

**GÜNEŞ-HİDROJENLİ BİR SİSTEMİN KURULMASI VE
PERFORMANSININ ANALİZİ**

**Pamukkale Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Ahmet YILANCI

**Tez Danışmanları: Doç. Dr. Harun Kemal ÖZTÜRK
Prof. Dr. İbrahim DİNÇER**

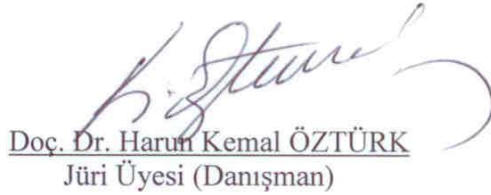
**Ağustos, 2008
DENİZLİ**

DOKTORA TEZİ ONAY FORMU

Ahmet YILANCI tarafından Doç.Dr. Harun Kemal ÖZTÜRK ve Prof. Dr. İbrahim DİNÇER yönetiminde hazırlanan “**Güneş-Hidrojenli Bir Sisteminin Kurulması ve Performansının Analizi**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.



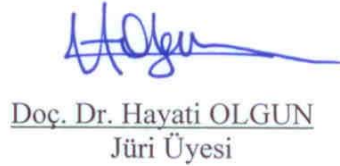
Prof. Dr. İbrahim DİNÇER
Jüri Başkanı (Danışman)



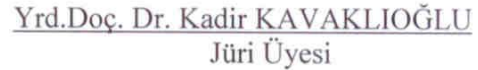
Doç. Dr. Harun Kemal ÖZTÜRK
Jüri Üyesi (Danışman)



Prof. Dr. Rasim KARABACAK
Jüri Üyesi



Doç. Dr. Hayati OLGUN
Jüri Üyesi



Yrd.Doç. Dr. Kadir KAVAKLIOĞLU
Jüri Üyesi



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu' nun .../.../.....
tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet Ali SARIGÖL
Müdür

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğini beyan ederim.

İmza

:



Öğrenci Adı Soyadı :

Ahmet YILANCI

TEŞEKKÜR

Bu çalışmamda benden desteğini esirgemeyen, konunun tespitinden çalışmanın sonuçlanmasına kadar olan süreçte yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren sayın Doç. Dr. Harun Kemal ÖZTÜRK'e ve Prof. Dr. İbrahim DİNÇER'e teşekkür ederim. Tezin konusunu oluşturan güneş-hidrojenli bir hibrid enerji sisteminin Pamukkale Üniversitesi kampüsünde kurulmasında maddi kaynak sağlayan Devlet Planlama Teşkilatı ile Denizli ilinin yerel enerji şirketlerinden Bereket Enerji, Siemens ve Nexans Kablo A.Ş.'ye ve değerli yöneticilerine desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca, tez çalışmasının bir bölümünü yürüttüğüm University of Ontario Institute of Technology'de bilimsel bilgi birikimlerinden yararlandığım, gece yarısına kadar akademik çalışmalar ve tartışmalar yaptığımız, Kanada'da kaldığım süre içinde beraber iyi zamanlar geçirdiğimiz Dr. Calin ZAMFIRESCU, Dr. Anand S. JOSHI ve Dr. Nirmal V. GNANAPRAGASAM'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Son olarak, her zaman benim yanımda olan ve her daim yanımda olmalarını isteyeceğim aileme; manevi desteklerini bana hissettiren çalışma arkadaşlarım Öner ATALAY, Çiğdem ERSAN, Engin ÇETİN ve Sinan KIVRAK'a; her türlü sıkıntımı aşmamda bana yardımcı olan Ege Üniversitesi Öğretim Görevlisi Dr. İsmail Cem KANTARLI'ya ve Max Planck Institute'de doktorasına devam eden Oktay GÖKTAŞ'a minnettar olduğumu belirtmek istiyorum.

ÖZET

GÜNEŞ-HİDROJENLİ BİR SİSTEMİNİN KURULMASI VE PERFORMANSININ ANALİZİ

YILANCI, Ahmet

Doktora Tezi, Makine Mühendisliği ABD

Tez Yöneticileri : Doç. Dr. Harun Kemal ÖZTÜRK, Prof. Dr. İbrahim DİNÇER

Ağustos 2008, 148 Sayfa

Bu çalışmada, bir güneş-hidrojenli hibrid enerji sistemi, Denizli’de Pamukkale Üniversitesi’nde kurulmuştur. Kurulan güneş-hidrojenli hibrid enerji sisteminin performans analizi güneş pili panellerinden son kullanıcıya kadar olan üç farklı enerji yolu dikkate alınarak yapılmıştır. Enerji ve ekserji analizinin yanı sıra her bir enerji yolunun elektriksel performansı rezistif, kapasitif ve indüktif karakteristiklere sahip farklı yükler altında incelenerek, bu yüklerin akım-gerilim-güç dalgalanmalarına etkileri gözlemlenmiştir. Güneş-hidrojenli hibrid enerji sisteminin her bir enerji yoluyla bu yüklerin elektrik ihtiyaçlarının karşılanmasında herhangi bir olumsuz dalgalanmanın meydana gelmediği görülmüştür. Hibrid enerji sisteminin ana bileşenlerinin karakteristikleri elde edildikten sonra, yıllık enerji ve ekserji akışını bulabilmek ve tahmin edebilmek amacıyla bir bilgisayar yazılımı (HOMER) kullanılmıştır. Sistemin, aylara göre, enerji veriminin %8.06 ile %9.88 arasında değiştiği hesaplanmıştır. Sistemin, aylara bağlı olarak, ekserji veriminin ise %9.06 ile %10.41 arasında olduğu görülmüştür. Hidrojen yolu, daha fazla elemana sahip olması nedeniyle en düşük enerji ve ekserji verimine sahip enerji yolu olmaktadır. Enerji yolları arasında en verimli enerji yol ise PV yolu olarak bulunmuştur. Sistemin hesaplanan ekserji yıkımlarında, güneş ışınımını elektrik enerjisine dönüştürme veriminin diğer sistem bileşenlerine göre daha düşük olması nedeniyle güneş pili panellerinin payının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu yüzden, en önemli bileşenin ve en fazla iyileştirme potansiyeli taşıyan bileşen güneş pili panelleridir. İleride güneş pili panellerinin verimlerinde meydana gelecek artışlar, bu tip hibrid enerji sistemlerinin performansını etkileyecektir. Ayrıca, bu çalışmada, Pamukkale Üniversitesi güneş-hidrojenli hibrid enerji sisteminin eksergoekonomik analizi ile PV yolunun yükü karşılamadaki ekserji maliyetlerinin 0.96 ile 2.68 ABD\$/kWh, akü yolunun 2.82 ile 3.16 ABD\$/kWh arasında değiştiği görülmektedir. Hidrojen yolunun yük karşılamadaki ekserji maliyetleri ise 192.30 ile 562.12 ABD\$/kWh arasında değişmektedir. Bu yüksek değerlerde elektrolizör ve yakıt pili sistemlerinin yatırım maliyetlerinin yüksek oluşu ve ömürlerinin kısa olması etkili olmaktadır.

Anahtar kelimeler: Güneş-hidrojen, hibrid enerji sistemleri, ekserji, eksergoekonomi.

Prof. Dr. İbrahim DİNÇER

Doç. Dr. Harun Kemal ÖZTÜRK

Prof. Dr. Rasim KARABACAK

Doç. Dr. Hayati OLGUN

Yard. Doç. Dr. Kadir KAVAKLIOĞLU

ABSTRACT**APPLICATION AND PERFORMANCE ANALYSIS OF A SOLAR-HYDROGEN SYSTEM**

YILANCI, Ahmet

Ph.D. Thesis in Mechanical Engineering

Supervisors: Assoc. Prof. Dr. Harun Kemal OZTURK, Prof. Dr. Ibrahim DINCER

August 2008, 148 Pages

In this study, a hybrid solar-hydrogen energy system was installed at Pamukkale University in Denizli. Performance investigation of the solar-hydrogen energy system is performed by considering three energy paths from photovoltaic panels to the consumer (PV, battery and hydrogen paths). In addition to the energy and exergy analyses, electrical performance of each energy path is investigated by using different electrical loads with resistive, capacitive, inductive characteristics and by observing their effects on current-voltage-power oscillations. It is seen that no unfavorable oscillations occurred when electrical demands of the different loads are supplied by each energy path of the hybrid solar-hydrogen energy system. After determining the characteristics of the main components of the hybrid energy system, a computer software (HOMER) is used in order to estimate and find out annual energy and exergy flows. It is found that energy efficiency of the system varies between 8.06% and 9.88% depending on the months. It is seen that exergy efficiency of the system changes between 9.06% and 10.41% depending on the months. The energy path with the least energy and exergy efficiency is hydrogen energy path due to additional components. PV energy path is the most efficient energy paths among the energy paths. Moreover, it is observed that most of the exergy destruction of the hybrid energy system is occurred in photovoltaic panels since their electrical conversion efficiency of solar radiation is quite low compared to the other system components. Therefore, the most important component which has the highest improvement potential is the photovoltaic panels. If there is an improvement of the efficiency of the photovoltaic panels in the future, it will affect the performance of this type hybrid energy systems. In this study, exergoeconomic analysis of the Pamukkale University hybrid solar-hydrogen energy system is carried out. It is found that exergetic cost of the electrical energy supplied by the PV path varies between depending on the months. It is seen that exergetic cost of the electrical energy supplied by of the battery path changes between US\$2.82/kWh and US\$3.16/kWh depending on the months. The electrical energy supplied by the hydrogen path has the highest exergetic cost which fluctuates between US\$192.30/kWh and US\$562.12/kWh because of the investment costs and life limitations of the electrolyzer and fuel cell systems.

Keywords: Solar-hydrogen, hybrid energy systems, exergy, exergoeconomics.

Prof. Dr. Ibrahim DINCER

Assoc. Prof. Dr. Harun Kemal OZTURK

Prof. Dr. Rasim KARABACAK

Assoc. Prof. Dr. Hayati OLGUN

Asst. Prof. Dr. Kadir KAVAKLIOGLU

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ ONAY FORMU.....	i
BİLİMSEL ETİK SAYFASI	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
TABLolar DİZİNİ.....	xii
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel	1
1.2. Tezin Önemi.....	3
1.3. Tezin Amaçları.....	4
1.4. Tezin Kapsamı	5
1.5. Fosil Enerji Kaynaklarının Kullanımı ve Küresel Isınma.....	7
1.6. Hidrojenin Güneş Enerjisinden Elde Edilmesi ve Kullanılması	12
1.6.1. Güneş enerjisinden hidrojen elde etme yöntemleri.....	14
1.6.1.1. Termal yöntemlerle hidrojen üretilmesi.....	16
1.6.1.2. Doğrudan elektrik elde edilerek suyun elektrolizi ve hidrojen üretilmesi	18
1.6.1.3. Fotoelektroliz yöntemi ile hidrojen üretilmesi.....	18
1.6.1.4. Fotobiyolojik olarak hidrojen üretilmesi.....	21
1.6.2. Güneş-hidrojen hibrid enerji sistemlerinin önemi.....	21
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	24
2.1. Pilot Projelerin Sistem Özelliklerine İlişkin Çalışmalar	24
2.1.1. SCHATZ	26
2.1.2. INTA	27
2.1.3. Solar-Wasserstoff-Bayern (SWB).....	28
2.1.4. Solar-hydrogen pilot projesi.....	28
2.1.5. Solar House	29
2.1.6. PHOEBUS	29
2.1.7. SAPHYS	30
2.1.8. FIRST.....	30
2.1.9. HRI.....	31
2.1.10. HARI.....	31
2.2. Teorik Çalışmalar.....	32
2.2.1. Enerji modelleme, kontrol, optimizasyon ve maliyet analizi çalışmaları	33
2.2.2. Enerji politikaları içindeki önemi ve çevresel etkileri üzerine çalışmaları.....	37
3. ANALİZ.....	40
3.1. Ekserji Analizinin Önemi.....	40
3.2. Ekserji ve Genel Denklemler	42
3.2.1. Ölü hal.....	42

3.2.2. Fiziksel ekserji	43
3.2.2.1. İdeal gazların fiziksel ekserjileri	43
3.2.2.2. Katı ve sıvıların fiziksel ekserjileri	44
3.2.3. Kimyasal ekserji.....	44
3.2.4. İş ekserjisi	44
3.2.5. Isı transferinin ekserjisi.....	45
3.3. Ekserji Yıkımı	45
3.4. Ekserjinin Açık ve Kapalı Sistemler Açısından Ele Alınması.....	45
3.5. Eksergoekonomi ve Genel Denklemleri	48
6.1. Güneş-Hidrojenli Sistemlerin Termodinamik Analizi	49
3.6.1. Güneş pili panellerinin ekserji analizi.....	49
3.6.2. Elektrolizörün ekserji analizi	51
3.6.3. Yakıt pili sisteminin ekserji analizi.....	51
4. PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ GÜNEŞ-HİDROJENLİ ENERJİ SİSTEMİ.....	59
4.1. Genel	59
4.2. Sistem Elemanlarının Boyutlandırılması ve Seçimi	60
4.3. Sistemin Tanıtımı	65
4.4. Sistem Elemanlarının Özellikleri	67
4.4.1. Güneş pili panelleri	67
4.4.2. Güneş izleyicileri	68
4.4.3. Aküler, invertörler ve şarj regülatörleri	71
4.4.4. Deiyonizör.....	71
4.4.5. Elektrolizör.....	72
4.4.6. Metal hidrid hidrojen depolama tankları.....	73
4.4.7. Yakıt pilleri	74
4.5. Sistemin Elektrik Tesisatının Projelendirilmesi ve Elektriksel Analizi.....	78
4.5.1. Sistemin elektrik tesisatının projelendirilmesi	78
4.5.2. Sistemin elektriksel analizi	80
4.5.2.1. PV yolunun elektriksel performans analizi	82
4.5.2.2. Akü yolunun elektriksel performans analizi	87
4.5.2.2. Hidrojen yolunun elektriksel performans analizi.....	92
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	96
5.1. HOMER Programının Tanıtımı	96
5.2. Sistem Bileşenlerinin Karakteristiklerinin Belirlenmesi.....	97
5.2.1. Güneş pili panellerinin karakteristiği ve analizi.....	98
5.2.2. Yakıt pili sisteminin karakteristiği ve analizi	105
5.3. Enerji Analizi Sonuçları.....	120
5.4. Ekserji Analizi Sonuçları	126
5.5. Eksergoekonomik Analiz Sonuçları.....	132
5.5.1. Ekonomik analiz.....	132
5.5.2. Eksergoekonomik analiz	134
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	137
KAYNAKLAR	140
ÖZGEÇMİŞ	148

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Dünya birincil enerji kaynaklarının tüketiminin 1980 ve 2006 yılları arasında kaynaklara göre dağılımı.....	7
Şekil 1.2 1972 ile 2008 (Mayıs) ayları arasında petrol ve doğal gazın kuyubaşı fiyatları	8
Şekil 1.3 Dünya yüzündeki hava sıcaklığının ve atmosferdeki karbondioksit miktarının 1880-2007 yılları arasında değişimi	10
Şekil 1.4 Bazı ülkelerin fosil enerji kaynaklarının kullanımı sonucunda elde ettikleri birim elektrik enerjisi başına atmosfere saldıkları karbondioksit miktarları	11
Şekil 1.5 Hidrojenin birincil enerji kaynaklarından üretilme yöntemleri	13
Şekil 1.6 Güneş enerjisinden hidrojen üretim yöntemleri ve hidrojenin kullanım yolları.....	15
Şekil 1.7 Fotoelektrokimyasal hücrenin şematik görünümü.....	19
Şekil 2.1 PV panelleri ile elektrolizörün doğrudan bağlantısının yapıldığı “SCHATZ” projesinin şematik görünümü.....	26
Şekil 2.2 PV panelleri ile elektrolizörün bağlantısının maksimum güç takibi yapan bir DC/DC konvertörle yapıldığı “INTA” projesinin şematik görünümü.....	27
Şekil 2.3 PV-rüzgar türbini-hidrojen hibrid enerji sistemlerinden biri olan “HRI” projesinin şematik görünümü.....	32
Şekil 3.1 Basit bir net akış diyagramı.....	47
Şekil 4.1 Pamukkale Üniversitesi Temiz Enerji Evi.....	59
Şekil 4.2 Pamukkale Üniversitesi güneş-hidrojen sisteminin şematik görünümü.....	65
Şekil 4.3 Pamukkale Üniversitesi güneş-hidrojen sisteminin ana elemanları.....	67
Şekil 4.4 Kyocera KC125GHT-2 güneş pili panellerinin akım – gerilim karakteristiği.....	68
Şekil 4.5 Zomeworks tarafından üretilen güneş izleyicilerinin gün içindeki hareketleri.....	69
Şekil 4.6 Sabit eğimli ve izleyici üzerineyerleştirilen güneş panellerinin elektrik bağlantıları	70
Şekil 4.7 Pamukkale Üniversitesi’nde kurulan güneş panellerinin fotoğrafları.....	70
Şekil 4.8 Şarj regülatörleri, şarj cihazı, invertörlerin kabini ve akü kabinindeki akülerin elektrik bağlantısı.....	71
Şekil 4.9 Şehir suyundan saf su elde etmek için kullanılan deiyonizör ünitesi....	72
Şekil 4.10 Suyun elektrolizini sağlayarak hidrojen elde edilmesinde kullanılan elektrolizör ünitesi.....	73
Şekil 4.11 Nexa yakıt pili modülü.....	74
Şekil 4.12 Nexa yakıt pili sisteminin akış diyagramı	75
Şekil 4.13 Nexa yakıt pili modülleri ve metal hidrid hidrojen tankları.....	76
Şekil 4.14 Pamukkale Üniversitesi güneş-hidrojen sisteminin elektrik tesisatı projesi.....	78
Şekil 4.15 Pamukkale Üniversitesi güneş-hidrojen sisteminin güneş-hidrojen sisteminin tek hat elektrik tesisat şeması.....	79
Şekil 4.16 Pamukkale Üniversitesi güneş-hidrojen sisteminin enerji yolları.....	80

Şekil 4.17 Doğrudan PV yolu beslemesinde farklı yüklerin devreye alınma zamanları ve akım-gerilim-güç değişimleri.....	82
Şekil 4.18 Doğrudan PV yolu ile fan beslemede ölçülen invertör linye çıkış hattı gerilim ve akım dalga şekilleri.....	83
Şekil 4.19 Doğrudan PV yolu beslemesinde klimanın elektrik ihtiyacının zamana bağlı değişimi ve akım-gerilim-güç değişimleri.....	84
Şekil 4.20 Klima tarafından soğutulan mekanın ortam sıcaklığının zamana bağlı değişimi.....	84
Şekil 4.21 Doğrudan PV yolu beslemesinde buzdolabının elektrik ihtiyacının zamana bağlı değişimi ve akım-gerilim-güç değişimleri.....	85
Şekil 4.22 PV yolu ile beslemede buzdolabı iç sıcaklığının zamana bağlı değişimi.....	86
Şekil 4.23 Doğrudan PV yolu ile buzdolabı fanının çalışması sırasında ölçülen invertör linye çıkış hattı gerilim ve akım dalga şekilleri.....	86
Şekil 4.24 Doğrudan PV yolu ile buzdolabının kompresörünün çalışması sırasında ölçülen invertör linye çıkış hattı gerilim ve akım dalga şekilleri....	87
Şekil 4.25 Akü yolu beslemesinde farklı yüklerin devreye alınma zamanları ve akım-gerilim-güç değişimleri.....	88
Şekil 4.26 Akü yolu ile fan beslemede ölçülen invertör linye çıkış hattı gerilim ve akım dalga şekilleri.....	88
Şekil 4.27 Akü yolu beslemesinde klimanın elektrik ihtiyacının zamana bağlı değişimi ve akım-gerilim-güç değişimleri.....	89
Şekil 4.28 Akü yolu ile klimanın çalışması sırasında ölçülen invertör linye çıkış hattı gerilim ve akım dalga şekilleri.....	90
Şekil 4.29 Doğrudan PV yolu beslemesinde buzdolabının elektrik ihtiyacının zamana bağlı değişimi ve akım-gerilim-güç değişimleri.....	90
Şekil 4.30 Akü yolu ile beslemede buzdolabı iç sıcaklığının zamana bağlı değişimi.....	91
Şekil 4.31 Doğrudan akü yolu ile buzdolabının kompresörünün çalışması sırasında ölçülen invertör linye çıkış hattı gerilim ve akım dalga şekilleri....	91
Şekil 4.32 Hidrojen yolu beslemesinde farklı yüklerin devreye alınma zamanları ve akım-gerilim değişimleri.....	92
Şekil 4.33 Hidrojen yolu ile fan beslemede ölçülen invertör linye çıkış hattı gerilim ve akım dalga şekilleri.....	93
Şekil 4.34 Hidrojen yolu ile fan beslemede ölçülen güç değeri ve gerilim-akım dalga şekilleri.....	93
Şekil 4.35 Hidrojen yolu beslemesinde klimanın elektrik ihtiyacının zamana bağlı değişimi ve akım-gerilim-güç değişimleri.....	94
Şekil 4.36 Hidrojen yolu beslemesinde buzdolabının elektrik ihtiyacının zamana bağlı değişimi ve akım-gerilim-güç değişimleri.....	95
Şekil 5.1 Güneş-hidrojen sistemi elemanlarının HOMER yazılımında görünümü.....	98
Şekil 5.2 Denizli ilinde yatay yüzeye düşen ortalama aylık güneş ışınım miktarı.....	99
Şekil 5.3 Denizli ilinin aylık ortalama bulutluluk oranı.....	99
Şekil 5.4 PV panellerinin üzerine düşen toplam güneş ışınım miktarının aylık değerleri.....	101
Şekil 5.5 Yük ihtiyacının bir günde saatlik değişimi.....	102
Şekil 5.6 Aylık ortalama hava sıcaklığı ve güneş pili panellerinin yüzey sıcaklığı.....	103

Şekil 5.7 Güneş pili panellerinin aylık ve yıllık ortalama saatlik güç üretimi.....	103
Şekil 5.8 Denizli iline ait aylık ortalama rüzgar hızları.....	104
Şekil 5.9 PV panellerinin aylık ortalama enerji ve ekserji verimleri.....	104
Şekil 5.10 Nexa yakıt pili sisteminin performans analizi için kurulan deney düzeneği.....	105
Şekil 5.11 Nexa yakıt pili sisteminin yük karakteristiği.....	105
Şekil 5.12 Nexa yakıt pili sisteminin sıcaklık profili.....	106
Şekil 5.13 Nexa yakıt pili sisteminin deneysel ve modelleme sonucu elde edilen polarizasyon eğrisi.....	107
Şekil 5.14 Yakıt pili sisteminin aktivasyon, ohmik, konstantrasyon gerilim kayıpları ve toplam (tersinmez) gerilim kayıpları.....	108
Şekil 5.15 Hidrojen, hava giriş debilerinin ve hidrojen basıncının değişimi	109
Şekil 5.16 Yakıt pili tarafından üretilen brüt gücün değişimi.....	110
Şekil 5.17 Net güç üretimi, tersinmezlikler ve ısı üretiminin akım yoğunluğuyla değişimi.....	111
Şekil 5.18 Yakıt pili sisteminin enerji ve ekserji veriminin akım yoğunluğu ile değişimi.....	112
Şekil 5.19 Polarizasyon eğrilerinin basıncın fonksiyonu olarak sabit sıcaklık (330 K) ve sabit anod stokiyometrisi (1.1) altında değişimi.....	113
Şekil 5.20 Net güç üretiminin basıncın fonksiyonu olarak sabit sıcaklık (330 K) ve sabit anod stokiyometrisi (1.1) altında değişimi.....	114
Şekil 5.21 Enerji veriminin basıncın fonksiyonu olarak sabit sıcaklık (330 K) ve sabit anod stokiyometrisi (1.1) altında değişimi.....	115
Şekil 5.22 Ekserji veriminin basıncın fonksiyonu olarak sabit sıcaklık (330 K) ve sabit anod stokiyometrisi (1.1) altında değişimi.....	115
Şekil 5.23 Polarizasyon eğrilerinin sıcaklığın fonksiyonu olarak sabit basınç (1 bar) ve sabit anod stokiyometrisi (1.1) altında değişimi.....	116
Şekil 5.24 Net güç üretiminin sıcaklığın fonksiyonu olarak sabit basınç (1 bar) ve sabit anod stokiyometrisi (1.1) altında değişimi.....	117
Şekil 5.25 Enerji veriminin sıcaklığın fonksiyonu olarak sabit basınç (1 bar) ve sabit anod stokiyometrisi (1.1) altında değişimi.....	117
Şekil 5.26 Ekserji veriminin sıcaklığın fonksiyonu olarak sabit basınç (1 bar) ve sabit anod stokiyometrisi (1.1) altında değişimi.....	118
Şekil 5.27 Enerji veriminin anod stokiyometrisinin fonksiyonu olarak sabit basınç (1 bar) ve sabit sıcaklık (330 K) altında değişimi.....	119
Şekil 5.28 Ekserji veriminin anod stokiyometrisinin fonksiyonu olarak sabit basınç (1 bar) ve sabit sıcaklık (330 K) altında değişimi.....	119
Şekil 5.29 Elektrolizörün aylık ortalama saatlik güç ihtiyacı.....	120
Şekil 5.30 Aylık ortalama saatlik hidrojen üretimi.....	120
Şekil 5.31 Hidrojen seviyesinin aylık değişimi.....	121
Şekil 5.32 Yakıt pili sistemleri tarafından üretilen aylık ortalama saatlik güç değerleri.....	121
Şekil 5.33 a) Güneş-hidrojen sisteminin PV yolunun şematik gösterimi. b) Güneş-hidrojen sisteminin akü yolunun şematik gösterimi. c) Güneş-hidrojen sisteminin hidrojen yolunun şematik gösterimi	123
Şekil 5.34 Güneş-hidrojen sistemi tarafından karşılanması gereken aylık ortalama yük miktarı.....	125
Şekil 5.35 Güneş-hidrojen sisteminin enerji yollarının ve sistemin ortalama enerji veriminin aylık değişimi.....	125

Şekil 5.36 Güneş-hidrojen sisteminin enerji yollarının ve sistemin ortalama ekserji veriminin aylık değişimi.....	126
Şekil 5.37 PV yolunda meydana gelen ekserji yıkımlarının ana elemanlara göre yüzdesel dağılımı.....	128
Şekil 5.38 Akü yolunda meydana gelen ekserji yıkımlarının ana elemanlara göre yüzdesel dağılımı.....	129
Şekil 5.39 Hidrojen yolunda meydana gelen ekserji yıkımlarının ana elemanlara göre yüzdesel dağılımı.....	130
Şekil 5.40 Sistemde meydana gelen ekserji yıkımlarının ana elemanlara göre yüzdesel dağılımı.....	131
Şekil 5.41 Enerji yolları ve sistem için iyileştirme potansiyeli değerlerinin aylık değişimi.....	131
Şekil 5.42 Pamukkale Üniversitesi Güneş-Hidrojen Sistemi'nin yatırım maliyetlerinin net bugünkü değerinde sistem bileşenlerinin payı	133
Şekil 5.43 PV yolu ve akü yolunun yük karşılamadaki aylık ortalama ekserji maliyetleri.....	136
Şekil 5.44 Hidrojen yolunun yük karşılamadaki aylık ortalama ekserji maliyetleri.....	136

TABLOLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 1.1 Hidrojenin fosil enerji kaynaklarından üretimi ve gerçekleşen CO ₂ emisyon miktarları.....	14
Tablo 1.2 Yenilenebilir enerji kaynaklarının 2006 yılında elektrik üretimi kurulu güçleri, 2000-2006 yılları arasındaki artış oranları ve 2020 yılı için tahmini kurulu güçleri.....	22
Tablo 2.1 Çeşitli ülkelerdeki hibrid PV-hidrojen/yakıt pili sistemleri ve özellikleri	25
Tablo 3.1 Enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması	42
Tablo 3.2 Elektrolizör ve yakıt pilinde meydana gelen tepkimelerin girenleri ve ürünlerinin standart kimyasal ekserjileri.....	58
Tablo 3.3 Güneş-hidrojen sistemi elemanlarının enerji ve ekserji verimi denklemleri	58
Tablo 4.1 Anlık güç ihtiyacının kullanılan cihazlara göre dağılımı.....	60
Tablo 4.2 Güneş-hidrojenli sistemin ana elemanlarının gereksinimleri.....	63
Tablo 4.3 Pamukkale Üniversitesi güneş-hidrojenli hibrid enerji sistemi için seçilen ana elemanlar ve özellikleri.....	64
Tablo 4.4 Nexa yakıt pili sisteminin bazı özellikleri	76
Tablo 4.5 Elektriksel performans analizinde kullanılan cihazların bazı özellikleri.....	81
Tablo 5.1 Modellemede kullanılan yükün seçimi.....	101
Tablo 5.2 Nexa yakıt pili sisteminin çalışma koşulları.....	108
Tablo 5.3 Güneş-hidrojen sisteminin enerji yollarının aylık ortalama saatlik güç akışı (W).....	124
Tablo 5.4 Güneş-hidrojen sisteminin akülerinde depolanan aylık ortalama saatlik net güç akışı (W) ve hidrojen tanklarının aylık seviyesi (g).....	124
Tablo 5.5 Güneş-hidrojen sisteminin enerji yollarının aylık ortalama ekserji akışı (W).....	127
Tablo 7.6 Pamukkale Üniversitesi Güneş-Hidrojen Sistemi'nin yatırım maliyetlerinin net bugünkü değerleri.....	133
Tablo 7.7 Pamukkale Üniversitesi Güneş-Hidrojen Sistemi'nin yatırım maliyetlerinin saatlik net bugünkü değerleri.....	134
Tablo 7.8 Güneş-hidrojen sisteminin enerji yollarının aylık ortalama ekserji maliyetleri (ABD\$/kWh).....	135

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	: Membranın Su Aktivitesi
$a_{catalyst}$: Kataliz spesifik alanı (cm^2/mgPt)
A	: Panel Yüzey Alanı (m^2)
c_p	: Özgül Isı (kJ/kgK)
$C_{in,i}$: Giren Ekserji Maliyeti ($\text{ABD\$/kWh}$)
$C_{out,i}$: Çıkan Ekserji Maliyeti ($\text{ABD\$/kWh}$)
C_w	: Sistem Elemanının Maliyeti ($\text{ABD\$/h}$)
CF_{el}	: Elektrolizörün Kapasite Faktörü
CF_{fc}	: Yakıt Pilinin Kapasite Faktörü
ex	: Birim Kütle için Toplam Ekserji (kJ/kg)
ex_o^{ch}	: Ölü Halde Birim Kütle için Kimyasal Ekserji Değeri (kJ/kg)
ex^k	: Birim Kütle için Kinetik Ekserji (kJ/kg)
ex^p	: Birim Kütle için Potansiyel Ekserji (kJ/kg)
ex^{ph}	: Birim Kütle için Fiziksel Ekserji (kJ/kg)
$\dot{E}x$: Toplam Ekserji Akışı (W)
$(E_c)_{H_2}$: Hidrojenin Oksidasyonu için Gereken Aktivasyon Enerjisi (kJ/kmol)
$(E_c)_{O_2}$: Oksijenin Oksidasyonu için Gereken Aktivasyon Enerjisi (kJ/kmol)
$\dot{E}x_{solar}$: Güneş Işınımının Ekserjisi (W)
$\dot{E}x^Q$: Isı Transferine Bağlı Ekserji Akışı (W)
$\dot{E}x^W$: Güce bağlı Ekserji Akışı (W)
F	: Faraday Sabiti
h	: Entalpi (kJ/kg)
h_c	: Isı transfer Katsayısı ($\text{W/m}^2\text{K}$)
h_o	: Ölü Hal için Entalpi (kJ/kg)
HHV_{H_2}	: Hidrojenin Üst Isıl Değeri (39.4 kWh/kg)
i	: Akım Yoğunluğu (A/cm^2)
i_0	: Akım Değişim Yoğunluğu (A/cm^2)

$i_{o,A}^{ref}$: Referans Anod Akım Değişim Yoğunluğu (A/cm^2)
$i_{o,C}^{ref}$: Referans Katod Akım Değişim Yoğunluğu (A/cm^2)
I_{sc}	: Kısa Devre Akımı (A)
$L_{catalyst}$: Platinyum Yükleme Miktarı ($mgPt/cm^2$)
\dot{m}	: Kütleli Debi (kg/s)
p_{H2}	: Hidrojen Gazının Kısmi Basıncı (bar)
p_{O2}	: Oksijen Gazının Kısmi Basıncı (bar)
P	: Basınç (bar)
P_o	: Ölü Halde Basınç (bar)
P_{sat}	: Doyma Basıncı (bar)
P_A	: Anod Basıncı (bar)
P_C	: Katod Basıncı (bar)
Q	: Isı kaybı (J)
\dot{Q}	: Isı transferi (W)
R	: Gaz Sabiti (kJ/kgK)
R_{ohmic}	: Membran Direnci (Ω)
s	: Entropi (kJ/kgK)
s_o	: Ölü Hal için Entropi (kJ/kgK)
S_T	: Güneş Pili Panellerinin Yüzeyine Düşen Güneş Işınımı Miktarı (W/m^2)
T	: Sıcaklık (K)
T_{cell}	: Güneş Pili Sıcaklığı (K)
T_{FC}	: Yakıt Pili Çalışma Sıcaklığı (K)
T_o	: Ölü Halde Sıcaklık (K)
T_{sun}	: Güneş Sıcaklığı (6000 K)
u_o	: Ölü Hal için İç Enerji (kJ/kg)
V	: Hacim (m^3)
$V_{hücre}$: Hücre Gerilimi (V)
V_{oc}	: Açık Devre Gerilimi (V)
W_y	: Yararlı İş (J)
\dot{W}_{net}	: Net Güç Üretimi (W)

x_{H_2}	: Hidrojenin Mol Oranı
x_{H_2O}	: Suyun Mol Oranı
x_n	: Mol Yüzdesi (%)
x_{O_2}	: Oksijenin Mol Oranı
α_A	: Anod Transfer Katsayısı
α_C	: Katod Transfer Katsayısı
ρ_{H_2}	: Hidrojenin Yoğunluğu (kg/m^3)
λ	: Hava Fazlalık Katsayısı
λ_{mem}	: Membranın Su İçeriği
σ_{mem}	: Membranın İletkenliği
ψ_B	: Akünün Ekserji Verimi (%)
ψ_{CR}	: Şarj Regülatörünün Ekserji Verimi (%)
ψ_{EL}	: Elektrolizörün Ekserji Verimi (%)
ψ_{FC}	: Yakıt Pili Sisteminin Ekserji Verimi (%)
ψ_{IN}	: İnvertörün Ekserji Verimi (%)
ψ_{PV}	: Güneş Pili Panellerinin Ekserji Verimi (%)
ζ	: Anod veya Katod Stokiyometrisi
\dot{Q}_k	: Sistem Sınırlarına “k” Çevresinden Gerçekleşen Isı Transferi (W)
$\Sigma\dot{\Gamma}$: Toplam Tersinmezlikler (W)
η	: Verim (%)
τ_{el}	: Elektrolizörün Günlük Çalışma Süresi
τ_{el}	: Yakıt Pilinin Günlük Çalışma Süresi
v	: Rüzgar Hızı (m/s)
U_{akt}	: Aktivasyon Gerilim Kaybı (V)
U_{kon}	: Konsantrasyon Gerilim Kaybı (V)
U_{ohmik}	: Ohmik Gerilim Kaybı (V)

1. GİRİŞ

1.1. Genel

Enerji, insanoğlunun dünyada daha rahat yaşayabilmesinde ve doğada karşılaştığı zorlukları aşabilmesinde temel kaynaklardan biridir. Enerji bu yönüyle, toplum ve doğa arasındaki etkileşimde vazgeçilemeyecek bir elemandır. Ancak, dünyanın birincil enerji ihtiyacının karşılanmasında büyük payı olan fosil enerji kaynaklarının üretilmesi, taşınması ve kullanımı, sağladığı avantajların yanısıra yerel ve küresel bazda her geçen gün daha açık görülebilen bazı sorunlara yol açmaktadır. Enerji kaynaklı sorunlar genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- fosil enerji kaynaklarının tükenebilir olması,
- nüfus artışı ve ekonomik gelişme sonucunda enerji ihtiyacının artması,
- jeopolitik gerilim ve anlaşmazlıklar,
- fosil enerji kaynaklarının (özellikle petrol ve doğal gaz) yükselen fiyatları,
- küresel ısınma (iklim değişikliği),
- yerel bazda hava, su ve toprak kirliliği.

