Üretimi ve Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, **Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, (2005).
- Öztürk, H.H., Akdeniz Bölgesinde Güneş Işınım Ekserjisi Değişimi, Yeksem (2005).
- Temel Elektronik*, 2005, **İstanbul Kültür Üniversitesi**, Yarıiletken Yapıları, 3 (1), 121
- Thomas, J. P., Quidwai, M. A. and Kellogg, J. C., “Energy scavenging for small-scale autonomous systems”, *Journal of power*, 159 1494-1509, 7, (2006)
- Uyarel, Y. ve Öz, E. S., “Güneş enerjisi ve uygulamaları”, 1-4, (1987).
- Ültanır, M.Ö., **21. Yüzyıla Girerken Türkiye'nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi**, (1998) (<http://www.tusiad.org.tr> adresinden 19.04.2010 tarihinde erişilmiştir).
- Vanhanen, J.P., “*On the performance of improvements of small-scale photovoltaic hydrogen energy systems*”, PhD Thesis, Espoo, Finland, (1996).
- Vorobiev, Y. And Gonzalez-Hernandez, J., “Thermal-photovoltaic solar hybrid system for efficient solar energy conversion”, *Solar energy*, 80 (2006) 170-176, 174, (2005)
- Voss, K., Goetzberger, A., Bopp, G., Häberle, A., Heinzl, A. And Lehmann, H., “The Self-sufficient Solar House in Freiburg- results of 3 years of operation”, *Solar Energy*, 58, (1996), 17.
- Yıldız, İ.E., “Buji Ateşlemeli Motorda LPG ve Hidrojen Kullanımının Performans ve Emisyonlara Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 3-14 (2004).
- Zouliasa, E.I. , Glockner R., Lymberopoulos N., Tsoutsos T., Vosseler I., Gavalda O., Mydske H.J., and Taylor P., “Integration of hydrogen energy technologies in stand-alone power systems analysis of the current potential for applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10, (2006), 432.
- Xi, H., Luo, L. and Fraise, G., “Development and applications of solar-based thermoelectric Technologies”, *Renewable and sustainable energy reviews*, 3, (2005)
- İnternet : Wikipedia web sitesi “Hidrojen” <http://tr.wikipedia.org/wiki/Hidrojen> (2007).
- Dwyer Inc., www.dwyer-inst.com, İnternet sayfası Erişim tarihi: 20/05/2013

ElektrosolarLtd.,www.solarmarketi.com, İnternet sayfası Erişim tarihi: 20/05/2013

Uniterm, www.uniterm.pl, İnternet sayfası Erişim tarihi: 20/05/2013

<http://www.eie.gov.tr/turkce/gunes/pvilke.html>

http://tr.wikipedia.org/wiki/G%C3%BCne%C5%9F_enerjisi (20.02.2011)

193.140.122.139/solar/solarcells_in_TR.ppt (20.02.2011)

ÖZGEÇMİŞ

İsmail DOĞU 1986 yılında Burdur’da doğdu; ilk, orta ve lise öğrenimini aynı şehirde tamamladı. 2004 yılında Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Tesisat Eğitimi Bölümü’nde öğrenime başlayıp 2008 yılında mezun oldu. 2009 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tesisat Eğitimi Anabilim Dalı’nda başlamış olduğu yüksek lisans programını, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda tamamladı.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Gazi Osman Paşa mahallesi

MERKEZ/ YALOVA

Tel : (546) 7757077

E-posta : yagmur_krb_krb@hotmail.com