Fosil enerji kaynakları rezervleri, bu kaynakların tükenebilir doğalarından dolayı, ülkelerin ekonomik gelişmesi ve nüfus artışı ile birlikte artan enerji ihtiyacı sonucunda gün geçtikçe azalmaktadır. Bu rezervlerin dünyanın belli bölgelerinde ve ülkelerinde bulunmasından dolayı ülkeler arasında egemenlik krizleri, çeşitli bölgesel ve uluslararası gerilimler ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, fosil enerji kaynaklarına sahip ülkelerin izlediği fiyat politikaları ve azalan rezerv miktarları nedeniyle özellikle doğal gaz ve petrol fiyatları artmaktadır. Bu durum ekonomi biliminin temel teorisini oluşturan arz ve talep dengesi ile bağdaşmaktadır. Çünkü, rezervlerin azalması beraberinde yüksek fiyatları getirmekte ve fiyat artış eğiliminin gelecekte de devam etmesini kaçınılmaz kılmaktadır. Tüm bunların yanı sıra, günümüzde sağlanan enerjinin yaklaşık %85'ini oluşturan fosil enerji kaynakları ekolojik ve çevresel olumsuzluklara neden olmaktadır (BP 2008, Kothari vd 2008). Bu olumsuz etkiler, yerel ve küresel ölçekte hava, su ve toprak kirliliğinin artması, insan sağlığını ve ekosistemi tehdit etmesi ile kendisini göstermektedir. Özellikle enerji kullanımı ile atmosfere salınan sera

gazları küresel ısınma çevre ve insanoğlunun yaşamını etkileyecek durumdadır. 1990'lı yıllardan itibaren meydana gelen çeşitli doğal afetler (örneğin El-Nino, Nargis kasırgaları, yaşanan kuraklıklar gibi) küresel ısınmanın sonuçları olarak kabul edilmektedir.

Yukarıda kısaca bahsedilen enerji kaynaklı sorunların çözümünde, alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesi, çevre dostu yakıtların ve yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji ihtiyacının karşılanmasındaki payının artması gerekmektedir. Bu aynı zamanda sürdürülebilir gelişmenin (gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılamasını tehlikeye atmayacak şekilde günümüz ihtiyaçlarının karşılanması) temellerinden olan güvenli ve her zaman temin edilebilir, çevresel sorunları en az olan enerji kaynakları ve yakıtların kullanılması anlamına gelmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasının artması seçeneklerden en önemlisini oluşturmaktadır. Ancak, bazı yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretiminde kullanılmasında, sistem ilk yatırım maliyetlerinin yüksekliği ve bu enerji kaynaklarının kesintili, değişken karakteristikleri olmak üzere başlıca iki temel sorunu bulunmaktadır. İlk yatırım maliyetlerinin düşmesi teknolojik gelişme ile ilişkilidir; teknolojik araştırma ve geliştirme çalışmalarının başarısı, ilk yatırım maliyetlerini etkileyecektir. Özel ve kamu sektörü tarafından yürütülecek araştırmalar, teknolojik gelişmeler için ayrılmak üzere bütçeler, bu teknolojilerin ticarileşmesinde önemli rol oynayacaktır. Bir diğer sorun ise, rüzgar ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili ve değişken karakteristiklere sahip olmasıdır. Bu yüzden, rüzgar ve güneş enerjisinin etkin kullanımı için üretilen enerjinin depolanması gerekmektedir. Bu yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi miktarı, bu kaynakların doğalarından dolayı saatlik, aylık veya mevsimsel olarak değişmektedir. Bu yüzden bir enerji taşıyıcısının (yakıt) veya depolama elemanının varlığına ihtiyaç duymaktadırlar. Hidrojen, rüzgar ve güneş enerjisinden elde edilebilmekte ve çeşitli şekillerde depolanabilmektedir. Hidrojen, bu sistemlerin elektrik üretiminde kullanılmasında karşılaşılan en büyük sorun olan, zamansal değişimlerden üretimin etkilenmesinin giderilmesinde, depolama çözümlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bunun yanı sıra, bu kaynakların coğrafik olarak farklılık göstermesi nedeniyle, güneş ve rüzgar enerjisinden üretilen enerjinin bulunduğu coğrafik bölgeden farklı bir yere taşınmasında, hidrojenin kullanılması mümkün olmaktadır.

Dünya nüfusunun %30'unun elektriksiz yaşadığı (IEA 2006) düşünüldüğünde merkezi olmayan küçük çaplı elektrik üretim sistemlerinin gerekliliği ön plana çıkmaktadır. Genellikle, rüzgar ve güneş enerjisinin kullanılmasına olanak sağlayan bu küçük çaplı elektrik üretim sistemlerinin hidrojen ile birlikte, şebekeden uzak elektriksiz konutların veya telekomünikasyon cihazları gibi çeşitli cihazların elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanmasında kullanılmasıyla kesintisiz güç üretimini olanaklı kılacaktır. Ayrıca hidrojen, çevresel sorunların aşılmasında ve sürdürülebilir yakıt arayışında önemli seçenekler arasında yer almaktadır.

1.2. Tezin Önemi

Literatür taramasından, şimdiye kadar kurulan pilot sistemler üzerine yapılan ve güneş hidrojen hibrid enerji sistemlerini inceleyen teorik çalışmaların, bu sistemlerinin önemine dikkat çektiği anlaşılmaktadır. Uzun dönemli depolama isteğinde hidrojenin kullanılması gerekmektedir. Bu sistemlerin, günümüzün en büyük enerji kaynaklı sorunu olan küresel ısınmaya yol açan sera gazlarının emisyonun azaltılmasında önemli bir rol oynayabileceği açıktır. Ancak, bu sistemler üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çabalarının artması gerekmektedir. Literatürde yer alan çalışmalardaki bulgular göz önünde bulundurulduğunda, ilk kurulan pilot sistemlerde elektrolizör ve yakıt pillerinin ticari olgunluğa ulaşmadıkları ve bu yüzden sistemlerin zayıf halkaları olarak adlandırılacakları görülmektedir. Daha sonra kurulan sistemlerde, Proton Değişim Membranlı (PEM) yakıt pillerinin kullanımının yaygınlaştığı ve elektrolizörlerin ticarileşmeye başladığı anlaşılmaktadır. Böylelikle, özellikle yakıt pilinin çalışmasında, bakım ve onarım problemleri en aza indirgenmiş, PEM yakıt pillerinin yüke hızlı cevap vermeleri, düşük çalışma sıcaklıkları nedeniyle iyileşmeler meydana gelmiştir.

Literatürde, daha sonra literatür taraması bölümünde bahsedilecek olan modelleme çalışmaları bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazılarında yıllık enerji bilançosu hesaplarının, sistemlerin kompleks olmasından dolayı bilgisayar programları ile yapıldığına rastlanmaktadır. Bu programların seçiminde, programın uygunluğu, arayüzünün anlaşılabilirliği ve farklı isteklere cevap verebilme esnekliği önemli olmaktadır. HOMER, TRNSYS, MATLAB Simulink ve Hybrid2'ye göre, arayüzünün

ve kullanımının kolaylığı, programın esnekliği sayesinde farklı kontrol stratejilerinin seçilebilmesi nedeniyle modellemede avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, program, duyarlılık ve ekonomik analiz seçeneklerinin ikisini de bünyesinde barındırmaktadır. Programa, sistem elemanlarının karakteristikleri ve özellikleri eklenebilmekte veya programdaki mevcut karakteristiklerin, meteorolojik verilerin kullanılması olanaklıdır. Enerji modellemesi ve ekonomik analiz sonuçları, farklı sistem konfigürasyonları için saatlik veriler olarak tablolar halinde alınabilmekte veya grafikler şeklinde görülebilmektedir.

1.3. Tezin Amaçları

Günümüzde yaygın olarak, enerji sistemlerinin performans analizinde kullanılan ve ekonomik analizi de içeren eksergoekonomik (termoekonomik) analizin, şimdiye kadar kurulan pilot sistemler üzerinde ve güneş hidrojen hibrid enerji sistemlerini inceleyen teorik çalışmalarda uygulanmadığı görülmektedir. Termodinamiğin ikinci yasasına ve ekonomik analize dayalı bu tür bir analizin literatürde eksikliği hissedilmektedir. Bu tez çalışmasının ana amaçları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Bir güneş-hidrojenli hibrid enerji sisteminin kurulmasının sağlanması,
- Kurulan güneş-hidrojenli hibrid enerji sistemi ile bir konutun veya konut benzeri yapının elektrik ihtiyacının karşılanması,
- Konutun veya konut benzeri yapının elektrik tesisatının elektriksel performansının analizinin yapılması,
- Sistemin enerji analizi ve elektrik ihtiyacının yıllık enerji bilançosunun ortaya çıkarılması,
 - Sistem bileşenlerinin karakteristiklerinin bulunması ve farklı parametrelerin etkilerinin incelenmesi ve tespiti.
 - Güneş pili panellerinin enerji verimlerinin ortaya çıkarılması.
 - Diğer bileşenlerin enerji verimlerinin bulunması,
 - Hidrojen üretim veriminin hesaplanması,
 - PV yolunun (Güneş pili panelleri-invertör-akü-yük) enerji veriminin bulunması,
 - Akü yolunun (Güneş pili panelleri-akü-invertör-akü-yük) enerji veriminin hesaplanması,

- Hidrojen yolunun (Güneş pili panelleri-invertör-akü-elektrolizör-depolama-yakıt pilleri-invertör-yük) enerji veriminin ortaya çıkarılmasıdır.
- Sistem ve bileşenlerinin ekserji analizinin yapılması,
 - Sistem bileşenlerine farklı parametrelerin etkilerinin termodinamiğin ikinci yasasına göre incelenmesi ve optimum parametrelerin tespiti,
 - Güneş pili panellerinin ikinci yasa verimlerinin hesaplanması,
 - Diğer bileşenlerin ikinci yasa verimlerinin bulunması,
 - Hidrojen üretiminin ikinci yasa veriminin hesaplanması,
 - PV yolu ikinci yasa veriminin hesaplanması,
 - Hidrojen yolu ikinci yasa veriminin bulunması,
 - Sistem ve bileşenlerindeki tersinmezliklerin ve muhtemel iyileştirme potansiyellerinin tespiti.
- Sistem ve bileşenlerinin eksergoekonomik analizinin yapılmasıdır.
 - Sistem bileşenlerine ekonomik analizi,
 - Güneş pili panellerinin eksergoekonomik karşılaştırılması.
 - Diğer bileşenlerin eksergoekonomik analizinin yapılması ,
 - Hidrojen üretiminin eksergoekonomik analizinin yapılması,
 - PV yolunun eksergoekonomik analizinin yapılması,
 - Akü yolunun eksergoekonomik analizinin yapılması,
 - Hidrojen yolunun eksergoekonomik analizinin yapılmasıdır.

1.4. Tezin Kapsamı

Tez, altı ana bölümden oluşmaktadır. Tezin, ilk bölümü olan “Giriş” bölümünde fosil kaynaklı yakıtların kullanımının yol açtığı sorunlardan bahsedilerek, hidrojenin bu sorunların çözümündeki yeri incelenmektedir. Hidrojenin, güneş enerjisinin çeşitli şekillerde kullanılmasıyla elde edilmesi ve bu elde edilme yöntemlerinin durumu “Giriş” bölümünde açıklanmaktadır. Ayrıca, güneş-hidrojen hibrid enerji sistemlerinin öneminden aynı bölümde bahsedilmektedir. “Giriş” bölümünün amacı, tez konusu hakkında temel bilgilerin verilmesi olmaktadır. Tez çalışmasının önemi ve amaçları yine “Giriş” bölümünde ele alınmaktadır.

Güneş-hidrojenli hibrid enerji sistemlerinin literatürdeki durumu ise ikinci bölüm halinde ve “Literatür Taraması” başlığı altında verilmektedir. Bu bölümde, şimdiye kadar kurulan güneş-hidrojenli hibrid enerji sistemleri ile ilgili bilgiler verilerek, bu sistemlerde karşılaşılan sorunlar sıralanmaktadır. Aynı zamanda, literatürde karşılaşılan teorik çalışmalar da “Literatür Taraması” bölümünde incelenmektedir.

Tezin amaçlarından biri olan Pamukkale Üniversitesi Güneş-Hidrojen Hibrid Enerji Sistemi'nin performans analizinde kullanılan ekserji ve eksergoekonomik analiz hakkında temel bilgiler ise tezin üçüncü bölümü olan “Analiz” bölümünde verilmektedir. Bu bölümde güneş-hidrojenli sistemlerinin termodinamik analiz denklemleri verilerek, ana elemanlarının enerji ve ekserji analizlerinden bahsedilmektedir. Bunun yanı sıra, bu sistemlerin eksergoekonomik analizi bu bölümde incelenmektedir.

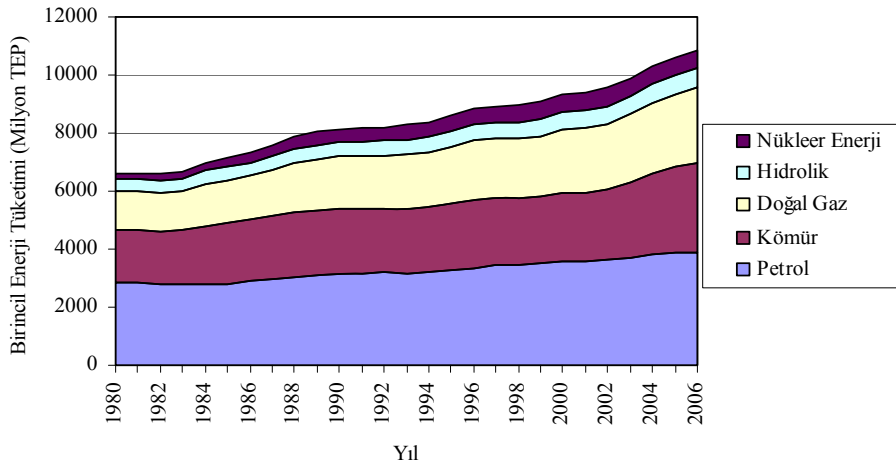
Tezin dördüncü bölümü ise “Pamukkale Üniversitesi Güneş-Hidrojenli Enerji Sistemi” başlığını taşımaktadır. Bu bölümde, Pamukkale Üniversitesi'nde kurulan güneş-hidrojenli sistemin ana bileşenlerinin seçimi yapılmaktadır. Ayrıca, sistemin ve ana bileşenlerinin tanıtımı yapılarak, sistemin özellikleri açıklanmaktadır. Kurulan güneş-hidrojenli hibrid enerji sisteminin enerji yolları tanımlanarak, her bir enerji yolunun elektriksel performans analizi, farklı cihazlar kullanılarak yapılmıştır ve bu bölümde elde edilen sonuçlardan bahsedilmektedir.

Beşinci bölümde, daha önceki bölümde bahsedilen enerji, ekserji ve eksergoekonomik analiz yöntemleri Pamukkale Üniversitesi Güneş-Hidrojen Hibrid Enerji Üretim Sistemi'ne uygulanmaktadır. Bu amaçla, sistemin enerji modellemesinde HOMER bilgisayar yazılımı kullanılarak, yıllık enerji bilançosu oluşturulmuştur. Bilgisayar yazılımı ile elde edilen enerji bilançosu yardımıyla ve elde edilen sistem karakteristikleri yardımıyla sistemin yıllık ekserji bilançosu hesaplanmıştır. Sistemin enerji yollarında ve toplam sistemde meydana gelen ekserji yıkımlarının paylarından bu bölümde bahsedilmektedir. Ayrıca sistemin ve sistem bileşenlerinin iyileştirme potansiyelleri hesaplanmıştır. Sistemin ekonomik analizi bu bölümde yapılarak, eksergoekonomik analiz ile sistemin ekserji maliyetleri elde edilmiştir.

Altıncı ve son bölüm olan “Sonuçlar ve Öneriler” kısmında yapılan kurulan sistem ve yapılan analizler ile ilgili genel sonuçlar verilmektedir. Ayrıca, daha sonraki yapılacak çalışmalar için öneriler bu bölüm içerisinde sunulmaktadır.

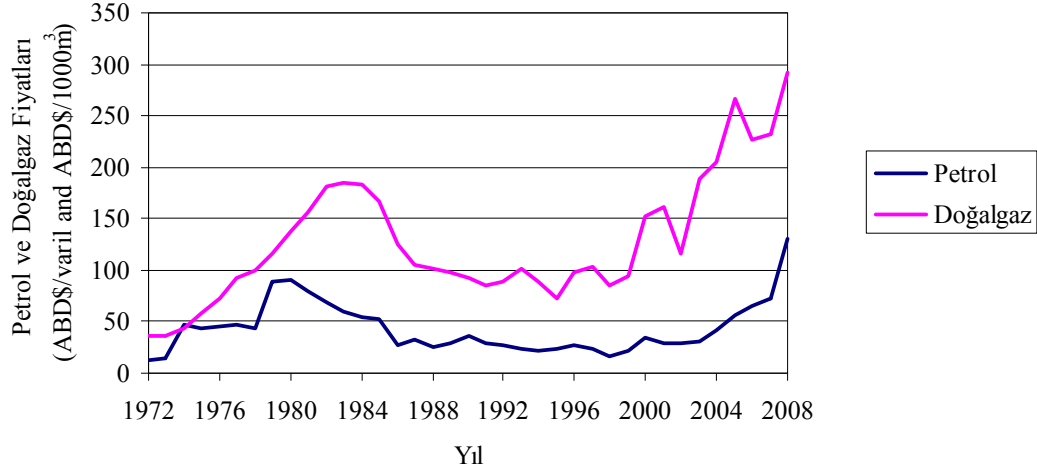
1.5. Fosil Enerji Kaynaklarının Kullanımı ve Küresel Isınma

Artan nüfus, gelişen teknoloji, hayat standartlarındaki iyileşmeler ve gelişmekte olan ülkelerin enerji tüketiminin artmasıyla, 2006 yılında dünya toplam birincil enerji kaynaklarının tüketimi 10.9 milyar TEP (Ton Eşdeğer Petrol) seviyesine çıkmıştır. 1965 yılında bu değer 3.8 milyar TEP olduğu göz önüne alınırsa birincil enerji kaynağı ihtiyacının, 41 yıllık süre içerisinde 2.87 kat arttığı söylenebilir (BP 2008). Dünya birincil enerji kaynaklarının tüketiminin 1980 ve 2006 yılları arasında kaynaklara göre dağılımı Şekil 1.1’de gösterilmektedir. 2006 yılında, birincil enerji kaynaklarının tüketiminin kaynaklara göre yüzdesel dağılımında en büyük pay %36 ile petrolün, daha sonra %28 ile kömürün olmaktadır. Doğal gaz ve nükleer enerjinin payları sırasıyla %24 ve %6 civarlarındadır. Şekilden de görüldüğü gibi, dünya birincil enerji kullanımında fosil enerji kaynaklarının payı %88 civarındadır. Bu rakama nükleer enerji eklendiğinde tükenbilir enerjilerin oranı %94’e çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından sadece hidrolik enerji %6 pay sahibi olabilmektedir. Güneş, rüzgar, jeotermal gibi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının oranı ihmal edilebilecek kadar küçüktür.



Şekil 1.1 Dünya birincil enerji kaynaklarının tüketiminin 1980 ve 2006 yılları arasında kaynaklara göre dağılımı (BP 2008).

Bu tüketimin gelecekte de 2006 yılı oranlarında devam edeceği düşünülse bile, mevcut rezervlere yenileri eklenmediği takdirde, petrolün 40.5 yıl, doğal gazın 63.3 yıl ve kömürün 147 yıl sonra tükenebileceği görülmektedir (BP 2008, EIA 2008). Ayrıca, petrol ve doğal gazın fiyatlarını sürekli değişebilmekte ve eğilim genelde artış yönünde olmaktadır. Şekil 1.2’de petrol ve doğal gaz fiyatlarının 2008 yılı değerlerine göre üretim maliyetleri 1972 yılından itibaren yer almaktadır.



Şekil 1.2 1972 ile 2008 (Mayıs) ayları arasında petrol ve doğal gazın kuyubaşı fiyatları (BP 2008, EIA 2008, WEB_1 2008).

Özellikle 2008 yılı içerisinde, her iki kaynağın fiyatlarının tarihlerinin en yüksek fiyatlarına ulaştığı; petrolün 2008 Mayıs ayındaki fiyatının 130 ABD\$/varil, doğal gazın 2008 Mayıs ayındaki fiyatının 292 ABD\$/1000m³ seviyesinde olduğu görülmektedir. 2008 yılındaki artış bir önceki yıl olan 2007 yılına göre petrolde %79.8, doğal gazda %26.4 civarında gerçekleşmiştir. İki temel sebeple fiyat artışı gerçekleşmiş olabilir:

- Bu kaynakların tükenbilir yapısı fiyat artışını tetikleyebilmektedir. Bu fikir, ekonomi biliminin temel argümanı olan “artan talep, azalan arz, bir malın fiyatının yükselmesine sebep olur” ilkesine dayanır.
- Petrol ve doğal gaz kaynaklarına sahip olan ülkelerin izledikleri fiyat politikaları hızlı artışı sağlamış olabilir.

Bu iki neden, birbirleriyle etkileşimde oldukları için doğrudur. Fosil kaynakların tükenbilir doğaları ve buldukları ülkelerin siyasi durumlarına göre fiyat

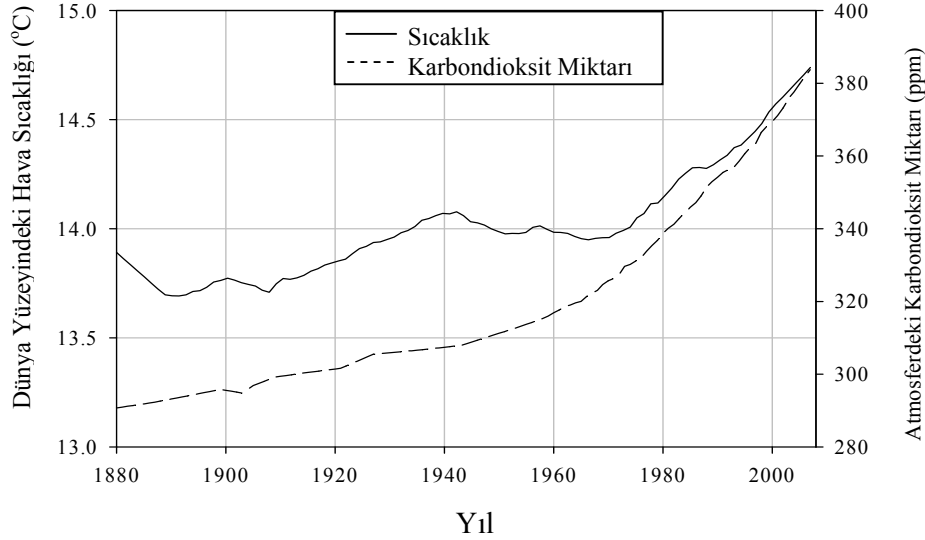
politikalarının değişmesi, uzun ve kısa vadeli fiyat dalgalanmalarına yol açmaktadır. 2008 yılında yaşanan anormal fiyat artışlarında, özellikle petrol söz konusu olduğunda, ihracatçı ülkelerin payı büyüktür. Ancak, gelecekte, yeni rezervler eklense bile, fosil kaynakların azalmasının fiyat artışındaki payının artması kaçınılmazdır.

Şekil 1.2’de tarih olarak 1972 yılının başlangıç olarak seçilmesinin sebebi 1973 ve 1978 yıllarında petrol fiyatlarının artışını göstermektir. Dünyanın sanayi devriminden bu yana yaşadığı bu iki büyük enerji bunalımı deneyimi, son yıllarda yaşanan fiyat artışının sonucunda dünyayı yeni bir enerji bunalımının beklediğini işaret etmektedir.

Fosil enerji kaynaklarının yarattığı problemler sadece bununla sınırlı değildir. Aynı zamanda bu yakıtların kullanımı sırasında, yanma tepkimesi sonucu, doğaya çeşitli gazlar ve hava kirletici partiküller salınmaktadır. Özellikle 1990’lı yıllardan itibaren insan kaynaklı gazların ve hava kirletici partiküllerin çevresel etkileri gözle görülür hale gelmiştir. Ayrıca bu gazlar küresel çapta büyük felaketlerin tetikleyicisi olmuşlardır. Bu gazlar, dünya yüzeyine yakın hava sıcaklığının değişmesine yol açan sera gazı emisyonları olarak adlandırılmaktadır. Bu gazların en önemlileri su buharı, karbon dioksit (CO₂), metan (CH₄), nitroz oksit (N₂O), kloroflorokarbonlar (CFC) ve halonlar (HCFC ve HFC) olarak sıralanabilir. Bu gazlar nedeniyle dünya yüzeyine yakın hava sıcaklığı değişmektedir ve sera etkileri yaratmaları nedeniyle güneş ışımınının bir kısmının atmosferde hapsedmekte ve küresel ısınmaya yol açmaktadır (Christianson 1999). Su buharı, küresel ısınmanın başlıca aktörlerinden olan bir sera gazıdır. Su buharı, sera gazı etkisinin yaklaşık %36-70’ını, CO₂ %9-26’sını, CH₄ %4-9’ını oluşturmaktadır (WEB_2 2008). Su buharının, etkisi büyük olmasına rağmen doğal süreçte üretildiğinden insan kaynaklı (antrophogenic) su buharı salınımı oldukça azdır ve CO₂ gibi diğer sera gazlarının salınımı su buharı oluşumunda etkilidir. Ayrıca su buharının, atmosferde kalma süresi bir kaç gün veya hafta ile sınırlıdır. Ancak, insan kaynaklı sera gazı emisyonları içinde CO₂’in etkisi oldukça büyüktür (Dincer 2002a).

Şekil 1.3’te sanayi devrimi başlangıcından 2007 yılına kadar olan dünya yüzey sıcaklığı değişimi ve atmosferdeki CO₂ miktarının benzer eğilim gösterdikleri görülebilir. 1880’li yıllarda 285 ppm civarında olan CO₂ miktarı, 2007 yılında 385 ppm sınırını aşmıştır. Sera gazlarının, dünyanın yüzeyindeki hava sıcaklığını 0.8°C arttırdığı hesaplanmaktadır. Sera gazlarının artışı ve sonucundaki sıcaklık artışı, küresel ısınmaya

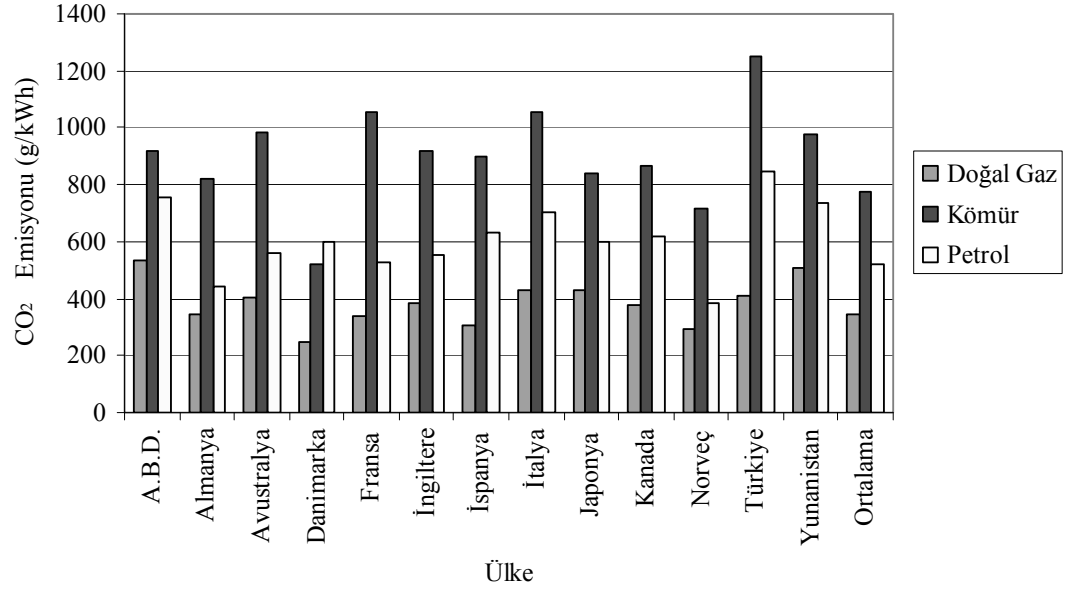
(iklim değişikliği) yol açarak daha sıcak yaz ve kışlara, sel baskınlarına, kuraklığa ve doğal afetlere yol açmaktadır. Ayrıca, sera gazları ve hava kirletici partiküllerin sosyal etkisi tam olarak bilinmemektedir. Özellikle sağlık harcamalarını arttırdığı bilinmekte, fakat kesin rakam verilememektedir. Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) yaptığı bir araştırmaya göre sera gazlarının artışı 1990 yılından 2000 yılına kadar yaklaşık 150000 kişinin ölümünde etkili olmuştur (Markandya ve Wilkinson 2007).



Şekil 1.3 Dünya yüzündeki hava sıcaklığının ve atmosferdeki karbondioksit miktarının 1880-2007 yılları arasında değişimi (EPI 2001, Loa 2008, NASA 2008).

Şekil 1.3'te görülen atmosferdeki CO₂ miktarının artmasında bitki ve hayvanların gaz emisyonları gibi doğal süreçlerin etkisinin yanı sıra, bu miktarın yarısının insan kaynaklı (toprak kullanımı, ormanların tahribi, enerji üretimi ve tüketimi vs.) olduğu tahmin edilmektedir (Dincer 2002a). İnsan kaynaklı CO₂ emisyonunun yaklaşık %40'lık kısmı fosil kaynaklı yakıtların yanması sonucu oluşturmaktadır. Elektrik üretimi ile atmosfere 7.7 milyar ton CO₂ salınmaktadır ve toplam fosil kaynaklı CO₂ emisyonu içindeki payı %35 civarındadır (Sims vd 2003, WEB_1 2008). Şekil 1.4'te Annex I ülkeleri olarak adlandırılan bazı gelişmiş ülkeler ile Türkiye'nin 1 kWh elektrik üretimleri sırasında kullanılan petrol, kömür ve doğal gaz sonucu atmosfere saldıkları CO₂ miktarları verilmektedir. Şekilden emisyon miktarlarının ülkeden ülkeye değişiklik gösterdiği görülmektedir. Bunun temel sebepleri kullanılan yakıtların ısıl kaliteleri ve termik santrallerin verimliliği olmaktadır. Şekilde ayrıca Annex I ülkelerinin birim elektrik enerjisi üretimi başına emisyon değerlerinin ortalamaları da yer almaktadır.

Buna göre petrol, doğal gaz ve kömür santralleri ile üretilen ortalama CO₂ emisyonu miktarlarının sırasıyla 518.3 g CO₂/kWh, 345.2 g CO₂/kWh ve 776.6 g CO₂/kWh olduğu görülebilir.



Şekil 1.4 Bazı ülkelerin fosil enerji kaynaklarının kullanımı sonucunda elde ettikleri birim elektrik enerjisi başına atmosfere saldıkları karbondioksit miktarları (IEA 2002).

1997 yılının Aralık ayında, Birleşmiş Milletler üyesi 160 ülkenin katılımı ile Kyoto'da (Japonya), küresel ısınmaya karşı alınması gereken tedbirlerden sera gazı ve özellikle CO₂ emisyonları miktarlarını düşürmek amacıyla bir zirve yapılmıştır. Bu zirvede, Annex I ülkeleri olarak nitelendirilen gelişmiş ülkeler önderliğinde "Kyoto Protokolü" oluşturularak, 2008-2012 yılları arasında emisyon oranlarının 1990 yılı değerlerinin en az %5 altına düşürülmesi gerektiği kararlaştırılmıştır. Avrupa Birliği, Japonya ve ABD için azaltma hedefleri ise sırasıyla %7, %6 ve %8 olarak belirlenmiştir (Della ve Rand 2001).

Farklı yöntemler kullanılarak CO₂ emisyonu miktarları düşürülebilir, bu yöntemler aşağıda sıralanmıştır:

- *Fosil yakıtların dönüşüm verimlerinin artması:* Dünyadaki elektrik santrallerinin ortalama enerji verimleri %30 civarındadır. Uzun dönemde, teknolojik

gelişmeler sonucu bu santrallerin enerji verimlerinin %60 civarına ulaşması hedeflenmektedir (Sims vd 2003).

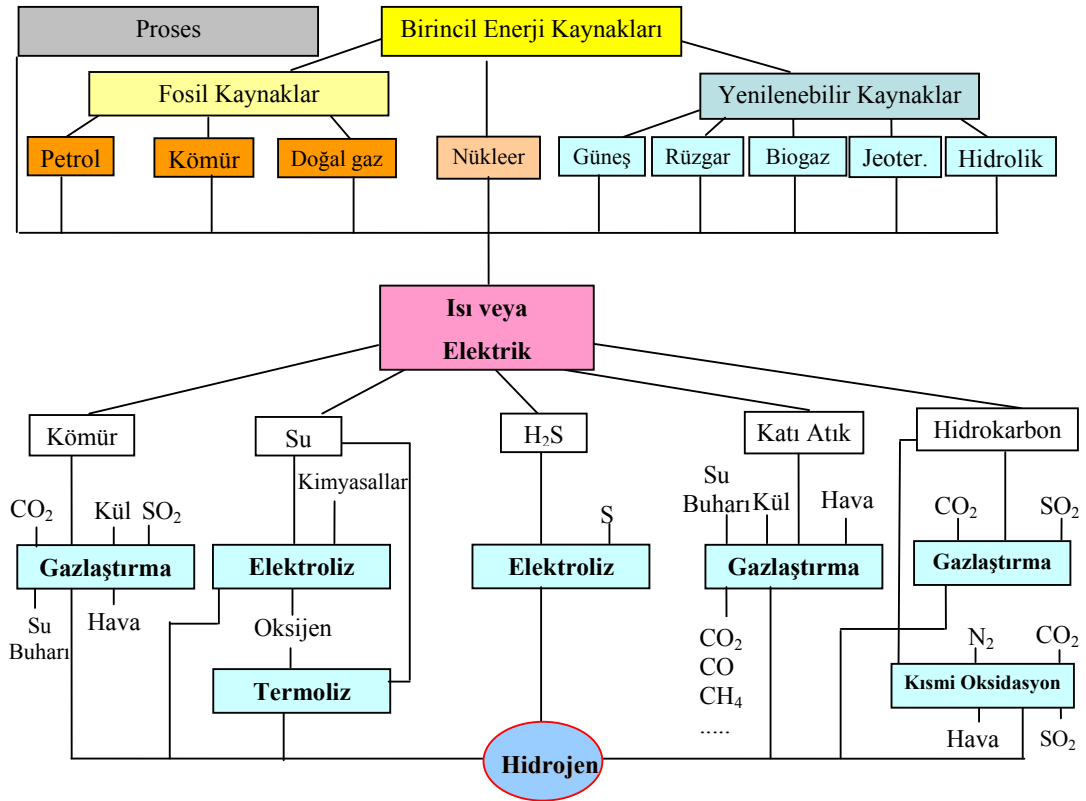
- *Düşük karbon oranına sahip fosil yakıtların kullanımı*: Özellikle kömür ve petrol türevli kaynaklar yerine doğal gazın kullanılması, birleşik gaz türbinleri kullanılması daha düşük CO₂ emisyonları sağlayabilecektir.
- *Fosil yakıtların ve baca gazlarının dekarbonizasyonu, karbondioksit uzaklaştırma mekanizmaları*: Elektrik üretiminden önce, hammadde halindeki fosil yakıtların dekarbonizasyonu ve böylece hidrojen oranı yüksek yakıtlar elde edilerek bu ikincil yakıtların kullanımı sağlanabilir. Yanma sonucu oluşan baca gazlarının dekarbonizasyonu ise başka bir yöntemdir. Uzaklaştırılan karbondioksitin jeolojik zaman dilimleri dikkate alınarak toprak altındaki tükenmiş doğal gaz rezervlerinde saklanması sağlanabilir.
- *Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artması*: Artan enerji ihtiyacının bir kısmının yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile karşılanması ve varolan kullanım değerlerinin artması sağlanması başka bir seçenektir. Uzun dönemde yeni teknolojilerin gelişmesi ve fiyatlarının düşmesi beklentisi bu kaynakları önemli hale getirecektir.

1.6. Hidrojenin Güneş Enerjisinden Elde Edilmesi ve Kullanılması

Daha önceki kısımlarda bahsedilen küresel ısınmanın nedenlerinden olan karbondioksit ve diğer sera gazlarının, çevresel sorunlara yol açan hava kirletici partiküllerin (CO, NO_x, SO₂ ve diğer partiküller) emisyon miktarlarının azaltılmasında gerekmektedir. Bunun yanı sıra, enerjinin her zaman ulaşılabilir ve yerel olması istenmektedir. Aksi halde, enerji fiyatlarının politik süreçlerden etkilenmesi kaçınılmazdır. Ayrıca yerel enerji üretimi kayıpları da azaltılmaktadır. Bu sorunların çözümünde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artması beklenmektedir.

Hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak kullanılması fikri 1970’li yılların ilk yarısında dünyanın gündeminde yer almaya başlamıştır ve “hidrojen ekonomisi” kavramı ortaya çıkmıştır. Hidrojen ekonomisi, hidrojenin enerji yapısı içinde daha fazla kullanılması anlamına gelmektedir. Hidrojen, çevre dostu ve sürdürülebilir bir yakıt olarak ön plana çıkmaktadır (Midilli ve Dincer 2007). Uygun üretim yöntemleriyle yenilenebilir enerji

kaynaklarından üretilmesi ve hidrojenin kimyasal enerjisini elektrik enerjisine doğrudan dönüştüren yakıt pillerinde kullanılmasıyla yan ürün olarak su ve oluşan tepkime ile ısı açığa çıkmaktadır. Bu yüzden hidrojen, CO₂ emisyonlarının azaltılmasında uygun bir yakıttır. Kullanılan yakıt pili tipine göre atmosfer NO_x emisyonu gerçekleşse de bu miktar ihmal edilecek kadar azdır (Larminie ve Dicks 2003). Hidrojen, Şekil 1.5'te gösterildiği gibi farklı yöntemler kullanılarak yenilenebilir enerji kaynaklarının yanısıra diğer birincil enerji kaynaklarından da üretilebilmektedir.



Şekil 1.5 Hidrojenin birincil enerji kaynaklarından üretilme yöntemleri.

Şekilden de görülebileceği gibi üç farklı birincil enerji kaynağı türü hidrojen üretiminde kullanılmaktadır. Bunlar fosil enerji kaynakları, nükleer (fizyon ve füzyon reaktörleri) ve yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Günümüzde hidrojen kimyasal hammadde olarak gübre sanayisinde (amonyak üretiminde) ve petrol endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Hidrojenin, yaklaşık %99'u fosil enerji kaynaklarından, özellikle doğal gazın gazlaştırılmasından elde edilmektedir. Yıllık üretim olan, 50 milyon ton (45 milyar kg) hidrojen üretimi yaklaşık dünya enerji ihtiyacının %2'sine karşılık gelmektedir (Midilli ve Dincer 2007).

Kısa dönemde, yakıt olarak hidrojen üretiminin yine fosil enerji kaynaklarından olması beklenmektedir. Ancak, fosil enerji kaynaklarından hidrojen üretiminde CO₂ emisyonları Tablo 1.2'deki üretim reaksiyonlarında gösterildiği gibi yine gerçekleşecektir. Tabloda karşılaştırma amacıyla hidrojen üretim yöntemlerinden doğal gazın (su buharı ile gazlaştırma) ve kömürün gazlaştırması, benzinin (oktan) kısmi oksidasyonu reaksiyonları verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi fosil yakıtların hidrojen üretiminde kullanılması CO₂ emisyonlarında azalma meydana getirirse de bu azalmanın fazla olmadığı anlaşılmaktadır (Bkz Şekil 1.4). Bu yüzden, uzun dönemde teknolojik gelişmeye bağlı olarak verimlerinin artışı ve fiyatlarının düşmesi beklentisi ile hidrojen üretiminin yenilenebilir enerji kaynaklarından ve çevresel sorunlara yol açmayan yöntemlerle gerçekleşmesi planlanmaktadır.

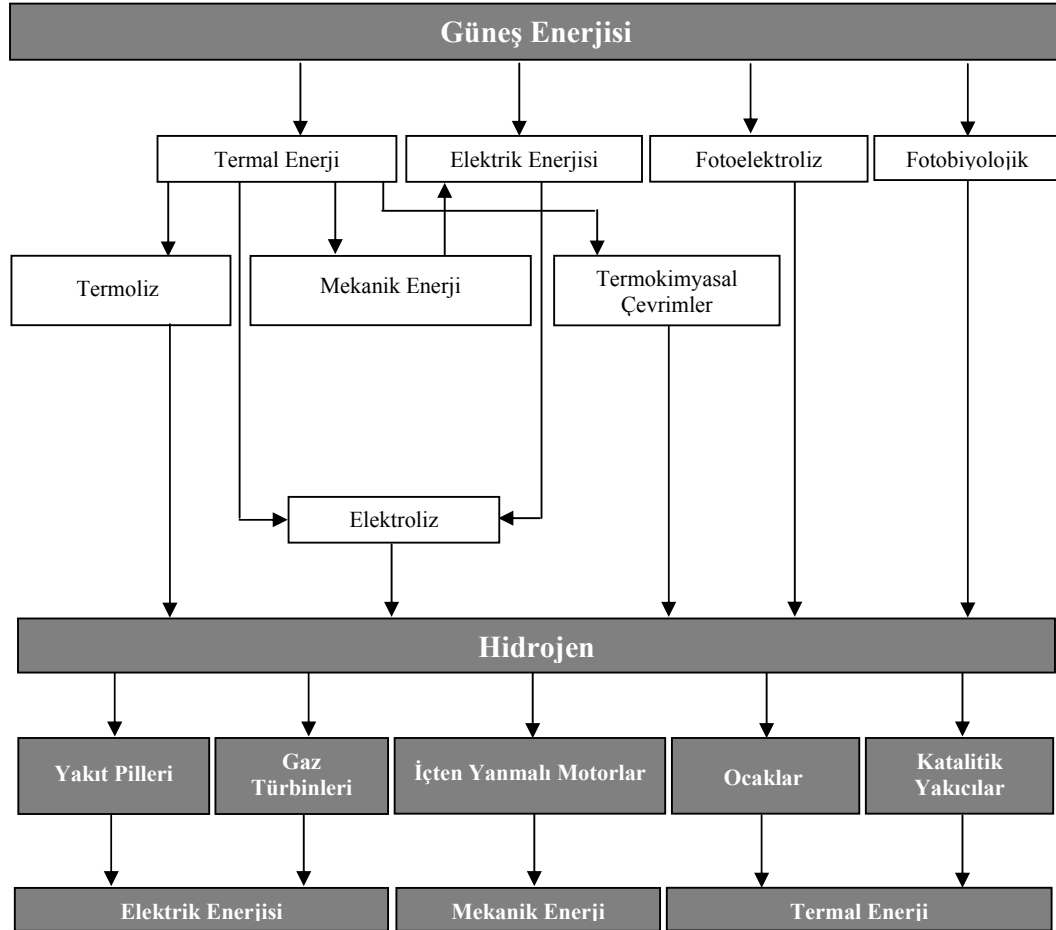
Tablo 1.2 Hidrojenin fosil enerji kaynaklarından üretimi ve gerçekleşen CO₂ emisyon miktarları (Kothari vd 2008).

<i>Proses ve Yakıt</i>	<i>Reaksiyon</i>	<i>H₂, H₂O oranı (%)</i>	<i>CO₂/H₂ (Nm³/Nm³)</i>	<i>g CO₂/kWh H₂ (HHV ve %75 proses verimine göre)</i>
Gazlaştırma				
<i>Doğal Gaz</i>	$CH_4 + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 4H_2$	50.0	0.25	186.04
<i>Kömür</i>	$CH_{0.8} + 0.6H_2O + 0.7O_2 \rightarrow CO_2 + H_2$	70.0	1.00	744.41
Hidrokarbonların kısmi oksidasyonu				
<i>Benzin</i>	$2C_8H_{18} + H_2O + 23/2 O_2 \rightarrow 8CO + 8CO_2 + 19H_2$	5.3	0.42	313.45

1.6.1. Güneş enerjisinden hidrojen elde etme yöntemleri

Güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelmektedir. Ancak, güneş enerjisinin kesintili olması üretilen enerjinin depolanmasını gerektirmektedir. Bu sorunun aşılmasında enerjinin aktarılacağı bir enerji taşıyıcısına ihtiyaç vardır. Bu yüzden, güneş enerjisi üzerine yapılan araştırmalardan başlıcası bir “güneş yakıtı” geliştirme prosesidir. Hidrojen, yüksek kütleli enerji yoğunluğu, çevresel etkilerinin

çok az olması, depolanabilmesi ve taşınabilmesi nedeniyle en büyük “güneş yakıtı” adaylarından biri olarak kabul edilmektedir (Momirlan ve Veziroğlu 1999, Momirlan ve Veziroğlu 2001, Midilli vd 2005). Hidrojen, güneş enerjisinden Şekil 1.6’da gösterilen yöntemlerle üretilebilmektedir.



Şekil 1.6 Güneş enerjisinden hidrojen üretim yöntemleri ve hidrojenin kullanım yolları.

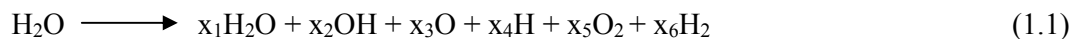
Şekil 1.6’da görülen üretim yöntemlerinden bazıları ticari olgunluğa ulaşmıştır, bazıları ise hâlâ laboratuvar ölçeğinde ve araştırma-geliştirme çalışmalarına ihtiyaç duymaktadır. Şekilde ayrıca güneş enerjisinden üretilen hidrojenin farklı kullanım yolları gösterilmiştir. Üretilen hidrojen, termal uygulamalarda ısı, gaz türbinlerinde elektrik üretimi amacıyla veya içten yanmalı motorlarda ulaşımda yararlanılmak amacıyla kullanılabilir. Hidrojen, içten yanmalı motorların verimlerinin %20 civarında arttırmasını sağlayabilmektedir (Sherif vd 2005). Hidrojenin gaz türbinlerinde ve jet motorlarında kullanılması ise jet yakıtı ile aynı şekildedir. Hidrojenin gaz türbinlerinde

kullanımı, sedimentlerin oluşumunu engellemekte, türbin kanatlarındaki korozyonu önleyerek türbin ömrünü arttırmakta ve bakım sorunlarını azaltmaktadır. Buna ilaveten, gaz giriş sıcaklığının normal gaz türbini sıcaklığı olan 800°C'nin üzerine çıkmasını sağlayarak toplam verimi arttırmaktadır (Norbeck 1996). Gaz türbinlerinde ve jet motorlarında hidrojenin kullanılmasıyla atmosfere salınan tek kirletici NO_x olmaktadır. Hidrojen ayrıca, geleneksel ocaklarda kullanılabilir. Aslında hidrojen doğal gazın kullanılmaya başlanmasından önce "town gaz" olarak Avrupa'da kullanılmıştır. Ayrıca katalitik yakıcılarda kullanılmasıyla ısıtma ve pişirme uygulamalarında hidrojenden yararlanmak mümkün olabilmektedir. Almanya'da bulunan Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems hidrojenin katalitik yakıcılarda kullanılmasını sağlayan sistemler geliştirmiştir (Goetzberger 1993).

Hidrojenin elektrik üretiminde en verimli kullanılmasını ve hidrojene ilgi duyulmasını sağlayan en önemli cihazlar yakıt pilleri olmaktadır. Yakıt pilleri sayesinde farklı kapasitelerde elektrik üretimi ve hidrojenin verimli bir şekilde taşıtlarda kullanımı mümkün olmaktadır. Yakıt pilleri, yanmadan kaynaklanan verimsizliklerin olmaması nedeniyle geleneksel ısı makinelerinin verimlerinin iki katı kadar teorik verime (%83'e karşı %32-40) sahiptir. Bunun nedeni yakıt pillerinin Carnot verimi tarafından sınırlanmamalarıdır. Bunun yanı sıra yakıt pilleri hareketli parçalara sahip değildir, çalışmaları sırasında çok fazla bakım gerektirmezler ve tehlikeli emisyon gazları üretmezler (Barbir 2005). Diğer önemli avantajları ise değişken güç ihtiyacını karşılayabilecek esnekliğe sahip olmaları, modüler yapıları ve düşük gürültü seviyeleridir (Friberg 1993). Bu nedenlerle günümüzde yakıt pili teknolojilerine ve araştırma çalışmalarına büyük önem verilmektedir.

1.6.1.1. Termal yöntemlerle hidrojen üretilmesi

Güneş enerjisinden termal yöntemlerle 4 farklı şekilde hidrojen üretilmektedir. Hidrojen, suyun termolizi (termal ayrışma) güneş enerjisinden elde edilen ısı yardımıyla gerçekleştirilebilir. Termoliz prosesi, Denklem 1.1'de gösterildiği gibi tam bir bileşenlerine ayırma reaksiyonu olmamaktadır. Reaksiyon sıcaklığına ve basıncına bağlıdır (Ihara 1979):



Suyun düşük ayrışma hızlarında, oksijenin ve hidrojenin tekrar ters reaksiyonla suyu oluşturabilmeleri meydana gelebilmektedir. Bu yüzden, bu yöntem enerji yoğun bir proses olan yüksek sıcaklıkta oksijen-hidrojen ayırmayı ve pahalı membran teknolojilerini gerektirir. Suyun termolizi, iyi bir derecede ayırıştırma için oldukça yüksek sıcaklıklara (>2200 K) ihtiyaç duymaktadır. Tüm bu sorunlar yüzünden yakın gelecekte teknik ve ekonomik başarıya ulaşması zor görünmektedir (Steinfeld 2002, Agrafiotis vd 2005, Agrafiotis vd 2007). Bir diğer sorun da, prosesin yüksek sıcaklıklara dayanabilecek malzemelere ihtiyaç duymasındır (Ohya 2002). Termoliz prosesi, literatürdeki çeşitli çalışmalarda termodinamik (Ihara 1979), ekonomik (Baykara ve Bilgen 1989) ve deneysel olarak laboratuvar ölçeklerinde (Bilgen vd 1989, Kogan 1998) incelenmiştir. Isı geri kazanımı gibi yöntemlerle prosesin verimi arttırılmaya çalışılsa da verimleri halen oldukça düşüktür (Baykara 2004, Agrafiotis vd 2007). Günümüzde, ticari boyuta ulaşmış veya pilot proje olarak yapılmış herhangi bir güneş termoliz sistemi mevcut değildir.

Hidrojenin, güneş enerjisinden bir diğer elde edilme yöntemi ise güneş enerjisinden dolaylı yollarla elektrik üretiminde kullanılan güneş termal elektrik santralleri ile olmaktadır. Bu yöntemde, büyük ölçekteki güneş toplayıcı sistemleri (çanak, parabolik oluk ve güneş kuleleri) kullanılmaktadır. Bu tip güneş toplayıcı sistemlerinde ısı transfer akışkanı olarak genellikle hava, su, sodyum veya erimiş tuz çözeltileri seçilmektedir. Daha sonra, bu ısı transfer akışkanı klasik enerji çevrimlerinde (Rankine, Brayton, Stirling) kullanılmaktadır. Sonuç olarak, bu sistemlerde güneşin ısı enerjisi ilk önce bu çevrimler ile mekanik enerjiye, ardından elektrik enerjisine çevrilmektedir. Üretilen elektrik enerjisi suyun elektrolizinde kullanılarak hidrojen elde edilmesinde kullanılabilir. Teorik olarak yapılan çalışmalarda, güneş termal elektrik santralleri ve alkali elektrolizörlerin kullanılmasıyla hidrojen dönüşüm veriminin %20'lere ulaşabildiği görülmektedir (Luzzi vd 2004). Güneş enerjisinden yine yukarıda belirtilen güneş toplayıcı sistemler sayesinde kazanılan ısı kullanılarak, suyun doğrudan yüksek sıcaklık elektrolizörlerinde kullanılması mümkündür. Yüksek sıcaklık elektrolizörleri ile ilgili çalışmalar halen devam etmektedir.

Bir diğer yöntem ise, yine güneş toplayıcı sistemler kullanılarak fosil yakıtların termal parçalanmasının sağlanması ile hidrojenin elde edilmesidir. Bu yolla doğal gazın gazlaştırması veya termal parçalanması ve diğer hidrokarbonların yüksek sıcaklıklarda

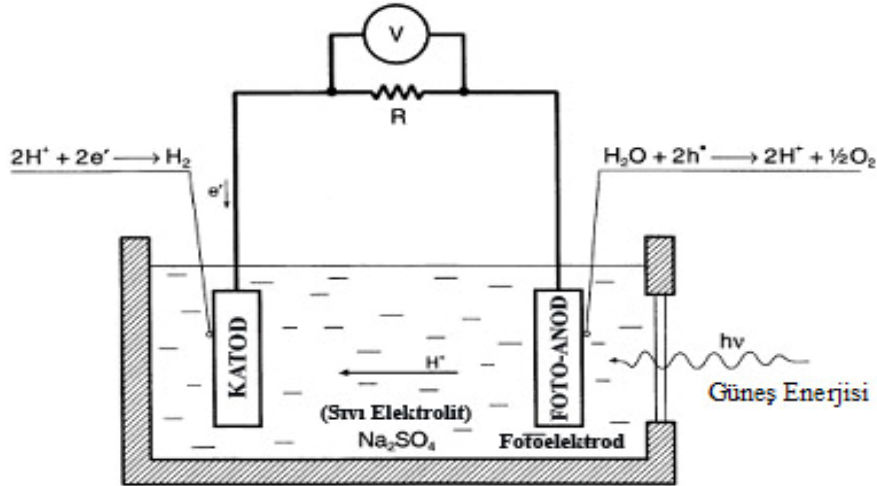
termal parçalanması gerçekleştirilebilmektedir (Agrafiotis vd 2007). Ancak güneş toplayıcı sistemlerinin de gelişme aşamasında olmasından dolayı bu yöntem hala araştırma-geliştirme ve terörük inceleme aşamasındadır (Steinfeld 2005).

1.6.1.2. Doğrudan elektrik elde edilerek suyun elektrolizi ve hidrojen üretilmesi

Güneş enerjisinin, fotovoltaik hücrelerde (güneş pili, PV) doğrudan elektrik enerjisine çevrilmesi ve bu enerjinin suyun elektrolizinde kullanılarak hidrojenin elde edilmesi bir diğer yöntemdir. PV hücrelerin sağladığı akımın suyun elektrolizi işleminde kullanılmasına dayanmaktadır. Günümüzde PV panellerinin teknolojisi yıldan yıla gelişmekte ve verimleri artmaktadır. Elektroliz yöntemi, Faraday'ın deneysel olarak suyun ayrışmasını gösterdiği 1800'lü yıllardan bu yana bilinen ve halen üzerinde çalışılan bir teknolojidir. Son yıllarda, suyun elektroliz işlemini yapan, kompakt yapıya sahip elektrolizörler ticarileşmeye başlamıştır. Çevresel etkilerinin az olması ve ileride daha ekonomik hale gelmesinin tahmin edilmesi nedeniyle oldukça önemli bir yöntemdir. Modern elektrolizörlerin verimleri %80'e kadar çıkmaktadır, aynı şekilde PV panellerinin verimleri %20-25 olabilmektedir. Sonuç olarak, doğrudan bağlantının yapıldığı küçük sistemlerde hidrojen dönüşüm verimi %16 civarlarında gerçekleşmektedir (Rzayeva vd 2001). Bu tezin esas konusunu oluşturduğu için ileriki bölümlerde daha detaylı incelenmiştir.

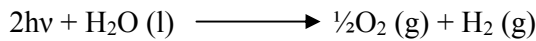
1.6.1.3. Fotoelektroliz yöntemi ile hidrojen üretilmesi

Suyun fotoelektrolizi, güneş enerjisinden temiz ve depolanabilir hidrojen elde edilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Fotoelektroliz yönteminde, fotoelektrokimyasal ışınım toplama sistemleri (fotoelektrokimyasal hücre) suyun elektrolizinde gereken enerjiyi sağlamaktadır. Şekil 1.7'de Fujishima ve Honda (1972) tarafından tasarlanan bir fotoelektrokimyasal hücrenin çalışma prensibi şematik olarak gösterilmiştir. Fuji ve Honda'nın bu tasarımından sonra konuya olan ilgi artmaya başlamıştır.



Şekil 1.7 Fotoelektrokimyasal hücrenin şematik görünümü (Fujishima ve Honda 1972).

Fotoelektrokimyasal hücre, güneş ışınimleri sıvı elektrolit içinde bulunan yarıiletken fotoelektrodun üzerine düştüğünde suyun elektrolizi için gerekli voltajı sağlamaktadır. Diğer elektrod genellikle metal malzemedir (Nowotny vd 2005). Yarıiletkenin enerji aralığından daha yüksek enerjiye sahip fotonlar yarıiletken tarafından emilerek, elektron-boşluk çifti oluşturmakta ve yarıiletken-elektrolit arasındaki şarj bölgesinde meydana gelen elektrik alanı ile suyun ayrışması gerçekleşmektedir. Aşağıdaki reaksiyon işlemi sırasında oluşmaktadır:



burada h , Planck sabiti ve ν , frekanstır.

Fotoelektroliz yönteminde, güneş enerjisi emilimi ve suyun elektrolizi, tek bir fotoelektrod sayesinde gerçekleşmektedir. Böylece elektrik üretimi ve elektroliz için iki ayrı cihaz gereksinimini ortadan kaldırmış olmaktadır (Yamada vd 2003). Literatürde, çeşitli konfigürasyonlarda fotoelektrokimyasal hücreler tanımlanmaktadır. Bunlar tek fotoelektrod (Fujishima ve Honda 1972), bi-fotoelektrod (Nozik 1976), hibrid fotoelektrod (Morisaki 1976, O'Regan ve Grätzel 1991) ve duyarlı fotoelektrod (El Zayat vd 1998) şeklinde fotoelektrod tipine göre değişkenlik göstermektedir. Suyun fotoelektrolizinin enerji dönüşüm verimi, fotoelektrod malzemesinin özelliklerine göre belirlenmektedir (Bak vd 2002). Verimli bir fotoelektrodun şu özelliklere sahip olması

istenmektedir: (i) yüksek dayanıklılık, (ii) ucuz malzeme, (iii) H_2/H_2O seviyesinden daha yüksek olan bir minimum iletim aralığı ve H_2O/O_2 seviyesinden daha düşük olan bir maksimum valans aralığı, (iv) güneş spektrumunun tüm fotonlarını iyi bir şekilde emebilme kabiliyetidir (Khan vd 2002).

Son yıllarda, bu alandaki araştırmalar fotoelektrod malzemeleri üzerine yapılmaktadır. Titanyum dioksit (TiO_2), ilk olarak deneysel fotoelektroliz yöntemini kanıtlayan fotoelektrod malzemelerinden birisidir (Fujishima ve Honda 1972). Bu yöntemin deneysel kanıtından sonra çok sayıda TiO_2 üzerine çalışma yapılmıştır (Khan vd 2002, Radecka 2004, Heller ve Vadimsky 1981). Ancak, fotoelektrod malzemeler üzerinde yapılan çalışmalarda güneş spektrumunu yeterince kullanabilen malzeme bulunamamıştır. Bazı düşük enerji aralığına sahip malzemelerin (CdS-Kadmiyum Sülfid, CdSe- Kadmiyum Selenid, InP- İndiyum Fosfat ve GaAs-Galliyum Arsenid gibi) güneş ışınımını emebilme kabiliyetleri yüksek olsa da bu malzemeler sıvı elektrolitle (alkali ve asidik çözeltiler) temaslarında kolaylıkla korozyona uğramaktadır (Nozik 1972 , Kainthla vd 1987). Bu yüzden, alkali ve asidik çözeltilere dayanıklı GaN (Galliyum Nitrit) üzerine yapılan araştırmalar artmıştır (Fujii vd 2005, Waki vd 2007). Fotoelektroliz alanındaki önemli gelişmelerden bir diğeri, 1991 yılından itibaren üzerinde yoğun bir şekilde çalışılan nano- TiO_2 malzemeye dayalı dye-sensitized güneş pilleri (Grätzel cell) olmaktadır (O'Regan ve Grätzel 1991). Fotoelektroliz yöntemi, basit olmasına ve p/n veya n/p fotovoltajların gereksinim duyduğu kompleks üretim adımlarını gerektirmemesine rağmen büyük yüzey alanları ve yarıiletken kullanımını zorunlu kılmaktadır. Ayrıca, fotoelektrokimyasal hücrelerin ömürleri oldukça düşüktür ve çalışma/teknik ayrıntıları bilinmemektedir (Murphy ve Bockris 1984). En büyük sorunları malzemedir.

Fotoelektroliz işleminin maksimum teorik veriminin %35 civarlarında olduğu belirtilmektedir (Dincer 2002a). Günümüzdeki son araştırmalarda, fotoelektroliz işlemlerinde %18'e kadar enerji verimi elde edilmiştir (Licht vd 2001). Ancak elde edilen bu verimler, oldukça düşük hidrojen üretim miktarlarında elde edilmiştir. Gelecekte önemli bir yöntem olarak hidrojen üretiminde yerini alması tahmin edilmektedir.

1.6.1.4. Fotobiyolojik olarak hidrojen üretilmesi

Fotobiyolojik hidrojen üretim yöntemi, bitkilerin ve alglerin fotosenteziyle aynı işlemlere sahiptir. Ancak, bu işlemler sonucu karbon ihtiva eden biyokütle üretiminin yerine hidrojen üretimi yapılmaktadır. Fotobiyolojik olarak hidrojenin sudan üretiminde (biyofotoliz) verimli bir biyolojik dönüştürücüye, mikroalge ve foto-biyoreaktöre ihtiyaç duyulmaktadır. Mikroalgler, biyofotoliz yönteminin en önemli adaylardandır (Kotay ve Das 2008). Ancak, fotobiyolojik olarak hidrojen üretilmesi laboratuvar ölçeğinde gerçekleştirilebilmiştir (Luzzi vd 2004). Teknolojik olarak gelişmemesinin bir diğer nedeni ise fotosentez işleminin %1 civarında güneş enerjisini çevirebilmesidir.

Yukarıda sayılan güneş enerjisinden hidrojen üretim yöntemlerinden en bilinen ve teknolojik olgunluğa ulaşan yöntem fotovoltaiiklerden elde edilen elektrik enerjisi ile suyun elektroliz edilmesidir. Fotoelektroliz yöntemi, gelecek için umut vaad etse de günümüzde yeni bir teknolojidir. Malzeme maliyeti ve dayanımı gibi sorunları barındırmaktadır. Güneş enerjisinden termal yöntemlerle hidrojen elde edilmesi ise yüksek sıcaklık prosesleri gerektirdiğinden, yüksek sıcaklık elektrolizörleri ve bu sıcaklıklara dayanabilecek malzemeler gerektirmektedir. Fotobiyolojik yöntemlerle büyük miktarlarda hidrojen üretilmesi ise günümüzde ve gelecekte oldukça zor görünmektedir. Tüm bu nedenler yüzünden, dünyada ulaşımda ve elektrik üretimi için gereken hidrojenin güneş enerjisinden sağlanmasında PV-hidrojen sistemleri kullanılmaktadır. Diğer güneş enerjisinden hidrojen üretim yöntemlerinin elektrik üretiminde kullanılacak düzeyde gelişmemesinden dolayı PV-hidrojen/yakıt pili sistemleri kısaca güneş-hidrojen hibrid enerji sistemleri olarak adlandırılmaktadır.

1.6.2. Güneş-hidrojen hibrid enerji sistemlerinin önemi

Günümüzde bir çok ülke yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını arttırmaktadır. Tablo 1.2'de 2000-2006 yılları arasında yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminin kurulu gücünün kaynaklara göre artış oranı, 2006 yılındaki bu kaynakların elektrik üretimindeki kurulu gücü, ve 2020 yılındaki elektrik üretimi kurulu güç projeksiyonları yer almaktadır. Tablodan görüldüğü gibi elektrik üretiminde hidrolik enerjinin payı diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre daha fazladır. 2000-2006 artış oranlarında, iki yenilenebilir enerji kaynağının kullanımında

(güneş ve rüzgar enerjisi) artış öne çıkmaktadır. Özellikle küçük ve orta ölçekli elektrik üretim uygulamalarında çatı üzerine yerleştirilecek fotovoltaik (PV) panellerin kurulu güçlerinin 2020 yılında 1090 GW seviyesine ulaşması tahmin edilmektedir.

Tablo 1.2 Yenilenebilir enerji kaynaklarının 2006 yılında elektrik üretimi kurulu güçleri, 2000-2006 yılları arasındaki artış oranları ve 2020 yılı için tahmini kurulu güçleri (IEA 2006).

Yenilenebilir Enerji Kaynağı Teknolojisi	2000-2006 Yılları Arasındaki Yıllık Artış Oranı (%)	2006 Yılındaki Mevcut Kurulu Güç (GW)	2020 Yılındaki Tahmini Kurulu Güç (GW)
Rüzgar Türbinleri	27.5	74	3000
Fotovoltaik (PV)	33.3	9	1090
Güneş Termal Elektrik Santralleri	0	0	300
Jeotermal Santral	1.9	9	200
Hidroelektrik	2.0	850	1350

Ancak, elektrik enerjisi ihtiyacının sadece PV panellerinden sağlanması güneş enerjisinin süreksizliğinden dolayı mümkün olamamaktadır. Bu yüzden, günümüzde PV elektrik üretimi sistemlerinde dizel jeneratörler, aküler, süperkapasitörler ve basınçlı hava kullanılmaktadır. Bu PV panelleriyle birlikte kullanılan hibrid enerji sistemlerinde karşılaşılan problemler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- frekans/voltaj kontrolü (güç kalitesi) gerekliliği,
- sistem elemanlarının kaynağa veya yüke farklı cevap verme zamanları,
- değişken üretim ve yük,
- uzun dönem enerji depolanamaması.

Bu problemlerin yanı sıra çoğunlukla kullanılan dizel yakıtla çalışan jeneratörlerin gürültü problemleri, erişimin zor olduğu yerleşimlerde (ada, dağ v.b.) kullanılması durumunda dizel yakıtın taşınmasının zorlukları, bu jeneratörlerin kısmi yüklerde düşük verimlere sahip olmaları ve dizel yakıtın çevresel etkileri bulunmaktadır (Ghosh vd 2003).

PV panellerinden üretilen güç Doğru Akım (DC) olduğundan eğer sistem küçük ölçekli ise (<1 kW) yükün de DC olması tercih edilmektedir. Çünkü, Alternatif Akım (AC) yük olması durumunda, sisteme DC/AC invertör ilavesiyle verimde düşme gerçekleşecektir. Ayrıca, doğru akımın taşınmasında kablolardan kaynaklı direnç kayıpları alternatif akıma göre daha azdır ve DC ile çalışan düşük güce sahip cihazlar geniş bir voltaj aralığı değişimini tolare edebilmektedir. Ancak 1 kW gücünden büyük sistemlerde, DC cihazların yaygın olmaması nedeniyle AC cihazlar kullanıldığından, invertör gerekmektedir. AC sistemlerde bu yüzden frekans ve voltaj kontrolünün iyi yapılması gerekmektedir.

Diğer sorun da, bu sistemlerin saatlik, günlük veya mevsimlik güç üretimlerinin değişmesi ve bu yüzden üretimin fazla olduğu zamanlardaki enerjinin depolanmasının gerekliliğidir. Aküler, süperkapasitörler ve basınçlı hava üretilen elektrik enerjisinin farklı enerji formlarında depolanmasını sağlamaktadır. Depolama seçeneklerinin her birinin ömürleri, sakladıkları enerjinin formu, kullanılan malzemeleri, enerji yoğunlukları, kendi kendine deşarj olmaları, verimleri veya maliyetleri açısından avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

PV panelleriyle birlikte üretilen elektrik enerjisinin kimyasal enerji olarak depolanmasında aküler kullanılmaktadır. Akü teknolojisinin teknolojik gelişmişliği ve ticari olarak kolay bulunmasından dolayı kısa süreli depolama ihtiyacında aküler tercih edilmektedir. Uzun dönemli depolama ihtiyacında, hidrojen alternatifler arasında yer almaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

1980'li yılların ortalarından itibaren fotovoltaik (PV-Güneş Pili) / hidrojen hibrid enerji sistemleri, devlet, üniversite ve enstitülerin yaptığı pilot projeler ile dünyanın çeşitli ülkelerinde kurulmaya başlanmıştır. Pilot projelerin sistem özellikleri ve yapılan performans ölçümleri literatürde raporlar şeklinde yer almaktadır. Pilot projelerin yanı sıra bu sistemlerin enerji modellemeleri, kontrolü, optimizasyonu ve maliyet analizi çalışmaları; enerji politikaları içindeki önemi ve çevresel etkileri şeklinde sınıflandırılabilir çeşitli teorik incelemeler bulunmaktadır. PV-hidrojen hibrid enerji sistemleri ile ilgili literatürdeki çalışmalar ve karşılaşılan problemler aşağıdaki gibi özetlenmeye çalışılmıştır.

2.1. Pilot Projelerin Sistem Özelliklerine İlişkin Çalışmalar

1986'da faaliyete geçen HY-SOLAR pilot projesi, güneş enerjisinden doğrudan üretilen elektrik enerjisinin suyun elektrolizinde kullanılması ile hidrojenin elde edilmesinin büyük ölçekte uygulanabilirliğini göstermiştir (Steeb vd 1994). Suudi-Alman ortaklı bu proje iki aşamadan oluşmuştur. Birinci aşamada, Almanya Stuttgart'da 10 kW kurulu gücündeki PV panelleri kullanılarak suyun elektrolizi ve böylelikle hidrojen üretimi gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ise, Suudi Arabistan'da 2 kW ve 350 kW gücünde PV panelleri kurulmuştur (Abaoud ve Steeb 1998). Suyun elektrolizi ile üretilen hidrojen, katalitik ocaklarda, içten yanmalı motorlarda ve yakıt pili sistemlerinde denenmiştir. 1995 yılında araştırmalar, iki devletin desteğini çekmesi sonucu bitirilmiştir. Bu projeden sonra, farklı ülkelerde 1986 yılından itibaren küçük ölçekli hibrid PV-hidrojen/yakıt pili sistemleri kurulmaya başlanmıştır. Tablo 2.1'de şimdiye kadar kurulan hibrid PV-hidrojen/yakıt pili sistemleri ve özellikleri görülmektedir. Bu sistemlerin kurulumundaki amaçlar ve karşılaşılan sorunlar ilerleyen kısımlarda açıklanmıştır.

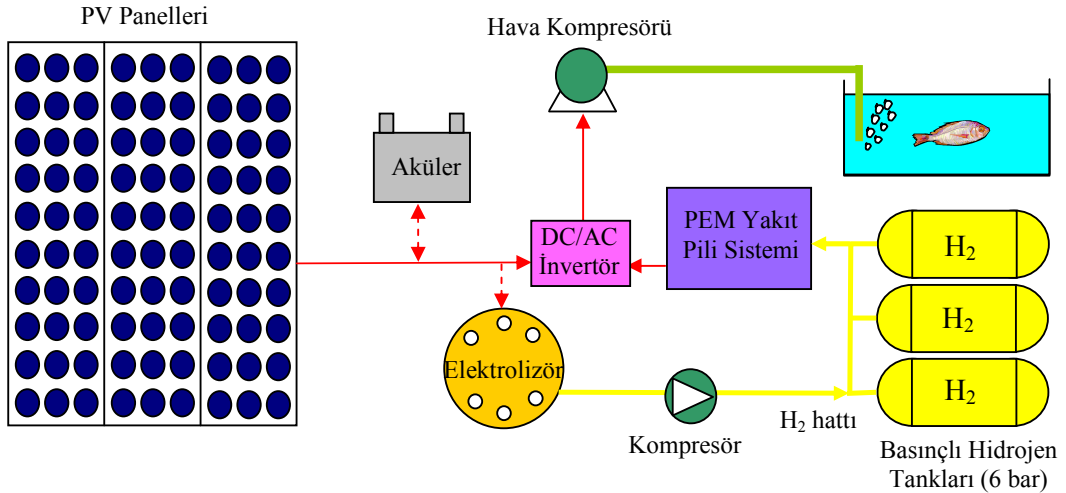
Tablo 2.1 Çeşitli ülkelerdeki hibrid PV-hidrojen/yakıt pili sistemleri ve özellikleri (Chamberlin vd 1994, Voss vd 1996, Barthels vd 1997, Lehman vd 1997, Szyszka 1997, Meurer vd 1999, Schucan 1999, Lehman vd 2000, Schucan 2000, SWB 2000, Schucan 2001, Agbossou vd 2004, Bose vd 2004, Chaparro vd 2005, Miland 2005, Gammon vd 2006, Hoffheinz vd 2007).

Projenin Adı ve Tarihleri	Kaynak		Elektrolizör		Akü Grubu		Hidrojen Depolama			Yakıt Pili Sistemi	
	Tipi ^a	Kurulu Güç (kW)	Tipi ^a	Güç (kW)	Tipi	Enerji Kapasitesi (kWh)	Tipi	Hacimsel Kapasite (Nm ³ H ₂)	Enerji Kapasitesi (kWh)	Tipi ^a	Güç (kW)
SCHATZ (1989-1998)	PV	9.2	Alkali	6	Kurşun Asit	5.28	Basınçlı tank, 8 bar	60	213	PEM	1.5
INTA (1989-1997)	PV	8.5	Alkali	5	-	-	Metal hidrid – Basınçlı tank, 200 bar	24 – 9	85 – 32	PA – PEM	10 – 7.5
SWB (1989-1998)	PV	370	Alkali	100	-	-	Basınçlı tank, 30 bar	5000	17730	PA	80
Solar-Hydrogen Pilot Projesi (1990-1992)	PV	1.3	Alkali	0.8	Kurşun Asit	12	Basınçlı tank, 25 bar	200	709	PA	0.5
Solar House (1992-1995)	PV	4.2	PEM	2	Kurşun Asit	20	Basınçlı tank, 28 bar	400	1418	PEM	3.5
PHOEBUS (1993-2003)	PV	43	Alkali	26	Kurşun Asit	304	Basınçlı tank, 120 bar	3000	10638	PEM	5.6
SAPHYS (1994-1997)	PV	5.6	Alkali	5	Kurşun Asit	51	Basınçlı tank, 200 bar	120	426	PEM	3
FIRST (2000-2004)	PV	1.4	PEM	1	Kurşun Asit	20	Metal hidrid, 30 bar	70	248	PEM	0.42
HRI (2001-)	PV – Rüzgar	1 – 10	Alkali	5	Kurşun Asit	42	Basınçlı tank, 10 bar	40	142	PEM	5
HARI (2002-)	PV – Rüzgar– Mikrotürbin	13 – 50 – 3.2	Alkali	36	Kurşun Asit	120	Basınçlı tank, 137 bar	2856	10127	PEM	7

^aPV: Fotovoltaik; PA: Fosforik Asit Yakıt Pili; PEM: Proton Değişim Membranlı Yakıt Pili

2.1.1. SCHATZ

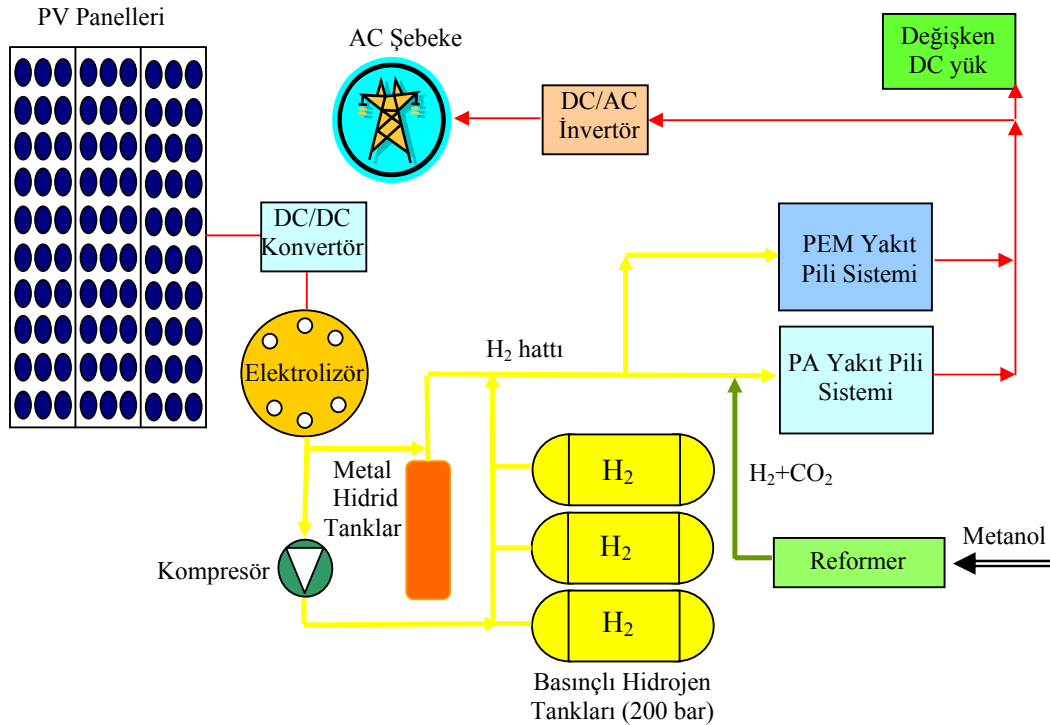
“SCHATZ” Güneş-Hidrojen projesi, şebekeden bağımsız bir enerji üretim olarak Humboldt Üniversitesi (HSU) tarafından Almanya’da kurulmuştur (Lehman vd 1997). Sistem, 1986 ve 1998 yılları arasında devrede kalmıştır. Üretilen elektrik enerjisi bir akvaryumun 600 W gücündeki bir hava kompresörü ihtiyacının karşılanmasında kullanılmıştır (Chamberlin vd 1994). PV panelleri ile elektroliz için kullanılan elektrolizör arasında doğrudan bağlantı yapılmıştır. Fakat, bu bağlantı tipinin getirdiği voltaj uyumsuzluğu sorunları, zamanla kendini belli etmiştir. Ayrıca, sistem kontrolü düzgün sağlanamadığı için sıklıkla sistem kendini kapatmaya başlamıştır. Tüm bu olumsuzlukların yanı sıra elektrolizör arızaları meydana gelmiş ve elektrolizörden istenilen randıman alınamamıştır (Schucan 1999). Ayrıca Lehman vd (2000) tarafından yapılan bir çalışmada, 1993 yılı için sistemin hidrojen üretim veriminin %6.2 olduğu belirtilmiştir. Sistem ile 1992-1996 arasında toplam 4556 Nm³ (yaklaşık 4000 çalışma saati) hidrojen üretimi gerçekleştirilmiş ve bu süre içinde yakıt pili sistemi sorunsuz çalışmıştır. Fakat 5 ay sonra, PEM yakıt pili sisteminde sorunlar ortaya çıkmıştır (Lehman vd 2000). Bu problemler nedeniyle sistemden yakıt pili çıkarılmıştır. Şekil 2.1’de sistemin şematik görünümü yer almaktadır.



Şekil 2.1 PV panelleri ile elektrolizörün doğrudan bağlantısının yapıldığı “SCHATZ” projesinin şematik görünümü.

2.1.2. INTA

“INTA” programı, İspanya’nın hidrojen teknolojileri için yürüttüğü bir çalışmanın parçası olmuştur. 1989 yılında belirlenen programın iki temel amacı olmuştur: (i) Hidrojenin güneş enerjisinden elde edilen elektriğin depolanmasında kullanılması, (ii) Hidrojene dayalı hibrid sistemlerin uzay çalışmalarında kullanılabilirliğinin araştırılması (Meurer vd 1999). Birinci amacın gerçekleştirilmesi için kurulan bir PV-hidrojen/yakıt pili sistemi DC bir yükün karşılanmasında kullanılmıştır. Kurulan sistemde iki farklı şekilde elektrolizörün PV panellerine bağlantısı test edilmiştir. Elektrolizör, ilk olarak PV panellerine doğrudan bağlanmıştır. Daha sonra uygun eşleşme problemlerinden dolayı, PV panellerine maksimum güç noktasını takip etmeye yarayan bir DC-DC konvertörle bağlanmasına karar verilmiştir. Yakıt pillerinde üretilen gücün bir kısmı DC/AC bir invertörle AC şebekeye verilmiştir. Ayrıca sisteme 1994 yılında, metanol reformeri eklenmiştir (Schucan 2001). Proje 1997 yılında sona ermiştir. Şekil 2.2’de sistemin şematik görünümü yer almaktadır.



Şekil 2.2 PV panelleri ile elektrolizörün bağlantısının maksimum güç takibi yapan bir DC/DC konvertörle yapıldığı “INTA” projesinin şematik görünümü.

2.1.3. Solar-Wasserstoff-Bayern (SWB)

“Solar-Wasserstoff-Bayern (SWB)” hidrojen projesi, elektrik üretiminin, karbondioksit salınımı olmadan, hidrojen enerjisinin kullanılmasıyla gerçekleştirilebileceğini göstermek amacıyla Almanya’da kurulmuştur. Proje, 1989 ile 1998 yılları arasında 9 yıl sürmüştür. Sistem, PV panellerinden, bir elektrolizörden ve bir de yakıt pili sisteminden oluşmuştur. Elektrolizör ve PV panellerinin bağlantısı bir DC/DC konvertörler sağlanmıştır. Ayrıca AC yük için sisteme DC/AC invertör ilave edilmiştir. Elektrolizörde meydana gelen arızalardan dolayı, elektrolizör içindeki hücre dizinleri üç defa değiştirilmiştir. Sisteme akü grubu ilave edilmemiştir ve bu yüzden sadece hidrojen PV panellerinden gelen elektriği depolamak amacıyla düşünülmüştür. Sistemin kontrol stratejisi, PV panellerinden gelen fazla elektriğin kesintisiz güç ihtiyacı sağlayacak miktarda hidrojene dönüştürülmesi ve hidrojenin gerektiğinde yakıt pilinde elektrik üretimi için kullanılması olarak belirlenmiştir. Yük profili olarak, bir adada bulunan bir hastanenin yük ihtiyacı seçilerek simule edilmiştir. 1994 yılında, alkali yakıt pilinin arızalarının artması sonucu, fosforik asit yakıt pili alımı yapılmıştır. Bu kararda ayrıca alkali yakıt pilinin kompleks yapısının neden olduğu problemler ve onarım zorlukları etkili olmuştur. Yaklaşık 2600 çalışma zamanında yakıt pili çıkış gücünde azalma meydana gelmiş ve 15 kW civarına düşmüştür (Szyszka 1997, SWB 2000).

2.1.4. Solar-hydrogen pilot projesi

“Solar-Hydrogen” Pilot Projesi, Finlandiya’da kurulmuştur ve proje, iki aşamaya ayrılmıştır. Birinci aşamadaki (1990-1992) amaç, sistem elemanlarının ve bu elemanların birlikte çalışmasının teknik olarak fizibilitesini göstermek olmuştur (Miland 2005). İkinci aşamada (1992-1994) ise, hidrojen üretimi, mevsimsel depolanması ve kullanımını oluşturan hidrojen yolunun verimini arttırmak amaçlanmıştır. Akü grubu kullanılarak, PV panellerinin akım dalgalanması ve gece yük ihtiyacı karşılanmaya çalışılmıştır. 1991 yılının Ağustos ve Eylül ayları arasında yapılan 33 günlük test çalışması sonucunda, sistemin yardımcı elemanlarının (anahtarlar, valfler v.b.) 143 kWh’lık toplam elektrik enerjinin %60’ını tükettiği belirlenmiştir. Bu durumdan, sistem yardımcı elemanlarının seçiminin ve optimizasyonunun bu tip küçük ölçekli sistemlerde son derece önemli olduğu görülmektedir. Yakıt pili, yaklaşık %60 voltaj verimine

ulaşmasına rağmen, açık-dizin konfigürasyonu ve ön ısıtmada harcanan elektrik enerjisi nedeniyle çalışma sırasındaki net enerji veriminde düşüş meydana gelmiştir. Bu yüzden, kullanılan fosforik asit yakıt pilinin proton değişim membranlı yakıt pili ile değiştirilmesi düşünülmüştür. Bu proje, bir elektrokimyasal çevirici olan yakıt pilindeki hidrojen kayıplarının önemini göstermektedir. Yaklaşık 3 yıl ve 2000 saat çalışma süresinden sonra 0.8 kW'lık alkali elektrolizörün verimi %75'ten %73'e düşmüştür. Aynı şekilde, fosforik asit yakıt pilinin veriminin %38'den %31'e kadar azaldığı belirtilmiştir (Schucan 2001).

2.1.5. Solar House

Bir otonom, kendi kendine yeten, enerji sistemi olarak tasarlanan Almanya'daki "Solar House", 1992 yılında Freiburg şehrinde, Fraunhofer Enstitüsü tarafından inşa edilmiştir. Konutun, tüm ısıtma, sıcak su ve yemek pişirme sırasında ihtiyacı olan ısı enerjisi 1995 yılına kadar güneş enerjisinden karşılanmıştır. Hidrojen, basınçlı tanklarda depolanarak, yine elektrolizörden üretilen oksijen ile yakıt pilinde kullanılmış ve elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir. Hidrojenin katalitik yanması ile yemek pişirme ve hacim ısıtmanın bir kısmının gerçekleşmesi sağlanmıştır. Sistemin elektrik enerjisinin karşılanmasındaki kontrol stratejisi, akülerin şarj olma durumları olarak seçilmiştir (Voss vd 1996).

Alkali elektrolizörde meydana gelen problemlerden dolayı, bir süre sonra Enstitü kendi proton değişim membranlı elektrolizörünü tasarlama yoluna gitmiştir. Akülerin, 3 yıl sonunda kapasite kayıpları olduğunun gözlenmesi, daha iyi bir kontrol stratejisi geliştirmenin gerekli olduğunu göstermiştir. Yakıt pilinde meydana gelen kısa süreli bir arıza dışında, konutun tüm enerjisi şebekeden bağımsız olarak karşılanmıştır.

2.1.6. PHOEBUS

"PHOEBUS" pilot elektrik tesisi, Almanya'nın Julich şehrindeki bir üniversite merkezi kütüphanesinin 1993-2003 yılları arasındaki tüm elektrik enerjisini tek başına karşılamıştır (Meurer vd 1999). Tesisin kurulmasındaki öncelikli amaç, PV panellerinden sağlanan elektrikle suyun elektrolizi yoluyla hidrojenin elde edilerek, yakıt pilinde kullanılmasının gerçek koşullar altında teknik fizibilitesini göstermek

olmuştur. Bir diğer amaç ise, çalışma deneyimleri ve alınan ölçümler ile sistemin zayıf noktalarını ortaya çıkarılmasıyla farklı eleman konfigürasyonlarını simüle etmek, enerji optimizasyonunu sağlamak ve maliyet düşüşünü sağlamak olarak belirlenmiştir (Barthels vd 1997).

PHOEBUS, tamamen yenilenebilir bir enerji kaynağına ve hidrojenin kullanılmasına dayalı bir sistemin olanaklılığını göstermiştir. Sistem çalışmasının ilk aşamasında, 6.5 kW gücünde bir alkali yakıt pili kullanılmış, daha sonra sorun çıkaran bu yakıt pilinin yerine proton değişim membranlı yakıt pili geliştirilmeye çalışılmıştır (Meurer vd 1999). 1999 yılında PEM yakıt pili üretilebildiğinden, bu tarihten sonra sisteme ilavesi gerçekleştirilebilmiş ve sistem, 2003 yılında projenin bitirilmesine kadar tamamen sorunsuz olarak çalışmasına devam etmiştir (Miland 2005).

2.1.7. SAPHYS

“SAPHYS” projesi, İtalya, Norveç ve Almanya’daki üç enstitünün ortak yürüttüğü bir çalışma olmuştur. Ayrıca proje, 1994 ile 1997 yılları arasında Avrupa Birliği’nden çerçeve programları içinde destek almıştır. Projenin amacı, hidrojenin depolamada kullanılmasının verimini incelemek, küçük çaplı ve test amaçlı şebekeden bağımsız bir sisteme entegresini sağlamak olarak belirlenmiştir. Sistemde, kontrol stratejisi akülerin şarj durumlarını dikkate alacak şekilde oluşturulmuştur. Bu projede, elektrolizörün teknolojik olarak gelişmiş hale geldiği görülmüştür. Ancak, sistemin yardımcı elemanlarında, örneğin suyun demineralizasyonunu sağlayan ünite ve basınçlı hava sağlayıcı üniteye sık sık meydana gelen arızalar sistemin çalışmasını etkilemiştir (Schucan 2000). Bir diğer sorun da uzun süre çalışmayan yakıt pilinin zarar görmesi ve soğuk hava sıcaklığından etkilenmesi olmuştur.

2.1.8. FIRST

“FIRST” projesi, bir Avrupa Birliği projesinin parçası olarak, İspanya’nın Madrid şehrinde bir telekomünikasyon uygulaması için geliştirilmiştir. Sistem, 2000 yılında devreye alınmış ve proje 2004 yılında sona ermiştir. Bu sistemde, elektrolizör PV panellerine direkt bağlanmıştır. Sistem tarafından karşılanması gereken yük, 133 ile 197 W arasındadır. Amaç, kesintisiz güç ihtiyacı olan telekomünikasyon cihazının akülerin

yetmediği zamanlarda da elektriğinin karşılanması olmuştur. Genellikle bu tip sistemlerde kullanılan dizel jenaratörün alternatifini olarak hidrojenin yakıt pillerinde kullanılması gerçekleştirilmiştir. Günlük ortalama 3.6 kWh enerji tüketimi ve ortalama 150 W'lık güç ihtiyacı için sistem tasarlanmıştır (Chaparro vd 2005).

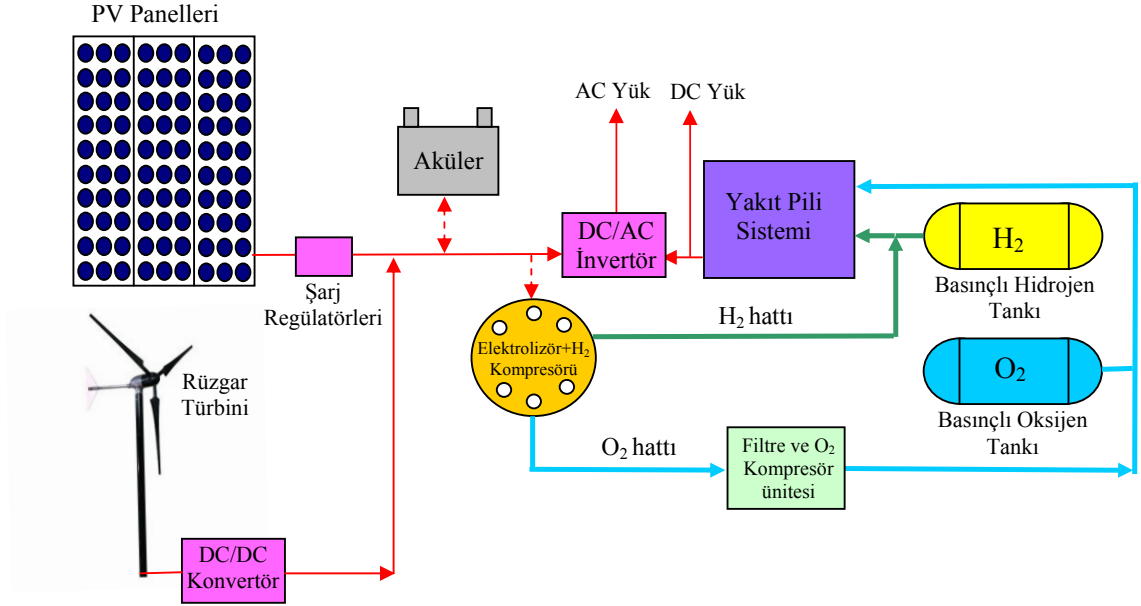
2.1.9. HRI

“HRI” projesi, Kanada’da rüzgar ve güneş enerjisine dayalı şebekeden bağımsız bir enerji üretim sistemi olarak Hidrojen Araştırma Enstitüsü tarafından tasarlanmıştır (Agbossou 2004). Proje, 2001 yılında başlamış ve halen devam etmektedir. Projedeki amaç, otonom bir sistemin uzun dönem enerji depolama ihtiyacında hidrojenin kullanılabilirliğini ve güvenilirliğini göstermektir. Belirlenen başarılı kontrol stratejisi ve performans sonuçları, şebekeden bağımsız sistemler için bu tip yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı hidrojen-yakıt pili sistemlerinin dikkate alınması gerektiğini işaret etmektedir (Bose vd 2004). Sistemin enerji analizine dayalı performansı farklı yük profilleri için test edilmiştir.

2.1.10. HARI

“HARI” projesi, İngiltere, Leicestershire’de bulunan bir çiftlikte farklı yenilenebilir enerji kaynakları ile hidrojen üretiminin gerçekleşmesi amacıyla 2002 yılında hayata geçirilmiştir. Sistem, 36 kW gücünde bir alkali elektrolizör, 2856 Nm³ hacimli basınçlı depolama tankları, 2 kW ve 5 kW gücündeki iki yakıt pili sisteminden oluşmaktadır (Gammon vd 2006). Enerji kaynağı olarak toplam 50 kW gücüne sahip iki rüzgar türbini, 13 kW gücüne sahip PV panelleri ve yaklaşık 3 kW’lık bir mikro-türbin kullanılmıştır (Hoffheinz vd 2007).

Üretilen elektriğin bir kısmı şehir şebekesine verilmiştir. HARI projesi, farklı yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmasıyla ve fazla elektrik enerjisini şehir şebekesine vermesi ile “hidrojen ekonomisi”nin konseptini hayata geçirmiştir. Projeden sağlanan tecrübe ile geliştirilecek bilgisayar yazılımı ile benzer sistemlerin modelleme çalışmaları bir diğer amaç olmaktadır.



Şekil 2.3 PV-rüzgar türbini-hidrojen hibrid enerji sistemlerinden biri olan “HRI” projesinin şematik görünümü.

2.2. Teorik Çalışmalar

Literatürde, PV-hidrojen/yakıt pili sistemin enerji modellemesi ile ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar, ayrı ayrı sistem elemanlarının termodinamiğin birinci kanuna göre modellenmesine ve performanslarının incelenmesine dayanmaktadır. Modellemelerin, genellikle saatlik veriler kullanılarak günlük, aylık ve yıllık olarak yapıldığı görülmektedir. Ayrıca modellemede, çeşitli ticari bilgisayar yazılımlarından yararlanılan çalışmalar bulunmaktadır. Literatürde kullanımına rastlanan ticari bilgisayar yazılımları, TRNSYS, MATLAB Simulink, Hybrid2 ve HOMER şeklindedir (WEB_3 2008, WEB_4 2008, WEB_5 2008, WEB_6 2008). Sistem kontrol stratejisinin ve algoritmasının oluşturulması, literatürdeki çalışmaların başka bir eksenini oluşturmaktadır. Genel olarak kontrol stratejisi akülerin çevrimlerine göre veya yük karşılama durumuna göre olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Akülerin kullanılması durumunda, akülerin şarj durumlarına göre kontrol stratejisinin belirlendiği yöntemler kullanılmaktadır. Elektrolizörün devreye girme zamanlarının ve yakıt pilinin yükün karşılanmasındaki payının belirlenmesi ise yük karşılama durumuna göre yapılan kontrol stratejisinde önemli olmaktadır. Kompleks kontrol

algoritmasının oluşturulmasında sinir ağırları ve bulanık mantık gibi yöntemlerden yararlanılmaktadır. Optimizasyon çalışmaları, kullanılan enerjinin optimizasyonu ve sistem elemanlarının seçiminin enerji üretim-tüketim, depolama karakteristiklerine göre yapılmasını içermektedir. Diğer bir optimizasyon yöntemi, sistem elemanlarının maliyet analizine göre seçiminin yapılması olmaktadır. Literatürdeki çalışmalarından bazılarının konusu ise, bu hibrid sistemlerin geleceğin enerji yapısındaki öneminin gösterilmesidir. Ayrıca, literatürde, diğer yakıtlarla üretilen elektriğin çevresel etkileri ile PV-hidrojen sistemlerinin karşılaştırıldığı çalışmalar bulunmaktadır. Aşağıda, teorik çalışmalardan bazıları ve bu çalışmaların eksiklikleri sıralanmıştır.

2.2.1. Enerji modelleme, kontrol, optimizasyon ve maliyet analizi çalışmaları

Sistemlerin enerji modellemesinde, her bir elemanın ayrı ayrı modellemesinin yapıldığı çalışmalara literatürde sıklıkla rastlanmaktadır.

Torres vd (1998) tarafından yapılan çalışmada, bir PV-hidrojen/yakıt pili sisteminin modellemesi, Meksika'nın dört farklı bölgesi için uygulanmıştır. Kontrol stratejisi olarak PV panellerinin yükü karşılayacak akım üretip üretmemesi seçilmiştir. Eğer PV panelleri 1000 W günlük yükü karşılayabiliyorsa doğrudan yük karşılanmasında kullanılacaktır. Eğer paneller 10 A'den daha az akım üretiyorsa aküleri besleyecek, 10 A'den daha fazla akım üretiyorsa elektrolizörün çalışmasını sağlayacaktır. PV panellerinden akımın üretilmediği durumlarda aküler ve yakıt pilinin devreye girmesi ve yükü karşılaması öngörülmüştür. Sistemin çalışmasında, fazla enerjinin elektrolizörde kullanılmasına yönelik herhangi bir kontrol stratejisi belirlenmemiştir. Modellemede, C dilinde yazılan bir bilgisayar programı kullanılmıştır. Aylık olarak, seçilen 4 farklı yer için PV panellerinden alınan güç ve elektrolizörün çektiği güç hesaplanmış; fakat aküler ve yakıt pilinin enerji dengesindeki payı hesaplanmamıştır.

Agbossou vd (2001) tarafından yapılan çalışmada, Kanada'da bulunan bir baz istasyonunun tüm elektrik ihtiyacının PV-rüzgar/hidrojen hibrid sistemi ile karşılanmasının enerjetik olarak performans sonuçları sunulmuştur. Sistem, 1 kW kurulu gücündeki PV panelleri, 1 kW kurulu gücündeki rüzgar türbini ve 125 kWh enerji sağlayabilecek hacimde ve 10 bar basınç altında bulunan hidrojen tanklarından ve 5 kW gücündeki PEM (Proton Değişim Membranlı – Katı Polimer Elektrolitli) yakıt pili

sisteminden oluşmaktadır. Çalışmada, hibrid sistem tanıtıldıktan sonra her bir elemanın enerji verimi ve karakteristiği bir yük bankı kullanılarak elde edilmiştir. Fakat sistemin gerçek koşullarda yük altında analizi ve davranışı incelenmemiştir.

El-Shatter vd (2002) yaptıkları kısa analizde, PV panellerinden üretilen elektriğin, suyun elektrolizinde kullanılarak hidrojenin üretilmesi ve yakıt pilinde kullanılmasının simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. PV panellerinden maksimum verimi alabilmek için bulanık regresyon modeli kullanarak güneş izleyicileri güneşe doğru konumlandırma sağlanabileceğini belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada, yakıt pilinden elde edilen gücün mevsimlerle değiştiği ve yazın 11.299 kW/gün, sonbaharda 7.842 kW/gün, kışın 5.058 kW/gün ve baharda ise 10.278 kW/gün olduğu görülmüştür.

Hedström vd (2004), Almanya GlashusEtt Enstitüsü'nde bulunan PV-hidrojen-biogaz/yakıt pili sisteminin 1 aylık enerji modellemesini MATLAB Simulink ile modellemeye çalışmışlardır. Sistemin yük altındaki davranışını ve enerji dengesini görebilmek amacıyla farklı kontrol stratejileri denenmiştir. Çalışmada sistem elemanları ve özellikleri tanıtılmış, konutun enerji ihtiyacı belirlenmiştir. Sistemde, akü grubu kullanılmamıştır. PV panelleri, elektrolizör ve yakıt pilinin nominal güçteki verimlerinin tüm koşullar altında değişmediği varsayılmıştır. Sonuçlar 1 aylık olduğu ve sistem elemanlarının verimleri sabit kabul edildiği için, ilerideki bir çalışmada daha uzun dönemli bir hesaplamanın ve sistem elemanlarının verim karakteristiklerinin elde edileceği vurgulanmıştır.

Mills ve Al-Hallaj (2004) tarafından yapılan çalışmada, hidrojenin kullanıldığı bir hibrid enerji sisteminin 1 yıllık modellemesi, Hybrid2 simülasyon yazılımı ile yapılmıştır. Sistemin, 6.5 kW gücünde PV panelleri, 12 kW gücünde rüzgar türbini, 8 kW güç tüketen bir elektrolizör, 3 kW güç tüketen bir kompresör ve 2 kW gücünde yakıt pilinden oluştuğu ve Chicago'da (ABD) kurulduğu varsayılmıştır. Suyun elektrolizi ile üretilen hidrojen, 22 Nm³ hacmindeki basınçlı tanklarda depolanmaktadır. Sistemin karşılaması gereken yük değişken olup, pik güç 1 kW olmaktadır. Çalışma, Hybrid2'nin seçilen elemanların karakteristiklerini eklemeyi olanaklı kıldığını göstermektedir. Böylece TRNSYS'ten daha gerçekçi sonuçlara ulaşmak mümkün olmaktadır. Çünkü, TRNSYS'te yapılan modellemelerde program içinde var olan elemanların karakteristiklerinden başka bir karakteristik eklenememektedir. Yapılan çalışmada, akü

grubunun kapasitesinin düşürülebileceği ve bunun yükün karşılanmasını etkilemeyeceği belirtilmiştir. Fakat, sistemin gerçek koşullar ve yük altındaki performansı incelenmemiştir.

Santarelli vd (2004), farklı yenilenebilir enerji kaynaklarının hidrojenle birlikte kullanılmasının enerji modellemesini yapmışlardır. PV panelleri, rüzgar türbini ve mikro hidrolik türbin ile birlikte hidrojenin yakıt pillerinde kullanılması durumları için Kuzeybatı İtalya'da şebekeden bağımsız bulunan bir konutun elektrik ihtiyacının karşılanması ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Sistemin boyutlandırılması her üç kaynak için ayrı ayrı yapılarak, sistemin büyüklüğü ve ilk yatırım maliyetleri simülasyon kodları kullanılarak elde edilmiştir. Düşük rüzgar hızlarının olduğu bölgede rüzgar enerjisi ile konutun ihtiyacının karşılanmasının ekonomik olmayacağı görülmüştür. Diğer iki kaynağın kullanımında ise güneş pillerinin veriminin düşük olması, geceleri elektrik üretiminin gerçekleşmemesi sebebiyle güneş enerjisinin; kış aylarında donma sebebiyle hidrolik güç üretiminin dezavantajları aylık hesaplanan veriler ile gösterilmiştir. Hidrolik güç üretim sisteminde kullanılan Francis türbinin veriminin yüksekliği ve ilk yatırım maliyeti düşüklüğü gibi sebeplerden dolayı hidrolik kaynak ile beslenen sistemin en iyi olacağı gözlemlenmiştir. Çalışmanın getirdiği önerilerden bir diğeri ise güneş-hidrolik sisteminin birlikte kullanılacağı hibrid sistem olmaktadır.

Barsoum ve Goh (2006), yaptıkları çalışmada PV panelleri, rüzgar türbini, dizel jenaratör, akü grubu, elektrolizör, hidrojen depolama tankları ve yakıt pilinden oluşan sistemin bir yıllık enerji üretim ve tüketim değerlerini TRNSYS programı kullanarak hesaplamışlardır. TRNSYS programı, sistem elemanlarının modellerini ve meteorolojik verileri içerdiğinden modellemede kolaylık sağlamıştır. Kontrol stratejisi olarak, PV panellerinden ve rüzgar türbininden gelen elektriğin yeterli olması durumunda öncelikle yükün karşılanması, fazla üretilen elektrik varsa akü grubunun beslenmesi ve akülerin dolu olması durumunda elektrolizörün devreye alınması seçilmiştir. Modelleme sonuçları detaylı olarak verilmemiş, sadece yıllık üretim ve tüketim değerleri verilmiştir.

Bilodeau ve Agbossou (2006) yaptıkları çalışmada, PV-rüzgar türbini-hidrojen/yakıt pili sisteminde kontrol stratejisinin önemini vurgulamışlardır. Ayrıca, tüm sistemi MATLAB Simulink yazılımı yardımıyla modellemişlerdir. Akülerin çok fazla deşarj

olması durumunun yarattığı ömürlerinin azalması problemini ortadan kaldırmak amacıyla, akülerin şarj durumuna dayalı, bulanık mantık yöntemi ile kontrol stratejisi oluşturmuşlardır. Böylece, bulanık mantık yöntemi ile akülerin şarjının %50'nin altına düşmesini önlemeye çalışmışlardır. Çalışma, 1 haftalık periyod için yapılmış ve elde edilen güç üretim-tüketim değerleri, akülerin şarj durumu ve hidrojen kullanım değerlerini gösteren grafikler elde etmişlerdir. Fakat, kullanılan kontrol stratejisinin uzun dönemli sonuçları hakkında bilgi vermemişlerdir.

Poggi vd (2006), PV panelleri, rüzgar türbini, elektrolizör ve yakıt pilinden oluşan bir sistemin simülasyon çalışmasını, sistemin bir yıllık enerjetik performansını incelemek üzere gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, sistemle 4 kişilik bir ailenin elektrik ihtiyacının yıl boyunca karşılanması hedeflenmiştir. Günlük karşılanması gereken yük kış ayı için 4228 Wh, yaz ayı için 3436 Wh ve bahar ayları için 3844 Wh olarak belirlenmiştir. Sistemde bulunan invertör ve konvertörlerin verimleri %100 kabul edilmiştir. PV panellerinin veriminin yıl boyunca sabit ve %12 olduğu kabul edilmiştir. Alkali tip elektrolizörden üretilen hidrojenin basınçlı tanklarda depolandığı varsayılmıştır. Kullanılan elektrolizör, yakıt pili ayrı ayrı modellenmiş, ancak PV panelleri ve rüzgar türbini modellenmemiştir. PV panellerinden üretilen enerjinin hesaplanmasında ortalama saatlik güneş ışınımı değeri kullanılarak, güneş ışınımının değişkenliği dikkate alınmamıştır.

Deshmukh ve Boehm (2007), farklı yenilenebilir enerji kaynaklarının hidrojen ile birlikte kullanılmasını modellemişlerdir. PV panelleri, mikrotürbin, rüzgar türbini, elektrolizör, farklı hidrojen depolama seçenekleri ve yakıt pili gibi sistem ana elemanlarının tek tek ayrıntılı modellemeleri yapılmıştır. Çalışma, elemanların ayrı ayrı modellenmesini incelediği için önemlidir. Fakat, hibrid bir sistem konfigürasyonu yapıp incelenmemiş ve tüm sistem modellenmemiştir. Çalışmada, elektrolizör modellemesinin ve metal hidrid tankların davranış modellerinin tam olarak gelişmediği vurgulanmıştır.

Zoulias ve Lymberopoulos (2007), Yunan adalarından Kythnos'ta bulunan 10 konutun elektrik enerjisinin mevcut PV-dizel-akü hibrid enerji sistemiyle ve PV-hidrojen hibrid enerji sistemiyle karşılanmasının ekonomik olarak karşılaştırmasını yapmışlardır. Mevcut durumda konutların elektrik enerjisi 8.8 kW'lık PV panelleri, 8

kW'lık dizel jeneratör ve küçük kapasitede akü grubu ile karşılanmaktadır. Karşılaştırmada bir bilgisayar yazılımı ile her iki durum modellenmiştir. Mevcut durumda enerji ihtiyacının %65'inin PV panellerinden, geri kalan kısmının dizel jeneratörden sağlandığı hesaplanmıştır. PV-hidrojen hibrid enerji sisteminin kullanılması durumunda iki farklı ilk yatırım maliyeti senaryosuna göre analiz yapılmıştır. Çalışmada, mevcut sistemin PV-hidrojen hibrid enerji sistemi ile değiştirilmesinin günümüzdeki elektrolizör ve yakıt pili sistemi maliyetlerinden dolayı ekonomik olmayacağı gözlemlenmiştir. Fakat, 2020 fiyat tahminlerine göre yapılan maliyet hesabına göre PV-hidrojen hibrid enerji sisteminin gelecekte daha ucuz elektrik üretim maliyetine sahip olacağı belirtilmiştir. Yapılan çalışma, genel olarak iki sistemin elektrik üretiminin maliyet karşılaştırmasını göstermekte, ekserjiye dayalı detaylı ekonomik analiz içermemektedir. Ayrıca sistem elemanlarının karakteristikleri elde edilmemiştir.

2.2.2. Enerji politikaları içindeki önemi ve çevresel etkileri üzerine çalışmalar

Literatürde, çeşitli ülkelerin PV-hidrojen hibrid enerji sistemlerine bakışı, konuya verdikleri önem ve sistemlerin gelecekteki enerji yapısındaki payına yönelik yaptığı çalışmalar bulunmaktadır. Ayrıca, bu sistemlerin farklı enerji üretim sistemleriyle veya hidrojen üretim yöntemleriyle çevresel etkilerinin karşılaştırılması yer almaktadır.

Kazim ve Veziroglu (2001) tarafından yapılan çalışma, petrol ihracatçısı bir ülke olan Birleşik Arap Emirlikleri'nin geleceğin hidrojen ekonomisindeki yerini tartıştığı için önemlidir. Bu çalışmada, 2015 yılından sonra küresel ölçekte enerji piyasasındaki değişimler nedeni ile Birleşik Arap Emirlikleri'nin petrol üretimindeki payının azalacağı ve bu nedenle güneş enerjisi kullanarak hidrojen elde edilmesine yönelik güneş panellerinin yerleştirileceği uygun alanların belirlenmesi için çalışmaların bugünden başlaması gerektiği vurgulanmıştır. Yapılan çalışmada hidrojen üretilmesi için en uygun yöntemin güneş pilleri kullanarak üretilen elektriğin suyun elektroliz edilmesinde kullanılması olduğu belirtilmiştir. Bu noktadan hareketle, BAE'nin enerji talep projeksiyonu oluşturularak, hidrojen ihtiyacı belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca gelecekteki doğalgaz, petrol ve hidrojen talep ve arzlarının muhtemel gelişmeleri hesaplanarak, hidrojen üretiminin gelecekte büyük önem kazanacağına vurgu yapılmıştır.

Kazmerski ve Broussard (2004) tarafından yapılan çalışmada, güneş enerjisinden hidrojen eldesinin günümüzdeki maliyet durumu ve gelecekte hedeflenen maliyetleri verilmiştir. Günümüzde, güneş enerjisinden elde edilen elektriğin kullanılarak suyun elektrolizi sonucu üretilen hidrojenin 7 ABD\$/kg ile 25 ABD\$/kg arasında değiştiği belirtilmiştir. Ancak, maliyet değerlerinin bu tip sistemler laboratuvar aşamasında olduğu için değişkenlik gösterdiği ilave edilmiştir. 2010 yılı için hedef olarak Enerji Bakanlığı'nın 4 ABD\$/kg belirlediği vurgulanmıştır. Her geçen yıl güneş pili verimlerinin arttığı ve ileride daha verimli elektrik üretimini gerçekleştirecek güneş pili malzemelerinin geliştirilmesi ile maliyetlerin düşeceği belirtilmiştir.

Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı tarafından hazırlanan bir çalışmada (DOE 2005), güneş ve rüzgar enerjisi ile hidrojen üretim yöntemlerinin gelecekteki güvenilir, sürdürülebilir ve erişilebilir enerji yapısında oynayacağı rol raporlaştırılmıştır. ABD Kongresi'ne sunulan raporun, ülkenin hidrojen yol haritasının kısa fakat detaylı bir özeti olduğu belirtilmiştir. Raporda, güneş enerjisi ile hidrojen üretim yöntemleri, günümüzdeki maliyetleri ve gelecekteki hedeflenen maliyetleri yer almaktadır. Ayrıca, güneş ve rüzgar enerjisi kullanılarak üretilen hidrojenin karbondioksit emisyonlarına etkisi uzun vadeli olarak tahmin edilmeye çalışılmıştır. Raporda, güneş ve rüzgar enerjisi kullanılarak hidrojen üretiminin günümüzdeki teknolojik zorlukları ve bu zorlukları aşmak için yapılması gereken araştırmalar sıralanmıştır.

Fischedick vd (2005) çalışmalarında, Almanya için sürdürülebilir gelişmede hidrojenin rolünü incelemişlerdir. Enerji yapısının uzun dönemli tahminlerini yaparak, hidrojenin Almanya'nın geleceğindeki yeri tartışılmıştır. Ayrıca hidrojenin, yenilenebilir enerjilerden üretiminin önemi vurgulanmıştır. Özellikle, merkezi olmayan elektrik üretiminin ileride yaygınlık kazanacağına, PV panellerinden veya rüzgar türbinlerinden üretilen elektriğin fazla kısmının suyun elektrolizinde kullanılmasının uzun dönemde artacağına dikkat çekmişlerdir. Farklı senaryolar için yaptıkları enerji maliyetinde, 2020 yılından sonra PV panellerinden üretilen hidrojenin maliyetinin en fazla 22 ¢cent/kWh civarında olacağını hesaplamışlardır.

PV-hidrojen/yakıt pili hibrid enerji sistemlerinin çevresel etkilerinin, diğer enerji kaynaklarının kullanılmasıyla karşılaştırılmasına yönelik literatürde iki önemli çalışma

bulunmaktadır. Bu iki çalışmada, sistemlerin ömür boyu analizlerinin çevresel etkilerini anlamada daha başarılı olduğu gösterilmiştir. Bu çalışmalardan ilki Granovskii vd (2007) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, doğal gazın reformasyonu ile elde edilen hidrojenin kullanılmasının sera gazlarının salınmasında, yenilenebilir enerji kullanılmasına nazaran, çok fazla düşüş gerçekleştiremeyeceği (1 MJ enerji başına 2 kat daha az salınım) gösterilmiştir. Doğal gaz termik santralleri ile üretilen sera gazı emisyonlarına göre, güneşten elde edilen hidrojenin yakıt pillerinde kullanılmasının sera gazı emisyonlarının 1 MJ enerji başına 8.5 kat düşümünü sağlayabileceği hesaplanmıştır. Dincer (2007) tarafından yapılan diğer çalışmada ise, benzer sistemlerin ekserjetik ömür boyu analizi yapılmıştır. Ayrıca ekserjinin, çevre ve sürdürülebilirlik açısından önemi belirtilmiştir. Karşılaştırılan sistemlerden salınan sera gazları ve hava kirletici partikül miktarları hesaplanmıştır. Çalışmaya göre güneş enerjisinden hidrojen elde edilmesi ve yakıt pillerinde kullanılması, ciddi bir sera gazı ve partikül emisyonu meydana getireceği vurgulanmıştır. Tanımlanan sürdürülebilirlik endeksi ile bu sistemlerin sürdürülebilirlik üzerine etkisi incelenmiştir. Çalışma, taşıtlar için hidrojen üretimi ve kullanılmasına yönelik yapılmasına rağmen, üretim ve kullanım yolları değişmediğinden dolayı elektrik üretiminin değerlendirmesinde de göz önüne alınabilir.

3. ANALİZ

3.1. Ekserji Analizinin Önemi

Termodinamik bir sistemin analizinde son yıllarda geliştirilen ve kullanılmaya başlanan ekserji kavramı önem kazanmaktadır. Ekserji, termodinamiğin ikinci kanunundan yola çıkarak kütlelerin korunumu ve enerjinin korunumu prensiplerine dayanan ve enerji sistemlerinin tasarım ile analizlerinde kullanılan verimli bir metot olarak tanımlanabilir. 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.

Ekserji kavramı ilk olarak 1878 yılında J.W. Gibbs tarafından ortaya koyulmuştur. Kelime karşılığı olarak ise 1953 yılında Z. Rant tarafından kullanılmıştır (Lee 2001). Bodvarsson ve Eggers (1972) ilk ekserji analizini tek ve çift buharlaştırıcı iki farklı sistemden oluşan bir jeotermal güç santralinde uygulamışlar ve santral geneli için ekserji verimliliğini hesaplamışlardır.

Çevre sıcaklığında çalışan enerji sistemleri için, “kullanılabilir enerji” olarak da bilinen ekserjiyi, enerjinin faydalı kısmı olarak düşünebiliriz. Yani enerjinin faydalı kısmı, enerjinin başka enerji formuna dönüştürülebilen kısmıdır. Bir madde ya da bir enerji akışına bağlı ekserji; baca gazı, soğutma suyu ve ısı kaybı şeklinde çevreye atılır. Hem ekserji tahribi hem de ekserji kaybı, termodinamiğin ikinci kanun analizi de denilen “Ekserji Analizi”nden saptanır. Termodinamiğin ikinci kanunu, hem bir enerji taşıyıcının gerçek termodinamik değerini hem de proses ya da sistemlerden olan kayıpların ve gerçek termodinamik yetersizliklerin hesaplarının yapılabilmesi sonucu ile bir enerji dengesini tamamlar ve geliştirir. Ekserji tahribi direk olarak sistem içindeki tersinmezliklerin sonucudur.

Kompleks termodinamik sistemlerin optimizasyonunda, termodinamiğin ikinci kanununun çok güçlü bir araç olduğunu kanıtlamıştır. İkinci kanunun ışığında mühendislik aygıtlarının performanslarının belirlenebilmesi için; kullanılabilirlik, tersinir iş, tersinmezlik ve ikinci kanun veriminin tanımlamaları ile işe başlanmıştır.

Kullanılabilirlik, verilen bir durumdaki sistemden elde edilebilen maksimum faydalı iş miktarıdır. Tersinir iş ise, belirli iki durum arasında bir proses geçiren sistemden elde edilebilen maksimum faydalı iştir. Ayrıca tersinmezlik, bir proses sırasında kaybedilen iş potansiyelidir ve bu kayıp iş potansiyeli, tersinmezliklerin sonucu olarak meydana gelir.

Kullanılabilirlik çözümlemesinde ilk hal belirli olduğundan dolayı değişken değildir. İki hal arasında sistem tarafından yapılan en çok iş, hal değişiminin tersinir olması durumunda gerçekleşir. Bu nedenle sistemden elde edilebilecek en çok işi belirlerken tersinmezlikler göz önüne alınmaz. Son olarak, sistemden en çok işi elde edebilmek için, hal değişimi sonunda sistemin ölü halde olması gerekir. Bir sistemin ölü halde olması demek, çevresiyle termodinamik dengede bulunması anlamına gelir. Ölü haldeyken sistem, çevre sıcaklığında ve basıncındadır. Başka bir deyişle, çevre ile ısı ve mekanik dengededir. Ayrıca sistemin çevresine göre kinetik ve potansiyel enerjileri sıfırdır. Sistemin ölü haldeki özellikleri, (P_o , T_o , h_o , u_o ve s_o) sıfır indisiyle gösterilir. Aksi belirtilmedikçe, ölü hal sıcaklığı $25\text{ }^\circ\text{C}$ ve basıncı 1 atm alınabilir. Bir sistemin ölü haldeki kullanılabilirliği sıfırdır. Bir sistemden en çok işi elde edebilmek için sistemin son halinin ölü hal olma zorunluluğu şöyle açıklanabilir: Sistemin son haldeki sıcaklığı eğer çevre sıcaklığının üzerinde veya altında ise, çevre sıcaklığıyla bu sıcaklık arasında çalışan bir ısı makinesi aracılığıyla iş yapılabilir. Sistemin son haldeki basıncı eğer çevre basıncının üzerinde veya altında ise bu basınç farkından yararlanarak genişleme işi yapılabilir.

Bütün bunlar değerlendirildiğinde şu sonuç elde edilebilir: Bir sistemden elde edilebilecek en çok iş, sistem belirli bir başlangıç halinden, tersinir bir hal değişimi ile çevrenin bulunduğu hale (ölü hal) getirilirse elde edilir. Bu değer, sistemin verilen başlangıç halinde, yararlı iş potansiyelini veya iş yapma olanağını göstermektedir ve kullanılabilirlik (ekserji) diye adlandırılır. Ekserjinin, bir ısı makinesinin gerçek bir uygulamada yapabileceği iş olarak düşünülmemesi gerekir. Bu tanım, bir makinenin termodinamiğin yasalarına ters düşmeden yapabileceği işin üst sınırını belirler. Bir sistemin kullanılabilirliğiyle yaptığı iş arasında küçük veya büyük bir fark her zaman vardır. Bu fark mühendisler için daha iyinin sınırlarını çizer. Verilen bir halde sistemin ekserjisi, sistemin özelliklerinin yanı sıra, çevre koşullarına, başka bir deyişle ölü hale bağlıdır. Bu bakımdan ekserji sadece sistemin değil, sistem çevre ikilisinin bir

özeliğidir. Çevreyi değiştirmek kullanılabilirliği artırmanın bir yolu olabilir, fakat kolay bir yol olmadığı açıktır (Çengel ve Boles 1996).

Ekserji, en kısa ifade ile kullanılabilir enerji şeklinde tanımlanmaktadır. Ekserji aynı zamanda, verilmiş bir durumda bütün diğer enerji türlerine dönüştürülebilen enerji miktarının bir ölçüsü de olmaktadır. Tablo 3.1’de enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 3.1 Enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması (Dincer 2002b).

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.

3.2. Ekserji ve Genel Denklemler

Ekserji kelimesi Yunanca ex (dış) ve ergon (kuvvet ve iş) kelimelerinden türetilmiştir ve enerjinin başka bir enerjiye tamamen dönüşen kısmına denir. Başka bir deyişle ekserji, tamamen başka bir enerjiye dönüşen enerji oranını göstermektedir. Daha sonraları ekserji, verilen şartlardaki bir sistemin, çevresi ile aynı şartlara getirilmesi (ölü hal) sonucu elde edilebilecek maksimum iş potansiyeli şeklinde tanımlanmıştır.

3.2.1. Ölü hal

Bir sistemin ölü halde olması demek, çevresiyle termodinamik dengede bulunması anlamına gelir. Ölü halde iken sistem çevre sıcaklığında ve basıncındadır. Yani çevreyle

ısı ve mekanik dengededir. Ayrıca sistemin çevresine göre kinetik ve potansiyel enerjileri sıfırdır. Sistem ölü halde iken çevre ile kimyasal reaksiyona girmez. Sistemin ölü haldeki özellikleri P_o , T_o , h_o , u_o ve s_o 'dır.

Bu tanımlardan hareketle, Termodinamiğin I. ve II. kanunu ekserji kapsamında kısaca şöyle ifade edilir. I. Kanun; “bütün termodinamik süreçlerde enerji ve ekserjinin toplamı sabit kalır”, II. Kanun ise; “tersinir süreçlerde ekserji sabit kalır, yani tersinmez süreçlerde ekserjinin bir kısmı veya tamamı enerjiye dönüşür veya enerji ekserjiye dönüşmez” şeklinde ifade edilebilir. Bu ifadeler ışığında ve aşağıdaki şekil dikkate alınarak ekserji için şöyle bir matematiksel denklem yazılabilir. Denklem 3.1'deki gibi ekserji; kinetik, potansiyel, kimyasal ve fiziksel ekserjilerin toplamıdır.

$$ex = ex^{ph} + ex^{ch} + ex^k + ex^p \quad (3.1)$$

3.2.2. Fiziksel ekserji

Sistemin sıcaklığı T ve basıncı P ilk durumundan, T_o , P_o halindeki çevre şartları ile termodinamik denge haline getirildiğinde sistemden elde edilecek maksimum iş olarak Denklem 3.2'deki gibi tanımlanır.

$$ex^{ph} = (h - h_o) - T_o(s - s_o) \quad (3.2)$$

Bir sistemde iki durum arasındaki fiziksel ekserji farkı Denklem 3.3 ile ifade edilmektedir.

$$ex_1^{ph} - ex_2^{ph} = (h_1 - h_2) - T_o(s_1 - s_2) \quad (3.3)$$

şeklinde yazılabilir.

3.2.2.1. İdeal gazların fiziksel ekserjileri

Herhangi bir durumda ve ideal gazdan oluşan sistemin fiziksel ekserjisi aşağıdaki Denklem 3.4 kullanılarak hesaplanır.

$$ex^{ph} = c_p \left[(T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] + RT_0 \ln \frac{P}{P_0} \quad (3.4)$$

3.2.2.2. Katı ve sıvıların fiziksel ekserjileri

Herhangi bir durumda ve katı veya sıvıdan oluşan sistemin fiziksel ekserjisi ise aşağıdaki Denklem 3.5'den denklemden hesaplanabilir:

$$ex^{ph} = c \left[(T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] + v_m (P - P_0) \quad (3.5)$$

3.2.3. Kimyasal ekserji

Bir maddenin çevresiyle kimyasal denge haline geldiğinde ısı transferi ve madde alışverişinden dolayı yaptığı maksimum işe “kimyasal ekserji” adı verilir. Bazı uygun çevre malzemelerinin özellikleri referans alınarak maddelerin standart kimyasal ekserjileri hesaplanmıştır. Standart kimyasal ekserjiler, standart çevre (ölü hal) sıcaklığına ($T_0 = 25^\circ\text{C} = 298.15 \text{ K}$) ve basıncına ($P_0 = 1 \text{ bar}$) bağlıdır.

Gaz karışımlarının ekserjilerinin bilinmesi önemli olmaktadır. Özellikle yanma ve kimyasal proseslerin ekserji analizlerinde gaz karışımları ön plana çıkmaktadır. N adet gazdan oluşan bir gaz karışımının kimyasal ekserjisi Denklem 3.6 ile aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$ex^{ch} = \sum_{i=1}^N x_i ex_{0,i}^{ch} + \tilde{R}T_0 \sum_{i=1}^N ex_0^{ch} \ln x_i \quad (3.6)$$

3.2.4. İş ekserjisi

Ekserji, maksimum iş potansiyeli olduğundan, bütün süreçlerde iş ekserjiye eşittir. Bu durum Denklem 3.7'de gösterilmiştir.

$$ex^w = w \quad (3.7)$$

3.2.5. Isı transferinin ekserjisi

Isı transferinden dolayı meydana gelen ekserji Denklem 3.8 bağıntısı ile hesaplanır.

$$ex^Q = \left(1 - \frac{T_o}{T}\right)Q \quad (3.8)$$

3.3 Ekserji Yıkımı

Aşağıdaki denklemde bir sistemin ekserji yıkımı (kayıbı) veya tersinmezliğinin nasıl hesaplanacağı ifade edilmektedir. Bu denklemden de görüleceği gibi ekserji kaybı net entropi değişimi ile çevre sıcaklığının çarpımına Denklem 3.9'daki gibi eşittir.

$$\delta\Gamma = T_0 \sum \Delta S = T_0 \Delta S_{net} \quad (3.9)$$

Bu denkleme “Ekserji Kaybı Yasası” veya “Gouy–Stodola Yasası” adı verilir. Ayrıca aşağıdaki Denklem 3.10'da ifade edildiği gibi ekserji kaybı, tersinmezliklerden dolayı ortaya çıkan kayıp işe eşittir.

$$\delta\Gamma = \delta W_{kay} \quad (3.10)$$

3.4. Ekserjinin Açık ve Kapalı Sistemler Açısından Ele Alınması

Enerjinin kinetik ve potansiyel enerji gibi mekanik biçimleri, tümüyle kullanılabilir enerjidir. Bir ısı enerji deposunun kullanılabilirliği, ısı enerji deposuyla çevre ortam arasında çalışan bir Carnot ısı makinesinin yaptığı işe eşittir.

Açık veya kapalı bir sistemde yapılan gerçek iş W , enerjinin korunumu denklemleriyle hesaplanabilir. Eğer sistemin hacmi değişiyorsa, yapılan işin bir bölümü

çevreye karşı yapılır ve çevre işi $W_{\text{çevre}}$ adını alır. Bu iş, P_0 basıncındaki çevre havayı itmek için kullanılır ve başka bir amaca yönelemez. Toplam gerçek işle çevre işi arasındaki fark yararlı iş W_y diye bilinir ve aşağıdaki Denklem 3.11 ile belirlenebilir.

$$W_y = W - W_{\text{çevre}} = W - P_0(V_2 - V_1) \quad (3.11)$$

Çevrimler, sürekli akışlı sistemler ve sabit sınırları olan sistemler için çevre işi $W_{\text{çevre}}$ sıfırdır. Verilmiş olan iki hal arasındaki değişim sırasında bir sistemden elde edilebilecek en fazla yararlı iş, tersinir iş W_{tr} diye tanımlanır. Bu iş, ilk ve son haller arasındaki hal değişiminin tümünden tersinir olması durumunda elde edilir. Eğer son hal çevre hali (P_0, T_0) ise, tersinir iş kullanılabilirliğe eşit olur.

Birinci yasa verimi mühendislik sistemlerinin değerlendirilmesinde tek başına bir ölçü değildir. Bir sistemin iş üretiminin, aynı ilk (giriş) ve son (çıkış) haller arasındaki tersinir hal değişimi sırasında üretilenle karşılaştırılması bir parametre olarak tanımlanabilir. Bu parametre ikinci yasa verimi (ψ) adını alır ve aşağıdaki bağıntılarla ifade edilir:

Isı makineleri ve diğer iş yapan makineler için ekserji verimi Denklem 3.12'den hesaplanabilir:

$$\psi = \frac{\eta_{th}}{\eta_{th,tr}} = \frac{W_y}{W_{tr}} \quad (3.12)$$

Soğutma makineleri, ısı pompaları ve diğer üzerinde iş yapılan makineler için ekserji verimi Denklem 3.13'den hesaplanabilir:

$$\psi = \frac{COP}{COP_{tr}} = \frac{W_{tr}}{W_y} \quad (3.13)$$

Düzenli akışlı kararlı bir açık bir sistemin enerji ve ekserji akışının eşitliği Denklem 3.14 ve Denklem 3.15'le ifade edilmektedir.

$$\sum_{in} en \dot{m}_{in} - \sum_{ex} en \dot{m}_{out} + \sum_k \dot{Q}_k - \dot{W} = 0 \quad (3.14)$$

$$\sum_{in} ex_{in} \dot{m}_{in} - \sum_{ex} ex_{out} \dot{m}_{out} + \sum_k \dot{E}x^Q - \dot{E}x^W - \sum \dot{\Gamma} = 0 \quad (3.15)$$

Burada, \dot{m}_{in} ve \dot{m}_{out} sırasıyla sisteme giren ve çıkan kütleli debileri, ex_{in} and ex_{out} , sisteme giren ve çıkan spesifik ekserjileri; \dot{Q}_k sistem sınırlarına “k” çevresinden gerçekleşen ısı transferini; $\dot{E}x^Q$, \dot{Q}_k ısı transferine bağlı ekserji akışını, \dot{W} sistemden elde edilen gücü, $\dot{E}x^W$ \dot{W} gücüne bağlı ekserji akışını; ve $\sum \dot{\Gamma}$ toplam ekserji yıkımını (tersinmezlikler) göstermektedir. Toplam ekserji yıkımı, tersinir sistemler için sıfıra eşit olduğu halde, tersinmez sistemlerde sıfırdan büyüktür. Daha önce açıklandığı gibi iş ekserjisi veya güce bağlı ekserji yapılan işe veya elde edilen güce eşit olmaktadır. Ekserji akışı, spesifik kinetik ve potansiyel ekserjiler ihmal edilirse, Denklem 3.16’daki gibi spesifik fiziksel ve kimyasal ekserjilerin kütleli debi ile çarpımından oluşmaktadır.

$$\dot{E}x = \dot{m}(ex^{ph} + ex^{ch}) \quad (3.16)$$

Spesifik fiziksel ekserji Denklem 3.17’den hesaplanabilir:

$$ex^{ph} = (h - h_o) - T_o(s - s_o) \quad (3.17)$$

Burada h , entalpiyi ve s entropiyi göstermektedir. T_o ise çevre sıcaklığı veya ölü hal sıcaklığıdır. Kimyasal ekserji, çevre sıcaklığında ve basıncındaki sistemin kimyasal bileşimine Denklem 3.18’de gösterildiği gibi bağlı olmaktadır.

$$ex_{ch} = \sum x_n ex_{ch}^n + RT_o \sum x_n \ln x_n \quad (3.18)$$

Ayrıca enerji sistemlerinde “İyileştirme Potansiyeli” tanımı yapılabilir. Ekserji giriş ve çıkışının, ekserji verimi ile beraber değerlendirilmesiyle Denklem 3.19 ile hesaplanabilir. Bu değer, sistemlerde yapılabilecek iyileştirmeler hususunda bilgi vermektedir.

$$IP = (1 - \psi_{system}) (\dot{E}x_{in} - \dot{E}x_{out}) \quad (3.19)$$

3.5. Eksergoekonomi ve Genel Denklemleri

Enerji sistemlerinin analizinde, termodinamiğin yanı sıra ekonomi biliminden de yararlanılmaktadır. Enerji sistemlerinin tasarımı, analizi ve optimizasyonda, mühendislik ekonomisini ve ekserji analizini kapsayan analizlere termoekonomik analiz veya eksergoekonomik analiz adı verilmektedir. Günümüzde eksergoekonomik analiz enerji sistemlerinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Bir sistemin ekserji analizini göz önüne alan maliyet analizi denklemi Denklem 3.20'yle ifade edilmektedir (Moran ve Shapiro 2000):

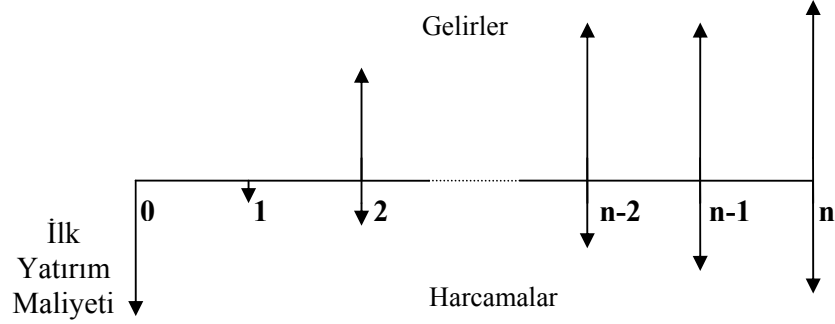
$$\sum (\dot{E}_{in,i} C_{in,i}) + \dot{Z}_k = \sum (\dot{E}_{out,i} C_{out,i}) + \dot{W} C_W \quad (3.20)$$

Burada $\dot{E}_{in,i}$, $\dot{E}_{out,i}$, $C_{in,i}$ ve $C_{out,i}$; sisteme giren ve çıkan ekserji akışı ve ekserji maliyetleridir. $\dot{Z}_{ekipman}$ ise sistemin kontrol hacmi içerisindeki yıllık veya belli bir süreye ait ekipman veya sistem elemanının maliyetidir. C_W , ekipmanın veya sistem elemanının güç üretim maliyetidir.

Sistem elemanlarının belirli bir süreye ait maliyetini hesaplamak için net bugünkü değer metodu (NBD) kullanılmaktadır. Bu metotta sistem elemanlarının hurda değerleri de dikkate alınmaktadır. Hurda değer, bir yatırımın ekonomik ömrü sonundaki piyasa değeridir. Hurda değer ifadesiyle bir sabit varlığın hem ekonomik ömrü sonundaki değeri, hem de fiziki ömrünün sonundaki değeri kastedilmektedir. Hurda değeri yatırım kararını etkiler. Böylelikle yatırım değerini belirlemek teklif edilen yatırımlarda önemlidir. Hurda değerinin büyük boyutlara varması, yatırım projelerinin değerlendirilmesinde hesaplara katılmasını zorunlu hale getirmekte ve yatırım kararlarına yansıtılmamasıyla da hatalı sonuçlara ulaşılmaktadır.

Nakit akışları, proje ve yatırım alternatiflerinin değerlendirilmesi için temel oluşturur. Ekonomik analiz tahmin edilen ya da verili nakit akışlarının zaman içinde nokta ya da noktalara dönüşümünü içerir. Proje ömrü için söz konusu olan nakitin içeri ve dışarı olan akışları arasındaki fark nakit akışları olarak tanımlanır. Nakit akışlarını

görünür kılmak için nakit akış diyagramları kullanılır. Yukarı bakan oklar net içeri akışları belirtirken aşağı bakan oklar net dışarı akışları gösterir (Şekil 3.1) (Sepulveda vd 1984).



Şekil 3.1 Basit bir net akış diyagramı.

Bir projenin nakit akışları detaylı hesaplamalar sonucu bulunmalıdır. Nakit akışlarını hesaplamamanın kolay bir yolu olarak her yıl yatırımdan elde edilebilecek net kâr ile o yıl ayrılacak amortisman tutarı kullanılabilir. Net kâr ile amortismanın toplamı, projenin nakit akışı olarak kabul edilir (Koçyiğit 2001).

3.6. Güneş-Hidrojenli Sistemlerinin Termodinamik Analizi

Sistem bileşenlerini oluşturan güneş pili panelleri, şarj regülatörleri, invertörler, aküler, elektrolizör ve yakıt pili sisteminin enerji ve ekserji verimlerinin bulunması performanslarının değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır. Elektrik enerjisinin dönüşümünü ve kontrolünü sağlayan şarj regülatörleri, invertörler ve aküler için bu cihazlar sadece elektrik enerjisini kullandıkları için enerji ve ekserji verimleri eşit olmaktadır. Bu yüzden bu bölümde güneş pili panelleri, elektrolizör ve yakıt pili sistemi için enerji ve ekserji verimi denklemlerinden bahsedilecektir.

3.6.1. Güneş pili panellerinin ekserji analizi

Bir güneş pili panelinin enerji analizinde iki bileşen kullanılabilir. Bu iki bileşen elektrik enerjisi ve termal enerjidir. Güneş pili panelinden fotovoltaiik etki ile elektrik enerjisi elde edilirken güneş pili paneli güneş ışınımından kaynaklı olarak ısınmaktadır. Bu durum ekserji analizinde iki bileşenle ifade edilmektedir. Üretilen elektrik, ekserji

olarak doğrudan yazılabilir. Kullanılmayan termal ekserji ise Carnot ısı makinası yardımıyla panel yüzeyi ve çevre sıcaklığı arasında gerçekleşen ısı transferinin kullanılabilir işe çevrilmesiyle hesaplanabilir ve ekserji yıkımı olarak ifade edilebilir. Güneş pili panelinden gerçekleşen ekserji transferi Denklem 3.21 ile hesaplanabilir.

$$\dot{E}x_{output} = \dot{E}x_{electrical,max} - \sum \dot{\Gamma} = V_{oc}I_{sc} - \left[(V_{oc}I_{sc} - V_m I_m) + \dot{Q}_{loss} \left(1 - \frac{T_o}{T_{cell}} \right) \right] \quad (3.21)$$

Denklemin ilk eşitliğini oluşturan $V_{oc}I_{sc}$ güneş pili panel yüzeyine ulaşan fotonların üretebileceği maksimum gücü ifade etmektedir. $(V_{oc}I_{sc} - V_m I_m)$ ise fotovoltaiik tersinmezliklerden kaynaklanan ekserji yıkımını göstermektedir. Güneş pili panellerinden çevreye gerçekleşen ısı transferi aşağıdaki Denklem 3.21 ile hesaplanabilir:

$$\dot{Q}_{loss} = h_c \cdot A \cdot (T_{cell} - T_{amb}) \quad (3.22)$$

Burada h_c, A, T_{cell} ve T_o sırasıyla panel ve çevre arasındaki ısı transfer katsayısını, güneş pili panellerinin efektif yüzey alanını, yüzey sıcaklığını ve çevre sıcaklığını göstermektedir. Güneş pili panelleri ile çevre arasındaki ısı transferi katsayısı $h_c = 5.7 + 3.8 \times v$ korelasyonu kullanılarak rüzgar hızı (v), havanın yoğunluğu ve çevre koşulları göz önünde bulundurularak doğal taşınım kabulü ile hesaplanabilir (Joshi 2006).

Denklem 3.22 ve 3.23 kullanılarak güneş pili panellerinden gerçekleşen ekserji transferi aşağıdaki denkleme dönüştürülebilir:

$$\dot{E}x_{output} = V_m I_m - \left(1 - \frac{T_o}{T_{cell}} \right) [h_c A (T_{cell} - T_o)] \quad (3.23)$$

Güneş pili panellerine ulaşan güneş enerjisi, panellere gerçekleşen ekserji transferini Denklem 3.24'de gösterildiği gibi ifade etmektedir:

$$\dot{E}x_{solar} = \dot{E}x_{input} = S_T A \left(1 - \frac{T_o}{T_{sun}} \right) \quad (3.24)$$

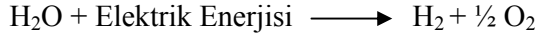
Burada S_T güneş pili panellerinin yüzeyine düşen güneş ışınımı miktarını göstermektedir. T_{sun} , güneşin sıcaklığı olup yaklaşık 6000 K civarındadır (Würfel 2005).

Sonuç olarak Denklem 3.23 ve 3.24 kullanılarak güneş pili panellerinin ekserji verimleri Denklem 3.25 ile hesaplanabilir.

$$\psi_{PV} = \frac{V_m I_m - \left(1 - \frac{T_o}{T_{cell}}\right) [h_c A (T_{cell} - T_o)]}{\dot{E}x_{solar}} \quad (3.25)$$

3.6.2. Elektrolizörün ekserji analizi

Bir PEM tipi elektrolizörde, suyun elektroliz işlemi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:



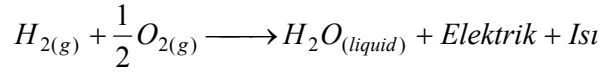
Yukarıdaki reaksiyon gözönüne alınarak elektrolizörün ekserji verimi bağıntısı yazılabilir. Elektrolizörün ekserji verimi Denklem 3.26'daki gibi tepkime ürünlerinin ekserjisinin elektrolizörün ihtiyaç duyduğu güce oranı ile bulunmaktadır:

$$\psi_{EL} = \frac{\dot{E}x_{H_2} + \dot{E}x_{O_2}}{\dot{W}_{input}} \quad (3.26)$$

Tepkime ürünlerinin (hidrojen ve oksijen) ekserjisi, fiziksel ve kimyasal ekserjilerinin toplamından oluşmaktadır.

3.6.3. Yakıt pili sisteminin ekserji analizi

Havanın oksidant olarak kullanıldığı bir PEM yakıt pilinde elektrik elde edilmesi için aşağıdaki reaksiyona ihtiyaç duyulmaktadır:



Üretilen ısı sistem sınırlarından taşınımı ve ışınlımla ısı transferi sonucu çevreye verilmektedir. Yukarıdaki reaksiyon gözönünde bulundurularak tersinmezliklerin termodinamiksel denklemleri yazılabilir. Bunun için ilk önce tek bir hücrenin gerilim hesaplarını yapacak olursak, belirli bir akım yoğunluğunda net çıkış gerilimi Denklem 3.27 ile hesaplanabilir (Barbir 2005):

$$V(i) = v_{tersinir} - v_{tersinmezlik} \quad (3.27)$$

olarak ifade edilebilir. Burada $v_{tersinir} = E$ tersinir hücre gerilimi veya maksimum hücre gerilimidir. $v_{tersinmezlik}$ ise hücredeki gerilim düşümünü göstermektedir. Hücrenin maksimum gerilimi reaksiyona girenler ve ürünler arasında enerji dengesi yazılarak Nernst denkleminde, Denklem 3.28 ile hesaplanabilir (Ay vd 2006):

$$E = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4} (T_{FC} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_{FC} \left[\ln(p_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(p_{O_2}) \right] \quad (3.28)$$

olarak yazılabilir. Burada T_{FC} , Kelvin cinsinden yakıt pilinin çalışma sıcaklığını, p_{H_2} ve p_{O_2} , ise bar cinsinden hidrojen ve oksijen gazlarının kısmi basıncını ifade etmektedir.

Hidrojen ve oksijen gazlarının kısmi basınçları aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$p_{H_2} = x_{H_2} P_A$$

$$p_{O_2} = x_{O_2} P_C$$

Burada x_{H_2} ve x_{O_2} sırasıyla hidrojen ve oksijenin mol oranlarıdır. P_A ve P_C ise bar cinsinden anod ve katod basınçlarıdır. Hidrojen ve oksijen gazlarının mol oranları Denklem 3.29 ve 3.30 kullanılarak bulunabilir (Haraldsson ve Wipke 2004):

$$x_{H_2} = \frac{1 - x_{H_2O,A}}{1 + \left(\frac{x_A}{2}\right) \left(1 + \frac{\zeta_A}{\zeta_A - 1}\right)} \quad (3.29)$$

$$x_{O_2} = \frac{1 - x_{H_2O,C}}{1 + \left(\frac{x_C}{2}\right) \left(1 + \frac{\zeta_C}{\zeta_C - 1}\right)} \quad (3.30)$$

Burada yer alan x_{H_2O} anod ve katoddaki suyun mol oranıdır. x_A ve x_C ise anod ve katoddaki kuru gaz mol oranını göstermektedir. ζ , anod ve katod stokiyometrilere göstermektedir. Anod ve katoddaki suyun mol oranı için aşağıdaki Denklem 3.31 ve 3.32 kullanılabilir (Rowe ve Li 2001):

$$x_{H_2O,A} = \frac{P_{sat}}{P_A} \quad (3.31)$$

$$x_{H_2O,C} = \frac{P_{sat}}{P_C} \quad (3.32)$$

Burada P_{sat} , suyun yakıt pili çalışma sıcaklığındaki doyma basıncını atm olarak göstermektedir. Doyma basıncı Denklem 3.33 yardımıyla bulunabilir:

$$P_{sat} = 10^{-2.1794 + 0.02953 \times (T_{FC} - 273) - 9.1837 \times 10^{-5} \times (T_{FC} - 273)^2 + 1.4454 \times 10^{-7} \times (T - 273)^3} \quad (3.33)$$

Aktivasyon, ohmik ve konsantrasyon gerilim kayıplarından oluşan toplam gerilim kayıpları-düşümleri ise aşağıdaki Denklem 3.34 ile bulunabilir:

$$U_{tersinmezlik} = U_{akt} + U_{ohmik} + U_{kon} \quad (3.34)$$

Tafel denklemleri anod ve katod aktivasyon kayıplarının bulunmasında kullanılabilir. Aktivasyon kayıpları elektrod yüzeylerindeki kimyasal reaksiyon hızının yavaşlığından kaynaklanmaktadır. Anoddaki aktivasyon gerilim kayıpları için Denklem 3.35'ten yararlanılabilir:

$$v_{akt,A} = \frac{RT_{FC}}{(1-\alpha)F} \ln\left(\frac{i}{i_{o,A}}\right) \quad (3.35)$$

Aynı şekilde katoddaki aktivasyon gerilim kayıpları ise aşağıdaki Denklem 3.36 ile hesaplanabilir:

$$v_{akt,C} = \frac{RT_{FC}}{\alpha_C F} \ln\left(\frac{i}{i_{o,C}}\right) \quad (3.36)$$

olarak ifade edilmektedir [3]. Burada R, üniversal gaz sabitini; α_A ve α_C anod ve katod transfer katsayılarını; F Faraday sabitini; i akım yoğunluğunu ve i_0 akım değişim yoğunluğunu göstermektedir.

Denklemlerde yer alan akım değişim yoğunluğu, anod ve katod için hücre çalışma sıcaklığı ve basıncına bağlı olarak aşağıdaki Denklem 3.37 ve 3.38 ile hesaplanabilir (Barbir 2005, Spiegel 2007):

$$i_{o,A} = i_{o,A}^{ref} (a_{catalyst} L_{catalyst})_A \left(\frac{p_{H_2}}{P_o}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{(E_C)_{H_2}}{RT_{FC}} \left(\frac{T_o - T_{FC}}{T_o}\right)\right] \quad (3.37)$$

ve

$$i_{o,C} = i_{o,C}^{ref} (a_{catalyst} L_{catalyst})_C \left(\frac{p_{O_2}}{P_o}\right) \exp\left[-\frac{(E_C)_{O_2}}{RT_{FC}} \left(\frac{T_o - T_{FC}}{T_o}\right)\right] \quad (3.38)$$

Burada $i_{o,A}^{ref}$ ve $i_{o,C}^{ref}$, referans sıcaklık (T_o) ve basınçtaki (P_o), 298 K ve 1 bar, referans akım değişim yoğunluklarıdır. $a_{catalyst}$ ise katalizin spesifik alanı ($cm^2/mgPt$) olmaktadır. $L_{catalyst}$, katalize Platinyum yükleme miktarı ($mgPtcm^{-2}$) olmaktadır. $(E_C)_{H_2}$ ve $(E_C)_{O_2}$, hidrojenin oksidasyonu ve oksijenin redaksiyonu için gerekli olan aktivasyon enerjileri ($kJmol^{-1}$) olarak tanımlanmaktadır.

Ohmik gerilim kayıpları, proton değişim membranının direncinden kaynaklanmaktadır ve Denklem 3.39 ve 3.40 yardımıyla hesaplanabilir (El-Sharkh 2004):

$$V_{ohmic} = iR_{ohmic} \quad (3.39)$$

$$R_{ohmic} = \frac{t_{mem}}{\sigma_{mem}} \quad (3.40)$$

Burada R_{ohmic} , membran direncini ve σ_{mem} ise membran iletkenliğini göstermektedir. Membran iletkenliği, membran su içeriğine (λ_{mem}) bağlı olarak Denklem 3.41'den hesaplanabilir (Amphlett vd 1995):

$$\sigma_{mem} = (0.005139\lambda_{mem} - 0.00326)\exp\left[1268\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{FC}}\right)\right] \quad (3.41)$$

Membran su içeriği ise membran su aktivitesini gösteren a kullanılarak Denklem 3.42 ile hesaplanabilir (Amphlett vd 1995a):

$$\lambda_{mem} = \begin{cases} 0.043 + 17.81a - 39.85a^2 + 36a^3, & 0 < a \leq 1 \\ 14 + 1.4(a - 1), & 1 < a \leq 3 \end{cases} \quad (3.42)$$

Konsantrasyon gerilim kayıpları, V_{conc} , yüksek akım yoğunluklarında (yakıt pilinden yüksek güç üretimi istendiğinde) reaksiyona girenlerin konsantrasyonunun artmasıyla meydana gelmektedir. Bu yüzden özellikle yüksek akım yoğunluklarında dikkate alınmalıdır. Konsantrasyon gerilim kayıplarını veren denklem literatürde (Amphlett vd 1995b) aşağıdaki Denklem 3.43 ile ifade edilmektedir:

$$v_{kon} = i \left(\beta_1 \frac{i}{i_{max}} \right)^{\beta_2} \quad (3.43)$$

Burada $\beta_1, \beta_2, i_{max}$ sıcaklığa ve reaksiyona girenlerin kısmi basıncına bağlıdır. β_2 , literatüre göre 2 olarak alınabilir (Ay vd 2006). β_1 ise Denklem 3.44'ten hesaplanabilir:

$$\beta_1 = \begin{cases} \frac{P_{O_2}}{0.1173} + P_{sat} < 2 \text{ bar ise } (7.16 \times 10^{-4} T_{FC} - 0.622) \left(\frac{P_{O_2}}{0.1173} + P_{sat} \right) + (-1.45 \times 10^{-3} T_{FC} + 1.68) \\ \text{veya} \\ \frac{P_{O_2}}{0.1173} + P_{sat} \geq 2 \text{ bar ise } (8.66 \times 10^{-5} T_{FC} - 0.068) \left(\frac{P_{O_2}}{0.1173} + P_{sat} \right) + (-1.6 \times 10^{-4} T_{FC} + 0.54) \end{cases} \quad (3.44)$$

Sonuç olarak tek bir hücrenin verebileceği güç ifadesi Denklem 3.45'deki gibidir:

$$\dot{W}_{FC} = V(i) \times i \quad (3.45)$$

Yakıt pili dizininin gücü ise aşağıdaki Denklem 3.46 ile hesaplanmaktadır:

$$\dot{W}_{FC\ stack} = V(i) \times i \times N_{cell} \times A_{cell} \quad (3.46)$$

olmaktadır. Burada N_{cell} , dizini oluşturan hücre sayısını, A_{cell} ise efektif hücre alanını göstermektedir. Yakıt pili dizininin enerji verimi ise \dot{W}_{net} ve $\dot{m}_{H_2, in}$ verilerine bağlı olarak Denklem 3.47 ile aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$\eta_{enerji, sistem} = \frac{\dot{W}_{net}}{(HHV_{H_2} \dot{m}_{H_2})_{in}} \quad (3.47)$$

\dot{W}_{net} yakıt pili sistemi tarafından üretilen net gücü göstermektedir. Sisteme oksidant havayı sağlayan kompresörün ve soğutma havasını sağlayan fanın güç ihtiyacının yakıt pili sistemi tarafından sağlandığı gözönüne alınırsa Denklem 3.48'deki gibidir:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{FC\ stack} - \dot{W}_{blower} - \dot{W}_{fan} \quad (3.48)$$

PEM yakıt pillerinin efektif kullanımını ve termodinamik kanunlarına dayanan gerçek performansını belirleyebilmek oldukça önemli olmaktadır. Teorik olarak, birinci kanuna dayanan verim analizi olanaklı en iyi performansı göstermemekte ve yanıltıcı olmaktadır. Diğer taraftan, üretilen elektrik gücünün maksimum elde edilebilecek güce

oranı olan ikinci kanun verimi veya ekserji verimi, gerçek bir performans analizi için gereklidir.

Eğer kinetik ve potansiyel ekserjiler ihmal edilirse, birim kütle için toplam ekserji akışı Denklem 3.49'da gösterildiği gibi fiziksel ve kimyasal ekserjilerin toplamından oluşmaktadır:

$$ex = ex_{ph} + ex_{ch} \quad (3.49)$$

Fiziksel ekserji, Denklem 3.50 ile aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$ex_{ph} = (h - h_o) - T_o (s - s_o) \quad (3.50)$$

Eğer tepkimeye giren gazlar ideal gaz olarak kabul edilirse, fiziksel ekserji aşağıdaki Denklem 3.51'e dönüşür:

$$ex_{ph} = c_p (T - T_o) - T_o \left[c_p \ln \left(\frac{T}{T_o} \right) - R \ln \left(\frac{P}{P_o} \right) \right] \quad (3.51)$$

Kimyasal ekserji, Denklem 3.52 yardımı ile bulunabilir:

$$ex_{ch} = \sum x_n ex_{ch}^n + RT_o \sum x_n \ln x_n \quad (3.52)$$

Yakıt pili sisteminin ekserji verimi Denklem 3.53 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\psi_{FC} = \frac{\dot{W}_{output}}{\dot{E}_{H_2} + \dot{E}_{air}} \quad (3.53)$$

Tepkimeye giren hidrojen ve havanın ekserjisi, fiziksel ve kimyasal ekserjilerinin toplamından oluşmaktadır. Elektrolizör ve yakıt pilinde meydana gelen tepkimelerin girenleri ve ürünlerinin standart kimyasal ekserjileri Tablo 3.2'de gösterilmektedir.

Tablo 3.2 Elektrolizör ve yakıt pilinde meydana gelen tepkimelerin girenleri ve ürünlerinin standart kimyasal ekserjileri (Kotas 1985, WEB_7 2008).

Giren/Ürün	Kütle oranları, x_i	Standart kimyasal ekserjiler, ex_0^{ch} (kJ/kg)
Havanın bileşenleri		
O ₂	0.207	124
N ₂	0.775	25.71
H ₂ O	0.018	50.55
H ₂	1	118050

Sonuç olarak, sistem ana elemanlarının enerji ve ekserji verimleri Tablo 3.3'deki gibi gösterilebilir.

Tablo 3.3 Güneş-hidrojenli bir hibrid enerji sisteminin elemanlarının enerji ve ekserji verimi denklemleri.

Eleman	Enerji Verimi Denklemi	Ekserji Verimi Denklemi
Güneş Pili Panelleri	$\eta_{PV} = \frac{\dot{W}_{PV}}{S_T \cdot A}$	$\psi_{PV} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} - \sum \dot{I}}{\dot{E}x_{solar}}$
Şarj Regülatörleri	$\eta_{CR} = \frac{\dot{W}_{DC\ output}}{\dot{W}_{DC\ input}}$	$\psi_{CR} = \frac{\dot{W}_{DC\ output}}{\dot{W}_{DC\ input}}$
Aküler	$\eta_B = \frac{\dot{W}_{DC\ output}}{\dot{W}_{DC\ input}}$	$\eta_B = \frac{\dot{W}_{DC\ output}}{\dot{W}_{DC\ input}}$
İnvertörler	$\eta_{IN} = \frac{\dot{W}_{AC\ output}}{\dot{W}_{DC\ input}}$	$\psi_{IN} = \frac{\dot{W}_{AC\ output}}{\dot{W}_{DC\ input}}$
Elektrolizör	$\eta_{EL} = \frac{\dot{m}_{H_2} \cdot HHV_{H_2}}{\dot{W}_{input}}$	$\psi_{EL} = \frac{\dot{E}x_{output}}{\dot{W}_{input}} = \frac{\dot{E}x_{H_2} + \dot{E}x_{O_2}}{\dot{W}_{input}}$
Yakıt Pili Sistemi	$\eta_{FC} = \frac{\dot{W}_{output}}{\dot{m}_{H_2} \cdot HHV_{H_2}}$	$\psi_{FC} = \frac{\dot{W}_{output}}{\dot{E}x_{input}} = \frac{\dot{W}_{output}}{\dot{E}x_{H_2} + \dot{E}x_{air}}$

4. PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ GÜNEŞ-HİDROJENLİ ENERJİ SİSTEMİ

4.1. Genel

Günümüzde hidrojen konusunda yapılan çalışmaların büyük bir kısmı, yenilenebilir enerji kaynaklarının birincil enerji kaynağı olarak hidrojen eldesinde kullanıldığı hibrid enerji sistemleridir. Hidrojen bu yenilenebilir enerji kaynaklarının depolanmasında ve enerjinin taşınmasında kullanılmaktadır. Sistemin tasarımı ve çalışma şekli, bu birincil enerji kaynaklarının türü ve mevcudiyetine bağlı olmaktadır. Birincil enerji kaynağı olarak güneş enerjisinin kullanıldığı hidrojen sistemlerinden birinin de kurulumu Şubat 2007 itibarıyla Pamukkale Üniversitesi'nde gerçekleştirilmiştir. Bu güneş-hidrojen sisteminin kurulumunun finansal desteği DPT (Devlet Planlama Teşkilatı) ve Siemens, Nexans, Bereket Enerji gibi özel şirketler tarafından sağlanmıştır. Sistem için, 165 m² taban alanına sahip bir müstakil araştırma laboratuvarı Bereket Enerji şirketi tarafından inşa edilerek, üniversiteye bağışlanmıştır. Şekil 4.1'de "Pamukkale Üniversitesi Temiz Enerji Evi" olarak adlandırılan yapının fotoğrafı yer almaktadır.



Şekil 4.1 Pamukkale Üniversitesi Temiz Enerji Evi.

4.2. Sistem Ana Elemanlarının Boyutlandırılması ve Seçimi

Elektrik ihtiyacına göre ilk önce yakıt pili seçilmektedir. Bu yüzden bir ev içerisinde kullanılması muhtemel AC elektrik ihtiyacı olan cihazlar Tablo 4.1'deki gibi belirlenmiştir.

Tablo 4.1 Anlık güç ihtiyacının kullanılan cihazlara göre dağılımı.

AC Cihazlar	Güç Tüketimi (W)	Sayısı	Anlık Güç İhtiyacı (W)
Aydınlatma	25	15	375
Buzdolabı	160	1	55
Bulaşık Makinası	50	1	50
Çamaşır Makinası	60	1	60
Televizyon	60	1	60
Bilgisayar	100	5	500
Müzik Seti	100	1	100
Kahve Makinası	200	1	200
Elektrikli Süpürge	300	1	300
Saç Kurutma Makinası	200	1	200
Aspiratör	180	1	180
TOPLAM			2235

Tablo 4.1'de belirtilen 2235 W'lık güç ihtiyacını karşılayabilecek yakıt pili sistemi gerekli olmaktadır. Yakıt pili seçiminde, ticari olarak satılan ve düşük sıcaklıkta çalışan proton değişim membranlı yakıt pili sistemleri dikkate alınmıştır. Yapılan değerlendirme sonucu, elektrik enerjisi tüketen bazı cihazların indüktif ve kapasitif yük karakteristikleri dolayısıyla ilk kalkış anlarında veya çalışma esnalarında daha fazla güç tüketebilecekleri hesaba katılmıştır. Bu yüzden seçimi yapılan yakıt pili sisteminin en az 2400 W anlık güç ihtiyacını karşılayabilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, ticari olarak Nexa Güç Modülü olarak bilinen ve Ballard tarafından 2001 yılında piyasaya sürülen PEM tipindeki, toplam 2400 W güç çıkışını karşılayabilen iki adet yakıt pili sistemi güneş-hidrojenli hibrid enerji sisteminde kullanılmak üzere seçilmiştir (NEXA 2003).

Yakıt pili sisteminin gücü belirlendikten sonra yakıt pili sisteminin hidrojen debisi ihtiyacı Denklem 4.1 ile hesaplanabilir.

$$q_{fc} = \frac{\dot{W}_{fc}}{\eta_{fc} HHV_{H_2} \rho_{H_2}} \quad (4.1)$$

Burada q_{fc} , nominal güçteki hidrojen tüketim debisi (m^3/h), \dot{W}_{fc} , nominal yakıt pili gücü (kW); η_{fc} , nominal güçte yakıt pili verimi (%); HHV_{H_2} , hidrojenin üst ısı değeri (39.4 kWh/kg) ve ρ_{H_2} , hidrojenin yoğunluğu (0.0899 kg/m^3) olmaktadır.

Çalışma süresince gerekli olan hidrojen miktarı ise gerekli olan hidrojen debisinin bulunması ile Denklem 4.2 kullanılarak elde edilebilir.

$$Q = q_{fc} \cdot CF_{fc} \cdot \tau_{fc} \quad (4.2)$$

Burada, Q , hidrojen tüketimi (m^3); CF_{fc} , yakıt pilinin kapasite faktörü (ortalama güç/nominal güç) ve τ_{fc} , yakıt pilinin günlük çalışma süresi (saat) olmaktadır.

Çalışma çevrimi boyunca, yakıt pilinin gücü ($CF_{fc} < 1$) olacak şekilde değişebilir. Yakıt pilinin verimi alınan gücün bir fonksiyonudur. Hidrojen tüketiminin tam olarak hesaplanabilmesi için güç/verim ilişkisi bilinmelidir. Hidrojen depolama hacmi ise Denklem 4.3 ile bulunabilir.

$$V = QP_oZ/P \quad (4.3)$$

Burada, V , depo hacmi (m^3); P , depo basıncı (bar); P_o , Standard atmosferik basınç (1 bar) ve Z ise hidrojenin sıkıştırılabilirliğini belirtmektedir.

Elektrolizör tarafından üretilen hidrojenin yüksek basınçta depolanması istenirse kompresör kullanılmaktadır. Bu durumda, kompresörün çektiği güç ayrıca hesaba katılmalıdır.

Elektrolizör tarafından üretilen hidrojenin debisi, üretilmesi gereken hidrojen miktarı bulunduktan sonra Denklem 4.4 ile hesaplanabilir:

$$q_{el} = \frac{Q}{CF_{el} \tau_{el}} \quad (4.4)$$

Burada, q_{el} , elektrolizörün nominal hidrojen üretim debisi (m^3/h); CF_{el} , elektrolizörün kapasite faktörü (ortalama güç/nominal güç) ve τ_{el} elektrolizörün çalışma süresi (saat) olmaktadır.

Elektrolizörün güç ihtiyacının tamamının güneş pili panelleri tarafından karşılanabilmesi gerekmektedir. Bu yüzden, güneş pili panellerinin seçiminde elektrolizörün güç ihtiyacı önem kazanmaktadır. Elektrolizör için gerekli güç miktarı Denklem 4.5 ile bulunmaktadır.

$$\dot{W}_{el} = q_{el} HHV_{H_2} \rho_{H_2} / \eta_{el} \quad (4.5)$$

Burada, \dot{W}_{el} , elektrolizörün nominal güç ihtiyacı (kW) ve η_{el} , nominal güçte elektrolizörün verimi (%) olmaktadır.

Çalışma çevrimi boyunca, elektrolizör güç ihtiyacı, güneş pili panellerinin ürettiği güce bağlı olarak değişir. Elektrolizörün verimi hidrojen üretim debisinin fonksiyonudur. Elektrolizörün ihtiyaç duyduğu güç bilinen bazı yakıt pili ve elektrolizör parametreleri ile Denklem 4.6 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\dot{W}_{el} = \dot{W}_{fc} \frac{1}{\eta_{el} \eta_{fc}} \frac{CF_{fc} \tau_{fc}}{CF_{el} (24 - \tau_{fc})} \quad (4.6)$$

Elektrolizör için gerekli olan ve güneş pili panellerinden alınan güç ise Denklem 4.7 ile hesaplanabilir.

$$\dot{W}_{PV} = \dot{W}_{el} / \eta_{PC} \quad (4.7)$$

Burada; η_{PC} , güneş pili panelleri ve elektrolizör arasındaki güç (gerilim-voltaj) dönüşüm verimi olmaktadır. Bu dönüşüm veriminin bulunmasında güneş pili panellerinden elektrolizöre kadar olan enerji akışındaki kayıplar (kablo kayıpları, hat kayıpları vb.) ve bu hattaki kullanılan cihazların verimleri (şarj regülatörleri, invertör ve konverler) dikkate alınmalıdır.

Aynı zamanda, PV sistemi gün boyunca elektrik enerjisi ihtiyacını sağlayabilmelidir. Bu yüzden PV sisteminin gücü aşağıdaki Denklem 4.8 ile bulunabilir.

$$\dot{W}_{PV} = \dot{W}_{el} / \eta_{PC} + \dot{W}_{yük} / \eta_{PC2} \quad (4.8)$$

Burada η_{PC2} , güneş pili ve yük arasındaki güç dönüşüm verimidir.

Sonuç olarak; bilinen parametrelerden ve yukarıdaki formüller yardımı ile sistem elemanlarının gereksinimleri Tablo 4.2'deki gibi bulunabilir.

Tablo 4.2 Güneş-hidrojenli sistemin ana elemanlarının gereksinimleri.

Sistemin Ana Elemanlarının Gereksinimleri	Değeri
Yakıt pili gücü (kW)	2.40
Yakıt pili verimi (%)	33
Yakıt pilinin hidrojen debisi gereksinimi (m ³ /h)	2.17
Yakıt pilinin günlük çalışma süresi (saat)	12.00
Yakıt pilinin kapasite faktörü	0.125
Hidrojen deposu (m ³)	3.26
Yakıt pili giriş basıncı (bar)	14.00
Depo hacmi (m ³)	0.23
Elektrolizör kapasite faktörü	0.40
Elektrolizör kapasitesi (m ³ /h)	0.68
Elektrolizör verimi (%)	53
Elektrolizör güç tüketimi (W_{el}) (kW)	4.29
Güç dönüşüm verimi (%)	0.92
PV gücü (kW)	4.66

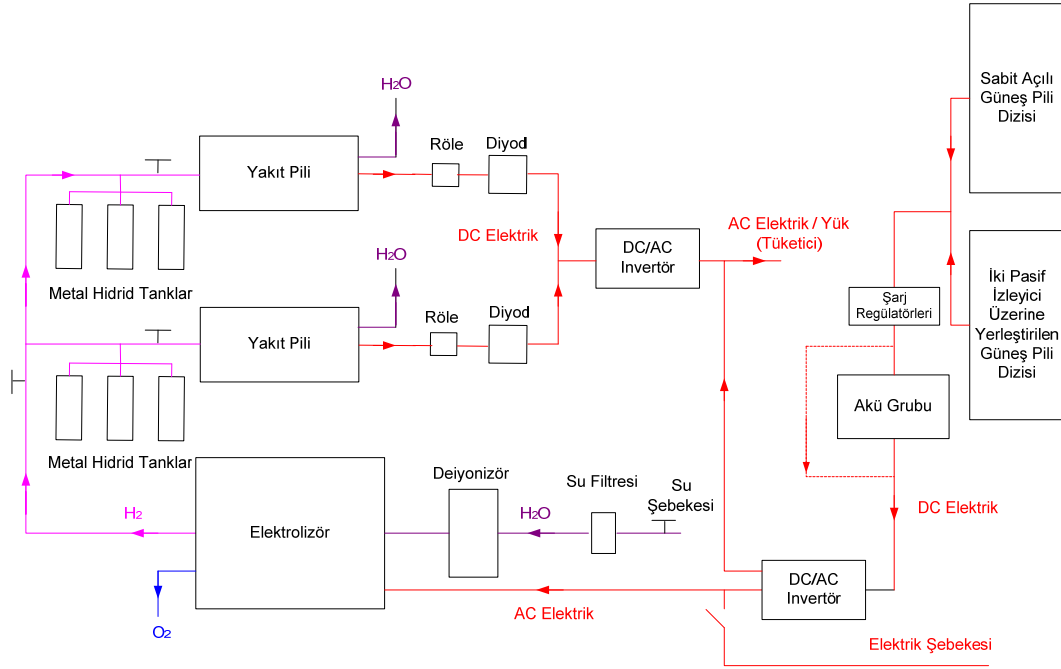
Güneş pili panellerinin kurulu gücünün en az 4.66 kW olması gerektiği Tablo 4.2'den görülmektedir. Bu gereksinimler sonucu ticari olarak üretilen Tablo 4.3'deki elemanlar sistemde kullanılmak üzere seçilmiştir.

Tablo 4.3 Pamukkale Üniversitesi güneş-hidrojenli hibrid enerji sistemi için seçilen ana elemanlar ve özellikleri

Eleman	Özellikler
Güneş Pilleri	<ul style="list-style-type: none"> - İzleyici üzeri (2.5 kWp) ve sabit (2.5 kWp) – her panel 125 Wp. - Toplam kurulu güç: 5 kWp. - Kyocera.
İzleyiciler	<ul style="list-style-type: none"> - Zomeworks
İnvertör	<ul style="list-style-type: none"> - 1. İnvertör: 52 VDC ve 5 kW, sinus tip.
Şarj Regulatorü	<ul style="list-style-type: none"> - 6 adet; 40 A.
Aküler	<ul style="list-style-type: none"> - 16 adet; 12 V, 150 Ah.
İnvertör	<ul style="list-style-type: none"> - 2. İnvertör: 52 VDC ve 2.5 kW, sinus tip.
Deiyonizör	<ul style="list-style-type: none"> - Su üretimi: max. 1.2 l/dk. - ASTM Type I water. - Easypure II, Line Feed.
Elektrolizör	<ul style="list-style-type: none"> - PEM tipi - Su ihtiyacı: 0.47 l/h; 1.5-4 barg; ASTM Type I-II - Net H₂ üretimi: 0.53 Nm³/h, %99.9995 saflığında. - Güç tüketimi: 6.7 kWh/Nm³. - Proton Energy Systems Inc., (HOGEN S20).
Metal Hidrid Tanklar	<ul style="list-style-type: none"> - 5400 litre (6 adet her biri 900 litre kapasiteli metal hidrid tank). - Ovonic Hydrogen Systems Inc.
PEM Yakıt Pili Sistemi	<ul style="list-style-type: none"> - PEM tipi - 2 adet (toplam net güç üretim kapasitesi: 2.4 kW). - Güç üretimi: 1.2 kW, 22-50 VDC, Gerilim: 26 VDC, Akım: 46 A. - Yakıt: %99.99 H₂; 18.5 Sl/dk; 0.7-16 barg. - Su üretimi: 870 ml/h. - Heliocentris Energy Systems Inc., Ballard.

4.3. Sistemin Tanıtımı

5 kWe gücünde güneş pili panelleri ve 2.4 kWe yakıt pili sisteminden oluşan güneş-hidrojenli sisteminin akış şeması Şekil 4.2’de görülmektedir. Hibrid enerji üretim sistemi toplam 5 kWe gücündeki 40 adet güneş pili panelleri, 6 adet şarj regülatörü, 16 adet akü, “Temiz Enerji Evi”nin elektrik ihtiyacının karşılanmasında DC elektriği AC elektriğe dönüştüren 2 adet invertör, elektrolizörün hidrojen üretmesi için gerekli olan su kalitesinin sağlanması için kullanılan deiyonizör, suyun elektroliz edilerek hidrojenin elde edilmesini sağlayan elektrolizör, üretilen hidrojenin katı halde depolanmasını sağlayan 6 adet metal hidrid tank ve 2 adet yakıt pili sisteminden oluşmaktadır.

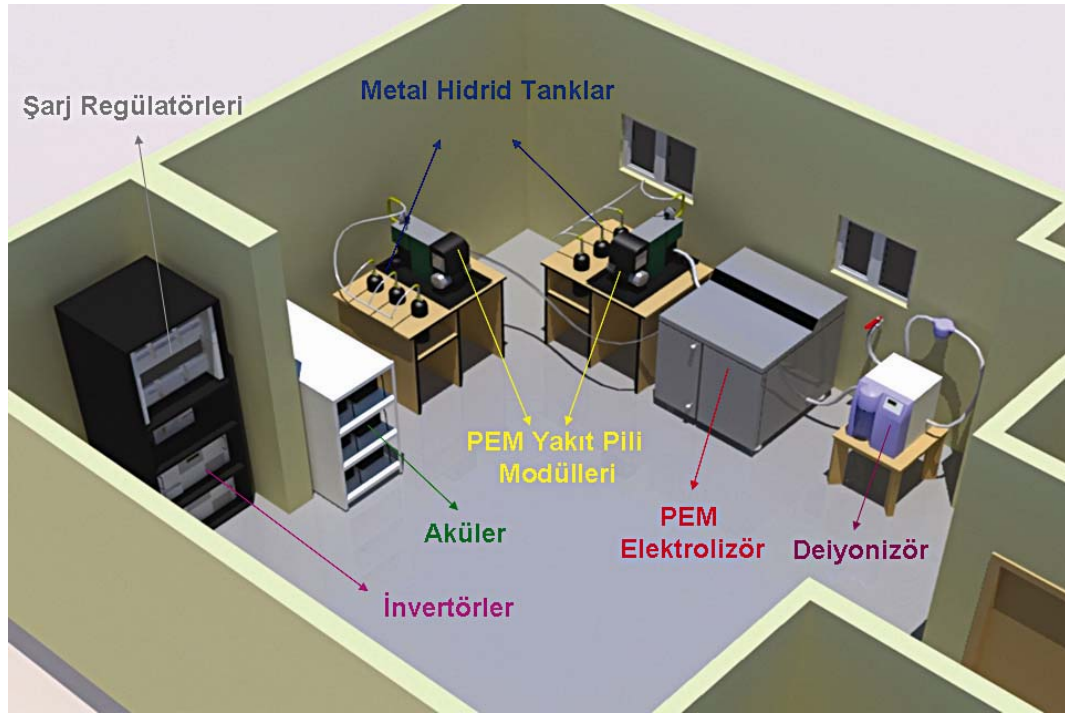


Şekil 4.2 Pamukkale Üniversitesi güneş-hidrojenli sisteminin şematik görünümü.

Şekil 4.2’de gösterilen Pamukkale Üniversitesi güneş-hidrojen hibrid enerji sisteminde güneş pili panelleri tarafından üretilen DC elektrik enerjisi ilk olarak şarj regülatörlerine gelmektedir. Şarj regülatörleri tarafından DC gerilim kontrolü ve bus bara uygun gerilim olan 48 VDC’nin verilmesi sağlanmaktadır. Şarj regülatörleri ayrıca aküyü ters gerilimden korumakta ve kendi kendine deşarj olmasını önlemektedir. Şarj regülatörlerinden sonra elektrik ihtiyacının miktarına göre doğrudan güneş pili panellerinden elektrik enerjisinin karşılanması gerçekleştirilmektedir. Bu amaçla 5 kW

gücünde ve 52 VDC'ye kadar giriş gerilimine izin veren bir DC/AC invertör kullanılmaktadır. Eğer elektrik ihtiyacı, güneş pili panelleri tarafından üretilen elektrik enerjisinden daha düşük bir değere sahipse sistemde fazla elektrik enerjisinin kimyasal olarak depolanmasını sağlayan aküler ve hidrojen üretiminde üretilen ve tüketilen elektrik enerjisi arasındaki fark kadar olan fazla elektrik enerjisi akülere veya hidrojen üretimi için elektrolizöre yönlendirilmektedir. Kurulan güneş-hidrojenli sistemde, fazla elektrik enerjisinin yönlendirilmesinin kontrolü işlemi manual olarak, bir elektrik panosundaki anahtarlama düzeneği ile gerçekleştirilmektedir. Fazla elektrik enerjisinin depolanmasında ilk öncelik akülere verilmiştir. Bunun temel nedeni, hidrojen üretiminin maliyetli olması, ayrıca hidrojen yolundaki elektrolizör ve yakıt pili sistemlerinin ömürlerinin az olmasıdır. Akülerde depolanan elektrik enerjisinin akü kapasitesini aşması durumunda ise fazla elektrik enerjisi DC/AC invertör üzerinden AC elektrik enerjisi ile çalışan elektrolizöre gönderilmektedir. Suyun elektrolizinin gerçekleştirildiği elektrolizördeki hücrelerin sorunsuz çalışmaları amacıyla gerekli olan su kalitesi ise bir deiyonizör ile sağlanmaktadır. Elektrolizör tarafından üretilen hidrojen, güvenli bir depolama biçimi olan metal hidrid tanklarda depolanmaktadır. Elektrolizörün ürettiği oksijen ise atmosfere verilerek depolanmamaktadır. Elektrik enerjisine ihtiyaç duyulduğunda ise metal hidrid tanklardaki hidrojenden yararlanılarak havanın oksijeni ile elektrokimyasal enerji dönüşümünü gerçekleştiren iki adet yakıt pili sistemi ile elektrik üretilmektedir. Üretilen DC elektrik enerjisi, 5 kW gücünde ve 52 VDC'ye kadar giriş gerilimine izin veren ikinci bir invertör vasıtasıyla "Temiz Enerji Evi"nde bulunan AC elektrik enerjisi ile çalışan cihazların elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanmasında kullanılmaktadır.

Şekil 4.3'de ise Pamukkale Üniversitesi kampüsü içerisinde kurulan güneş-hidrojenli hibrid enerji sisteminin güneş pili panelleri dışındaki ana bileşenlerinin "Temiz Enerji Evi" içerisindeki yerleşimi gösterilmektedir. Güneş pili panellerinin yarısı "Temiz Enerji Evi"nin çatısına, diğer yarısı ise pasif güneş takip sistemlerine monte edilmiştir. Pamukkale Üniversitesi kampüsünde kurulan güneş-hidrojenli hibrid enerji sisteminin her bir elemanın özellikleri ve sistemdeki görevleri ilerleyen kısımlarda açıklanmaktadır.



Şekil 4.3 Pamukkale Üniversitesi güneş-hidrojen sisteminin ana elemanları.

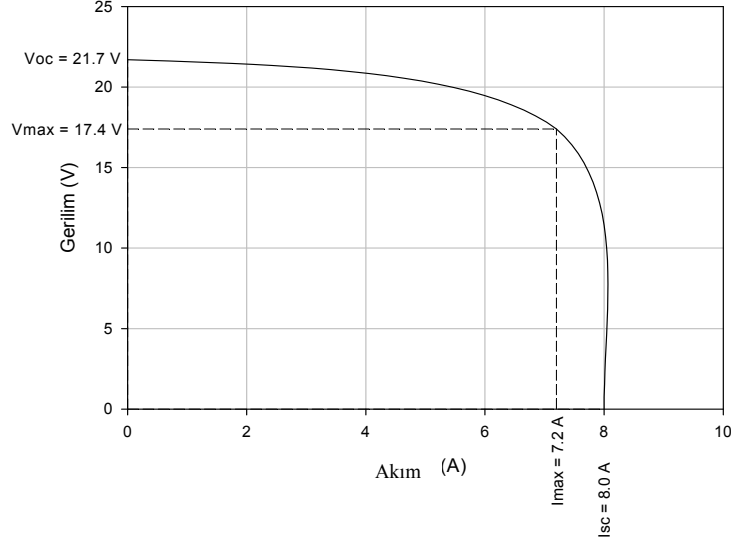
4.4. Sistem Elemanlarının Özellikleri

4.4.1. Güneş pili panelleri

Sistemde, 125 kWe güç veren Kyocera firmasına ait güneş pili panelleri seçilmiştir. Seçilen Kyocera KC125GHT-2 güneş pili panellerinin bazı özellikleri aşağıda belirtildiği gibidir (WEB_7 2008):

- Tip: Polikristal
- Maksimum pik güç: 125 We (+%10 / -%5)
- Maksimum gerilim: 17.4 V
- Maksimum akım: 7.2 A
- Açık devre gerilimi: 21.7 V
- Kısa devre akımı: 8.0 A
- Boyutları: 1425mmx652mmx62mm

Güneş pili paneline ait Akım – Gerilim karakteristik eğrisi 1000 W/m^2 ve 25°C çevre sıcaklığı için Şekil 4.4'teki gibi olmaktadır.

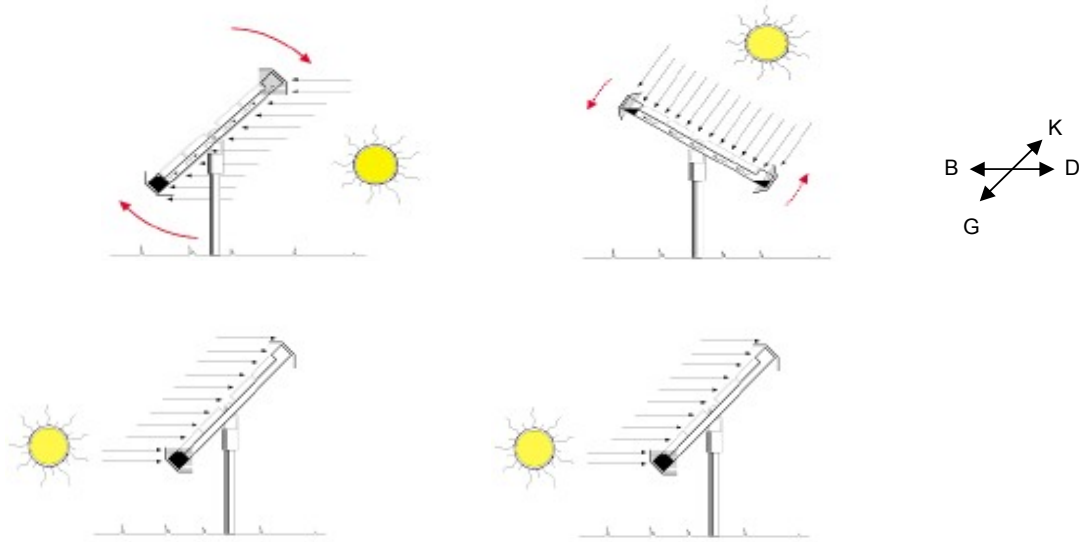


Şekil 4.4 Kyocera KC125GHT-2 güneş pili panellerinin akım – gerilim karakteristiği.

4.4.2. Güneş izleyicileri

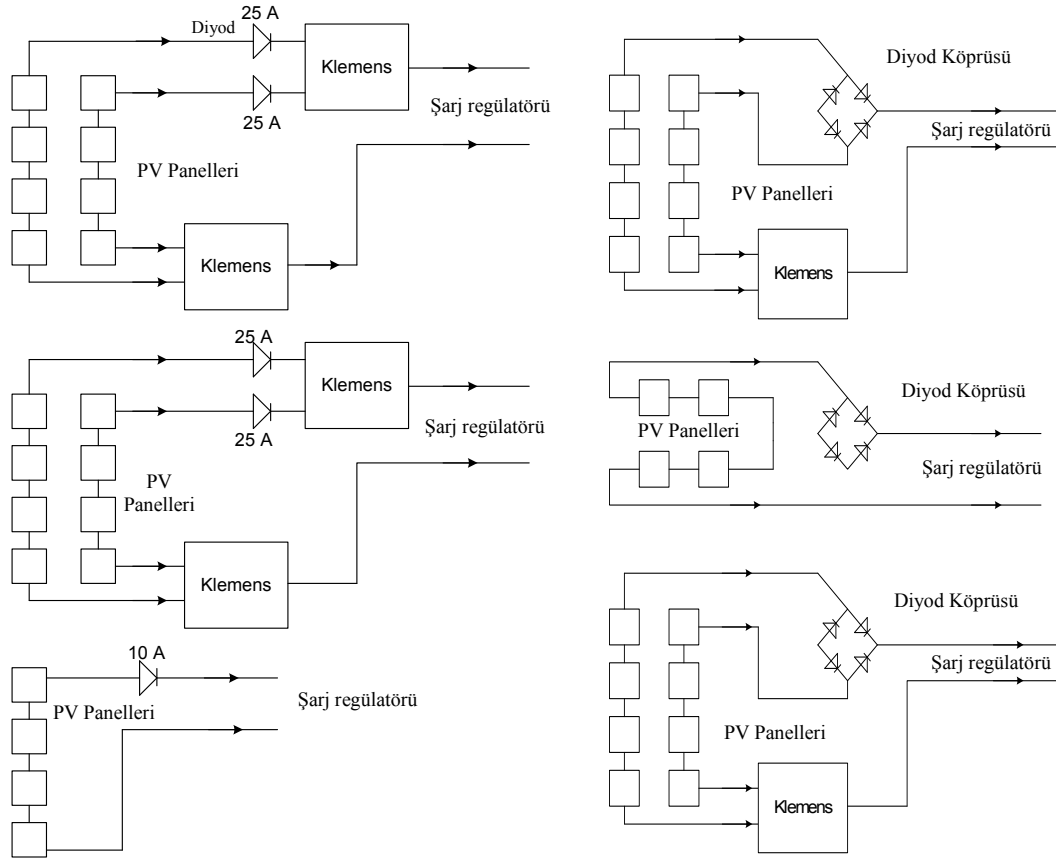
Zomeworks firması tarafından üretilen UTRF-120 model, iki adet pasif güneş izleyicisi sistemde kullanılmıştır. Parazitik yüklerin (motor gücü vb.) sisteme ilave edilmemesi için bu tip izleyiciler seçilmiştir. Soğutucu akışkanın, profilin iki ucunda buharlaşıp, yoğuşması sonucu hareketi ile güneşi termal prensiple tek eksenle takip etmektedir. Kullanılan pasif izleyiciler, aktif izleyicilerde kullanılan sensör ve mikrokontrol ünitelerine ihtiyaç duymamaktadır. Işınımın ısı transferi yoluyla güneşi takip eden ve doğu, batı kısımlarında birer depolayıcı boru bulunan bu pasif izleyicilerin hareketi kısaca Şekil 4.5'deki gibi gerçekleşmektedir. İzleyiciler gün batımında batı yönünde olmaktadır. Güneş doğduğunda gölgede kalmayan batı tarafındaki boruyu ısıtmakta ve içindeki sıvı akışkan ince bir bakır borudan geçerek gölgede kalan doğu tarafındaki boruya yönelmektedir. Sıvı doğu tarafındaki boruya hareket ederken, izleyici doğuya doğru dönmektedir. Sıvının ısınması alüminyum gölgelikler sayesinde kontrol edilmektedir. Doğu ve batıda yer alan borulardan herhangi biri daha fazla ısındığında, içindeki buharın basıncı artarak sıvıyı daha soğuk ve

gölgelenmiş tarafa itmektedir. Sıvının ağırlığındaki farklılık izleyicilerin boruların eşit gölgelenmesine kadar dönmesine sebep olmaktadır. Güneşin hareketiyle, izleyiciler güneşi yaklaşık 15°/saat hızla takip edebilmektedir. İzleyici hareketi, günlük çevrimlerini batıda tamamlamaktadır. Ertesi güne kadar, tüm gece bu yönde kalmaktadır.



Şekil 4.5 Zomeworks tarafından üretilen güneş izleyicilerinin gün içindeki hareketleri (WEB_8 2006).

PV panellerinin yarısı sabit eğimde (45°) olan profillerin, diğer yarısı ise izleyicilerin üzerine yerleştirilmiştir. Sabit eğimli güneşe bakan güneş panelleri “Temiz Enerji Evi”nin çatısında bulunmaktadır. İki adet UTRF-120 model Zomeworks güneş izleyicileri güneş pili panellerinin ölçüsüne göre seçilmiştir. Her bir izleyici üzerinde 10 adet, 1.25 kWe maksimum güç verebilen güneş pili panelleri monte edilmiştir. Şekil 4.6’da güneş pili paneller arasındaki elektrik bağlantıları ve oluşturulan grupların görünümü yer almaktadır. Güneş pili panel gruplarından gelen elektrik enerjisi 45A’lık altı adet şarj regülatörlerine Şekil 4.6’daki gibi girmektedir. Şarj regülatörlerinin çıkışları ise kullanılan akü grubunun giriş gerilimine uygun olarak 48 VDC’lik bir bus bara bağlanmaktadır.



Şekil 4.6 Sabit eğimli ve izleyici üzerine yerleştirilen güneş panellerinin elektrik bağlantıları.

Şekil 4.6’da görüldüğü gibi şarj regülatörlerinden önce 6 grup güneş pili dizisi oluşturulmuştur. Kurulan PV panellerinin fotoğrafları Şekil 4.7’de yer almaktadır.



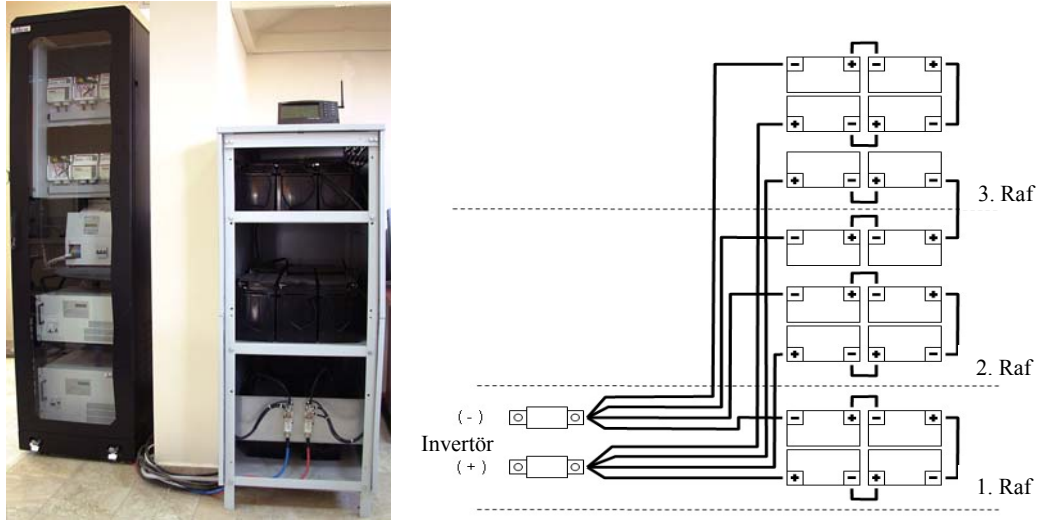
Şekil 4.7 Pamukkale Üniversitesi’nde kurulan güneş panellerinin fotoğrafları.

4.4.3. Aküler, invertörler ve şarj regülatörleri

Bu cihazların bazı özellikleri aşağıdaki gibidir:

- Aküler: 12 V; 150 Ah; 16 adet, kuru tip bakımsız Kurşun-Asit aküler.
- İnvörtörler: Güneş pili panellerine ait ilk invertörün giriş gerilimi 52 VDC ve gücü 5 kW; yakıt pillerine ait ikinci invertörün giriş gerilimi 52 VDC ve gücü 2.5 kW'dır.
- Şarj regülatörleri: 6 adet; çıkış gerilimleri 45 A'dır.

Bu cihazların yanısıra, akülerin şehir elektrik şebekesinden beslenebilmesine olanak sağlayan ve ancak özel durumlarda kullanılması düşünülen şarj cihazı bulunmaktadır. Bu şarj cihazı ve invertörler, şarj regülatörleri için kabin bulunmaktadır. Kabinin fotoğrafı ve akü grubunun 4 kolda dörder adet akü içeren elektrik bağlantısı Şekil 4.8'deki gibidir.



Şekil 4.8 Şarj regülatörleri, şarj cihazı, invertörler, akülerin kabini ve akülerin elektrik bağlantısı.

4.4.4. Deiyonizör

Elektrolizörün ihtiyaç duyduğu kalitede su sağlamak amacıyla, su şebekesinden beslenen ve Şekil 4.9'da görülen EASYPURE II LF (Line Feed) deiyonizör seçilmiştir. Şehir şebekesinden gelen suyun içindeki katı partiküllerin tutulması ve deiyonizör

kartuşlerinin ömrünün uzatılması amacıyla pislik tutucu bir su filtresi deiyonizörden önce kullanılmaktadır. Deiyonizörün sağladığı suyun özellikleri aşağıda belirtilmiştir (WEB_9):

- Su üretimi: max. 1.2 l/dk.
- ASTM Type I su kalitesi.



Şekil 4.9 Şehir suyundan saf su elde etmek için kullanılan deiyonizör ünitesi.

4.4.5. Elektrolizör

Hidrojen üretimini gerçekleştiren ve Şekil 4.10'da görülen ticari tip HOGEN S20 elektrolizörün özellikleri aşağıdaki gibidir (HOGEN 2005):

- PEM tipi.
- Yaklaşık 6.7 kWh/m³ güç tüketimi.
- 50-60 hz 205-240 VAC gerilim ihtiyacı.
- 0.47 l/h su ihtiyacı.
- %99.9995 saflığında H₂.
- 13.8 bar H₂ çıkış basıncı.

- min ASTM Tip II saf su (< 1 micro Siemen/cm, >1 megOhm-cm) ve ASTM Type I (< 0.1 micro Siemen/cm, > 10 megOhm-cm).



Şekil 4.10 Suyun elektrolizini sağlayarak hidrojen elde edilmesinde kullanılan elektrolizör ünitesi.

4.4.6. Metal hidrid hidrojen depolama tankları

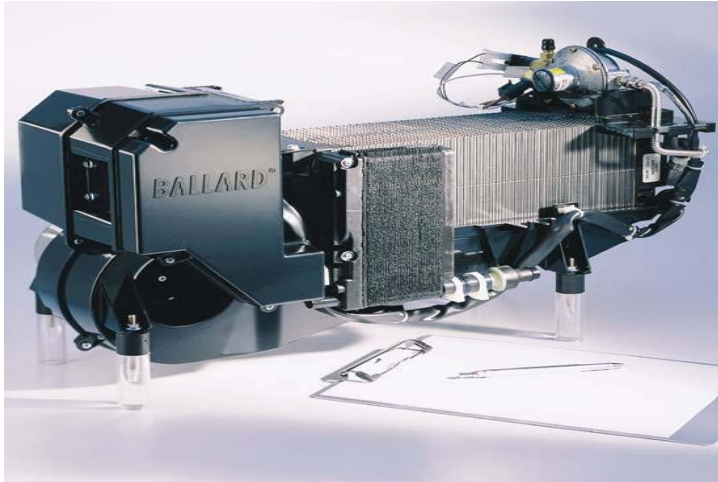
Güneş pilleri ile üretilen elektriğin akülerde depolanmasından sonra artan elektrik enerjisi ile elektroliz işlemi yapılarak hidrojen elde edilmektedir. Sistemde, güvenli bir depolama şekli olan Metal Hidrid (MH) tankları kullanılmaktadır. Kullanılan 6 adet OVONIC 85G250B Taşınabilir Hidrojen Tankları'nın özellikleri aşağıdaki gibidir (WEB_10):

- 17 bar basınca kadar H₂ depolama.
- 80 g, 900 standart litre H₂ kapasitesi.
- 0-75 °C çalışma sıcaklığı, (-29)-(+54) °C depolama sıcaklığı.

Bu tanklar, hidrojenin üst ısıl değerine göre yaklaşık 18.9 kWh enerji depolanmasına olanak sağlamaktadır. Depolanan bu enerji 1000 W'lık yükü, yakıt pilinin veriminin %45 olması durumunda, 8.5 saat karşılayabilmektedir. Metal hidrid tankların hidrojen adsorbsiyon ve desorbsiyon süreçlerinde hız artışını sağlamak için su banyosu kullanılmaktadır.

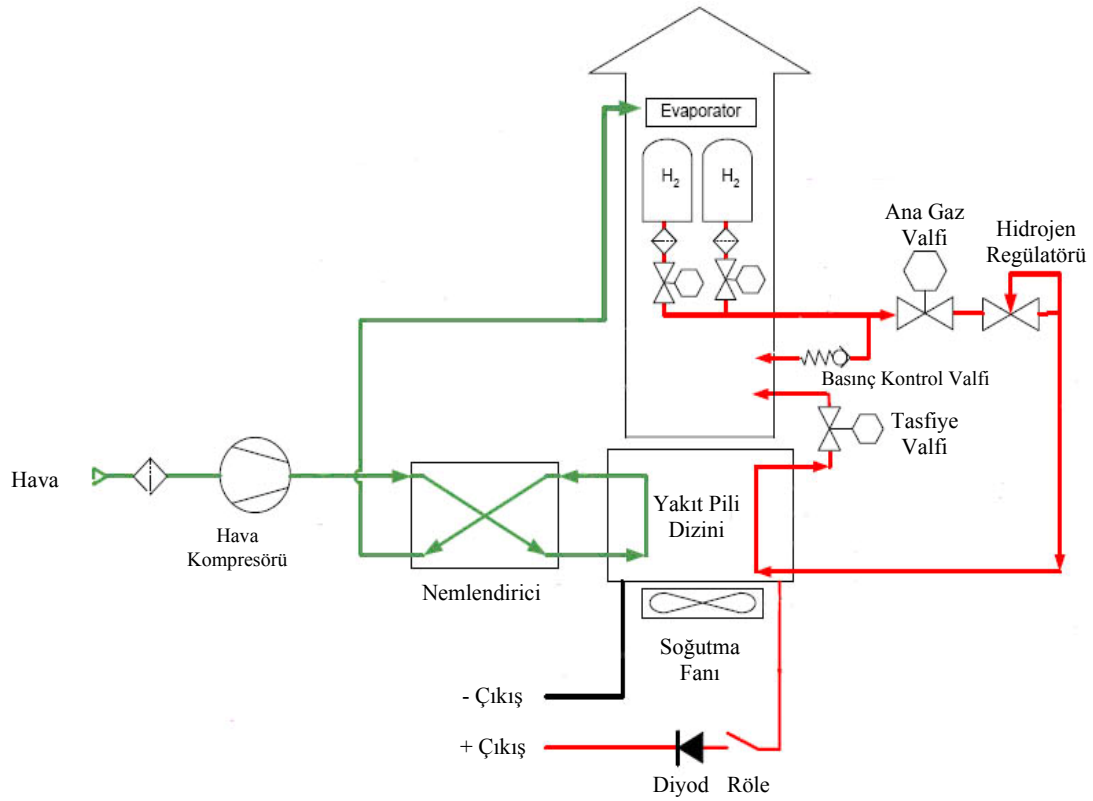
4.4.7. Yakıt Pilleri

Ticari olarak Nexa Güç Modülü olarak bilinen ve Ballard tarafından 2001 yılında piyasaya sürülen iki adet PEM tipindeki yakıt pili sistemi güneş-hidrojen hibrid enerji sisteminde kullanılmaktadır. Bu yakıt pili sistemi sabit ve taşınabilir güç üretim uygulamaları için tasarlanmıştır. Nexa yakıt pili modülü 1.2 kW'a kadar düzensiz DC elektrik üretiminin, 26 VDC nominal çıkış geriliminde elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Yakıtın dışarıdan sağlanmasıyla, depolanan yakıtla bağlı olarak sürekli şekilde çalışabilmektedir (NEXA 2003). Nexa yakıt pili modülü Şekil 4.11'de görülmektedir.



Şekil 4.11 Nexa Yakıt Pili Modülü (NEXA 2003).

Nexa yakıt pili sistemi, hidrojen ve havanın içindeki oksijenin reaksiyonu ile DC elektrik üretmektedir. Sistem, Ballard yakıt pili dizini ve yardımcı bazı elemanlardan oluşmaktadır. Yardımcı elemanlar, hidrojenin dağıtımını, oksidant havanın teminini ve soğutma havası ihtiyacını sağlamaktadır. Sistemdeki sensörler aracılığı ile yakıt pilindeki farklı veriler ve performans izlenebilmektedir. Ayrıca, control kartı ve mikroişlemci ile tam otomatik çalışma sağlanmaktadır. Sistemde, güvenli çalışma için de bazı elemanlar bulunmaktadır. Şekil 4.12'de yakıt pili sisteminin şematik görünümü yer almaktadır. Hidrojen, oksidant hava ve soğutma havası şekildeki gibi sağlanmaktadır. Kullanılmayan hava, üretilen su ve sistemi terkeden soğutma havası dışarı verilmektedir.



Şekil 4.12 Nexa yakıt pili sisteminin akış diyagramı (NEXA 2003).

Nexa yakıt pili sistemi, istenilen gücü elde edebilmek amacıyla sandviç şeklinde seri olarak biraraya getirilmiş yakıt pili hücrelerinden oluşmaktadır. Tek bir yakıt pili hücresi yaklaşık 1 V açık devre gerilimi, 0.6 V tam yükte gerilim üretebilmektedir. Seri olarak biraraya getirilen yakıt pili hücresi sayısı 47'dir. Her bir hücre 120 cm² efektif geometrik alana sahiptir.

Nexa yakıt pili sistemi, saf halde hidrojen gazı kullanılarak çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Hidrojenin sisteme girmeden önce nemlendirme işlemine tabi tutulmasına gerek yoktur. Hidrojen giriş basıncı 0.7 ila 17 bar (gösterge) arasında olabilmektedir. Basınç kontrol vanası vasıtasıyla, yakıt pili içinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyon için gerekli olan hidrojen sağlanabilmektedir. Havanın içindeki azot ve reaksiyon sonucu üretilen su, yakıt pili membranları boyunca yavaşça ilerlemekte ve hidrojen akışında zamanla birikmekte, azot ve suyun negatif anot tarafında toparlanmasına neden olmaktadır. Bu olay, belirli yakıt pili hücrelerinde

performans azalmasına sebep olmaktadır ve yakıt pili dizini çıkışında yer alan tasfiye vanasının periyodik olarak açılması ile anottan inert bileşenlerin dışarı atılarak performansın düzeltilmesi sağlanmaktadır. Bu işlem sırasında, sadece çok küçük miktarda (tüketilen hidrojen miktarının %1'inden daha az) hidrojen soğutma havası ile birlikte yakıt pili sisteminden uzaklaştırılmaktadır. Atılan küçük miktardaki hidrojen soğutma havasına difüz ederek, seyrelmekte ve hidrojenin tutuşma alt limitinden çok çok daha düşük bir seviyeye ulaşmaktadır. Soğutma havasının çıkış tarafında hidrojen kaçak dedektörü yer alarak, bu seviyenin belirli bir oranda olup olmadığını kontrol etmektedir. Bu özellik sayesinde, yakıt pili sisteminin güvenli olarak iç-mekan uygulamalarında kullanılmasına olanak vermektedir. Hidrojenin tutuşma alt limiti, hava ile karıştırıldığında kendiliğinden tutuşmaya sebep olabildiğini sağlayan küçük miktardaki hidrojenin havadaki oranıdır. Hidrojenin en tutuşma alt limiti (LFL), havanın içinde hacimce %4 hidrojene tekabül etmektedir. Yakıt pili modülünün ana özellikleri Tablo 4.4'de özetlenmiştir.

Tablo 4.4 Nexa yakıt pili sisteminin bazı özellikleri (NEXA 2003).

Performans	<ul style="list-style-type: none"> - Max. Net Güç Üretimi: 1200 W - Toplam Isı Üretimi: 1600 W (max. net güç üretiminde) - Akım: 46 ADC (max. net güç üretiminde) - Gerilim: 26 VDC (max. net güç üretiminde) - Ömür: 1500 saat
Yakıt	<ul style="list-style-type: none"> - Hidrojen Gazı: %99.99, kuru - Basınç: 7 ila 17.2 bar
Çalışma Koşulları	<ul style="list-style-type: none"> - Çevre Sıcaklığı: 3 ila 40°C - Bağıl Nem: %0 ila %95
Emisyonlar	<ul style="list-style-type: none"> - Saf Su (buhar ve sıvı faz): Max. 870 ml/h (max. net güç üretiminde) - CO, CO₂, NO_x, SO₂: 0 ppm - Gürültü: 72 dBA @ 1 m
Fiziksel	<ul style="list-style-type: none"> - Boyutlar: 56 cm x 25 cm x 33 cm - Ağırlık: 13 kg

Yakıt pili içindeki elektrokimyasal reaksiyonun devamlılığını sağlayan oksidant havanın temini amacıyla küçük bir hava kompresörü bulunmaktadır. Hava girişinde, kompresörden önce yer alan giriş filtresi ile çevre havada bulunan partiküllerin kompresör ve akış yönündeki diğer elemanların korunması sağlanmaktadır. Kompresörün hızı, yakıt pili dizininin DC akım isteğine uygun şekilde kontrol edilmektedir. Eğer yüksek DC akım ihtiyacı bulunuyorsa, oksidant hava akışı

artmaktadır. Akış yönünde yer alan bir sensör ile havanın kütleli debisi ölçülerek, DC akım ihtiyacına uyan kompresör hızı ayarlanmaktadır. Yakıt pilinin ihtiyaç duyduğu oksidant hava, yakıt pili dizinine ulaşmadan önce nemlendirilerek PEM'in doymuş su varlığını korumaktadır. Bu sayede yakıt pilinin ömrü artmaktadır. PEM'in kuru olması ömrünü azaltmaktadır. Nemlendirme işlemi, ıslak durumdaki pozitif katod çıkışından yakıt pilinde üretilen su ve ısıyı, kuru giriş havasına aktaran bir ünite ile olmaktadır. Artan su ise sıvı ve buhar fazında sistemden uzaklaştırılmaktadır. Yüksek DC akım seviyelerinde, daha fazla ısı üretilmektedir. Ancak, yakıt pili dizininin sıcaklığının belli bir sıcaklıkta sabit tutulması ve kontrol edilmesi gerekmektedir. Yakıt pillerinde soğutma işlemi, sıvı veya hava ile sağlanabilmektedir. Nexa yakıt pili sisteminde, hava soğutucu olarak kullanılmaktadır ve bir fan sayesinde sağlanmaktadır. Bu sayede yakıt pili dizini yaklaşık 65°C sıcaklıkta tutulabilmektedir.

Nexa yakıt pili sistemi, çalışma sırasında güvenliğin sağlanması amacıyla bazı otomatik kontrol donanımına sahiptir. Güvenli olmayan veya sıradışı durumlarda, uyarı veya alarm vermektedir. Uyarı vermesi durumunda, uyarıyı oluşturan koşulları düzeltmeye çalışmaktadır. Alarm durumunda ise kendini devre dışı bırakarak kapanmaktadır (NEXA 2003, Ottosen 2004). Şekil 4.13'de kurulumu yapılan yakıt pili sistemleri ve hidrojen tankları görülmektedir. 10 hücreden oluşan HOGEN S20 elektrolizörü, yakıt pilinin ve metal hidrid tankların ihtiyaç duyduğu saflıkta hidrojen üretebilmektedir.

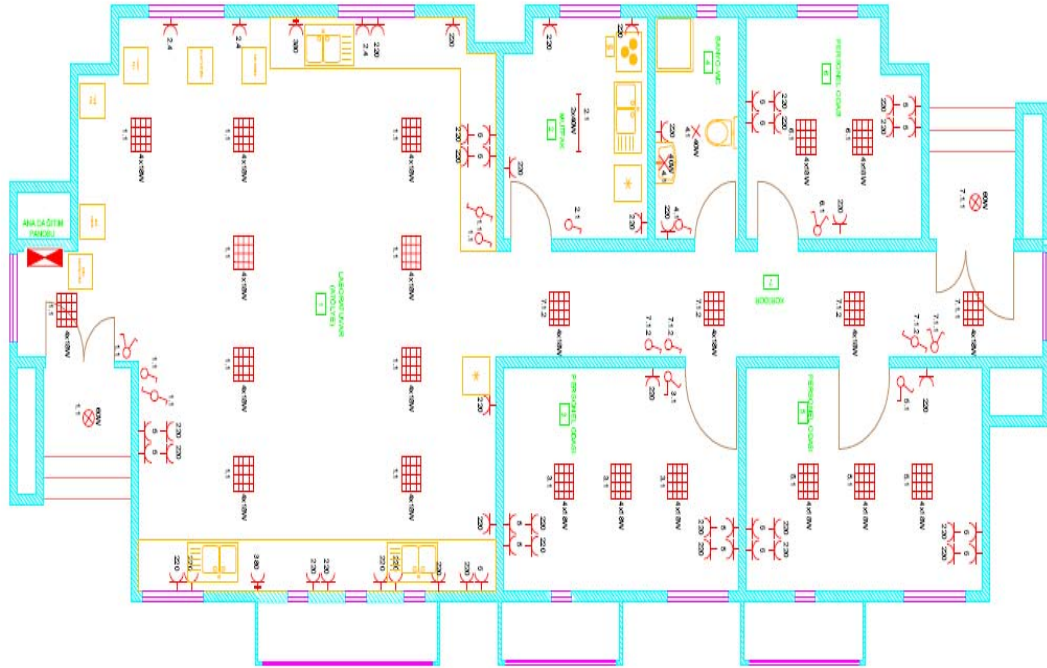


Şekil 4.13 Nexa yakıt pili modülleri ve metal hidrid hidrojen tankları.

4.5. Sistemin Elektrik Tesisatının Projelendirilmesi ve Elektriksel Analizi

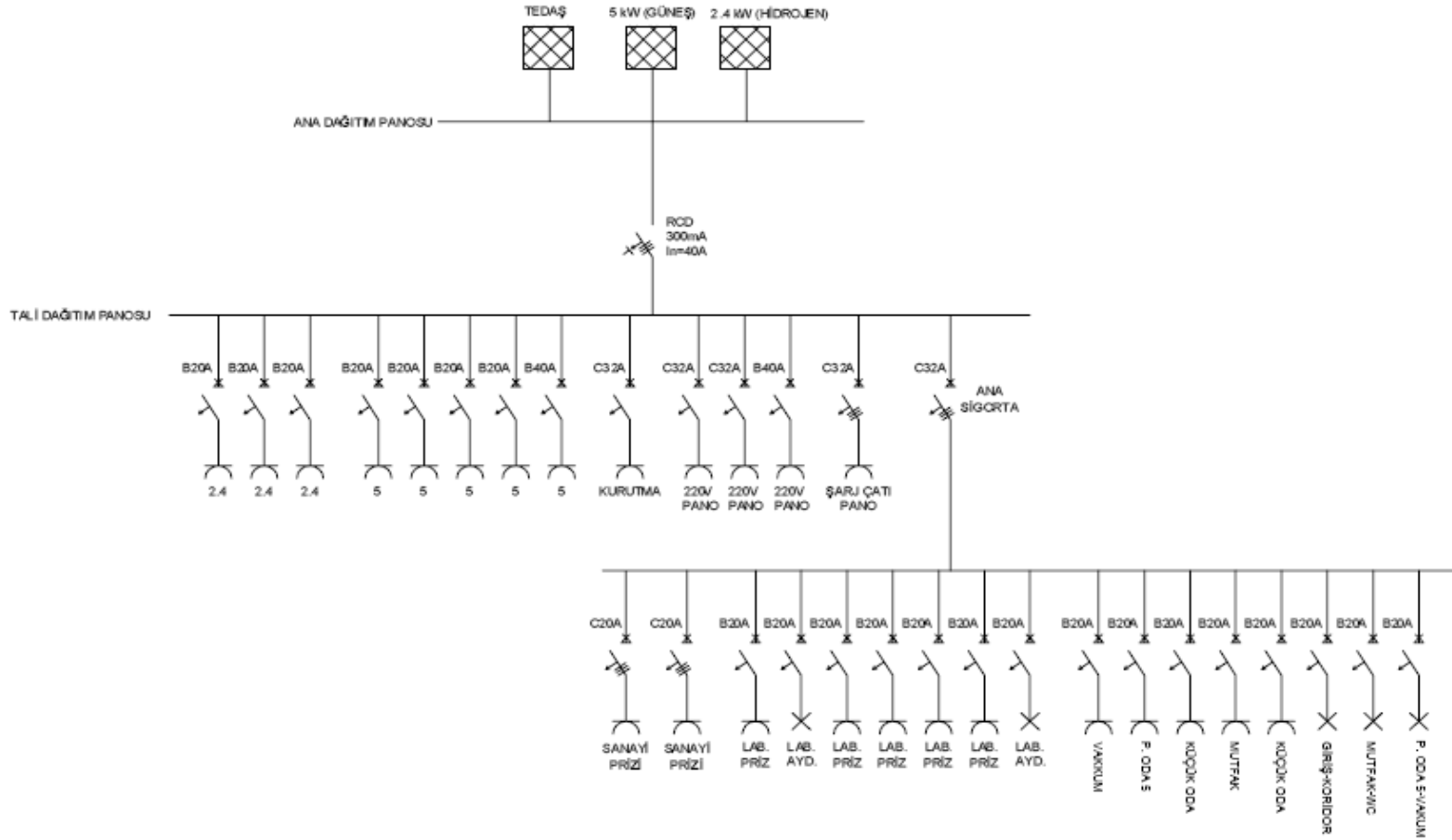
4.5.1. Sistemin elektrik tesisatının projelendirilmesi

Çalışmanın yapıldığı sistemin elektrik projesi Şekil 4.14’de, tek hat şeması ise Şekil 4.15’de görülmektedir. Sistemin enerji verdiği “Temiz Enerji Evi”, floresan tip elektronik balastlı armatürlerle aydınlatılmış, topraklama sistemi olarak iki adet bakır çubuk ile tek bir noktadan (pano-toprak) topraklama yapılarak, kaçak akım rölesi olarak 300mA değerli bir röle ile korunmaktadır.



Şekil 4.14 Pamukkale Üniversitesi güneş-hidrojen sisteminin elektrik tesisatı projesi.

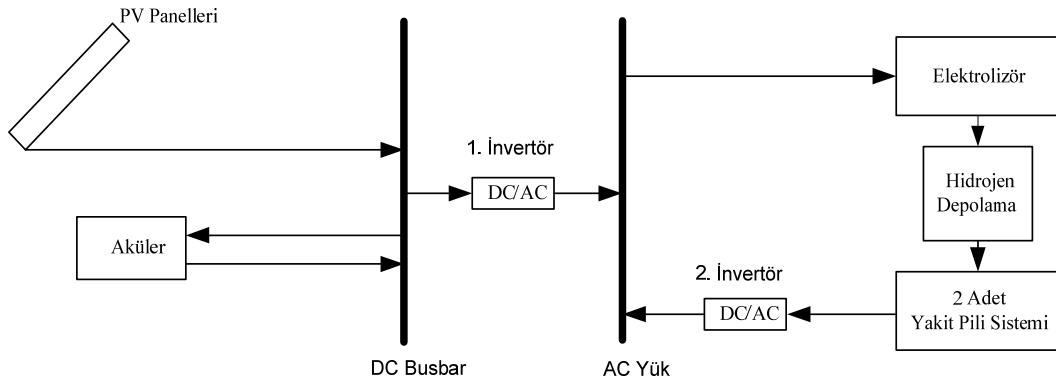
“Temiz Enerji Evi”nin ihtiyaç halinde ulusal şebekeden de enerjilendirilebilmesi amacıyla $3 \times 25 + 16 \text{mm}^2$ NYY tip kablo çekilmiştir. “Temiz Enerji Evi” içerisinde bir adet ana pano niteliğinde sac pano, bir adet invertör, şarj regülatörü v.b. elektronik cihazların bulunduğu sac pano, bir adet de sac akü dolabı mevcuttur. Sistemin çevrim empedansı 267Ω , izolasyon direnci ise $>500\text{M}\Omega$ ölçülmüştür. Elektrik tesisatının izolasyonunda herhangi bir problem tespit edilmemiştir.



Şekil 4.15 Pamukkale Üniversitesi güneş-hidrojen sisteminin tek hat elektrik tesisat şeması.

4.5.2. Sistemin elektriksel analizi

Pamukkale Üniversitesi Güneş-Hidrojen Sistemi'nin "Temiz Enerji Evi"nde kullanılan AC elektrik tüketen cihazların elektrik ihtiyacının karşılanmasının elektriksel performansının incelenmesi ve sistemin farklı cihazların elektrik ihtiyaçlarını karşılarken izlediği davranışların bilinmesi gerekmektedir. Şekil 4.16'da hibrid enerji sisteminin şematik bir görünümü yer almaktadır.



Şekil 4.16 Pamukkale Üniversitesi güneş-hidrojen sisteminin enerji yolları.

Şekil 4.16'da görülen hibrid enerji sistemi, yükü karşılarken üç farklı yol kullanılmaktadır. Bunlar sırasıyla aşağıdaki şekildedir:

- 1) *PV yolu*: PV panelleri ve şarj regülatörleri – DC/AC İnvörtör – Yük
- 2) *Akü yolu*: PV panelleri ve şarj regülatörleri – Aküler – DC/AC İnvörtör – Yük
- 3) *Hidrojen yolu*: PV panelleri ve şarj regülatörleri – DC/AC İnvörtör – Elektrolizör – Hidrojen depolama tankları – Yakıt pili sistemleri – DC/AC İnvörtör – Yük

Yükü karşılarken, sistem bu üç yolu farklı oranlarda kullanılmaktadır. "PV yolu", güneş pili panellerinden üretilen elektrik enerjisinin depolanmadan elektrik ihtiyacında karşılanmasında kullanılmısını ifade etmektedir. Eğer, güneş pili panellerinden üretilen elektrik enerjisi fazla ise akülerde depolanmakta ve daha sonra kullanılmaktadır. Bu enerji yolu da "akü yolu" olarak tanımlanmaktadır. Uzun vadede elektrik enerjisinin depolanmasını hedefleyen güneş pili panellerinden sağlanan elektrik enerjisiyle suyun elektrolizi sonucu hidrojenin üretilmesi, hidrojenin depolanması ve yeniden elektrik

enerjisine yakıt pili sistemlerinde dönüştürülmesiyle elektrik ihtiyacının karşılanması ise “hidrojen yolu” sayesinde gerçekleştirilmektedir.

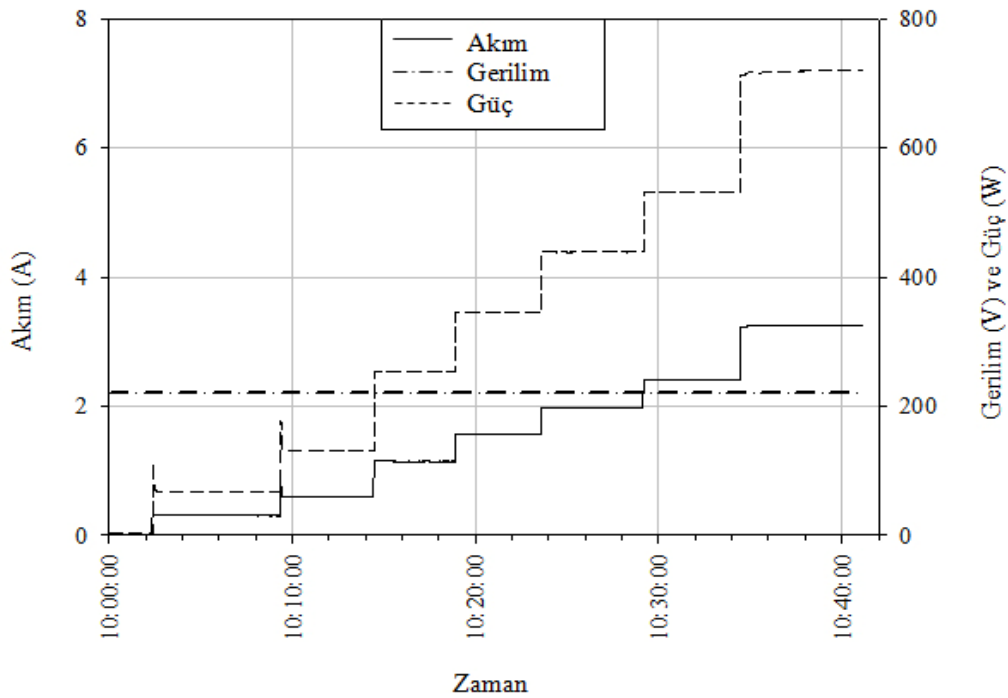
AC elektrik tüketen cihazların elektrik ihtiyacının karşılanmasının elektriksel performansının incelenmesi ve sistemin farklı cihazların elektrik ihtiyaçlarını karşılarken izlediği davranışların tespiti amacıyla farklı elektriksel karakteristiklere sahip halojen lamba grubu, fanlar, motor, klima ve buzdolabı seçilmiştir. Bu cihazların, her üç enerji yolundan beslenmesi sağlanmıştır. Cihazlara ait bazı özellikler Tablo 4.5'teki gibidir.

Tablo 4.5 Elektriksel performans analizinde kullanılan cihazların bazı özellikleri

Fanlar	
Nominal Çalışma Gerilimi: 230 VAC; Çalışma Frekansı: 50 Hz / 60 Hz Devir: 2550 / 2800 d/d Güç: 64 / 80 W Akım: 0.29 / 0.35 A Dahili Kondansatör: 1.5 μ F / 400 V	
Halojen lambalar	
Tip 1 Nominal Çalışma Gerilimi: 230 VAC Çalışma Frekansı: 50 Hz / 60 Hz Güç: 100 W Çalışma Akımı: 0.43 A	Tip 2 Nominal Çalışma Gerilimi: 230 VAC Çalışma Frekansı: 50 Hz / 60 Hz Güç: 150 W Çalışma Akımı: 0.68 A
Motor	
Nominal Çalışma Gerilimi: 230 VAC; Çalışma Frekansı: 50 Hz / 60 Hz Devir: 2900 d/d Güç: 550 W (Maksimum) Akım: 2.5 A Dahili Kondansatör: 10 μ F / 400 V	
Klima	
Soğutma Kapasitesi: 8630 btu/h; Isıtma Kapasitesi: 9110 btu/h Soğutucu Akışkan: R22 Nominal Çalışma Gerilimi: 220-240 V AC Çalışma Frekansı: 50Hz / 60Hz Çalışma Akımı (soğutma): 3.6A; Çalışma Akımı (ısıtma): 3.2A Güç (soğutma): 770 W; Güç (ısıtma): 685 W EER(soğutma): 3.29; COP(ısıtma): 3.9	
Buzdolabı	
Nominal Çalışma Gerilimi: 220-240 VAC Çalışma Frekansı: 50 Hz / 60 Hz Güç: 160 W Çalışma Akımı: 1.375 A	

4.5.2.1. PV yolunun elektriksel performans analizi

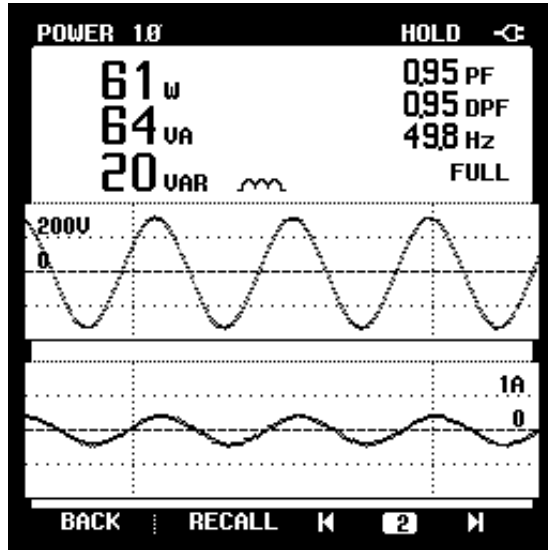
PV yolunun farklı elektriksel karakteristiklere sahip yüklerin elektrik enerjisi ihtiyacını karşılaması amacıyla akü hattının enerji giriş ve çıkışı kapatılmıştır. PV yolunun elektriksel performans analizi için ilk önce fanlar, motor ve halojen lamba grubundan oluşan yükün etkileri incelenmiştir. Sırasıyla 1. fan, 2. fan, 150 W halojen, 150 W halojen, 150 W halojen, 100 W halojen ve son olarak motor devreye alınmıştır. Şekil 4.17’de yüklerin devreye alınma zamanları ve akım-gerilim-güç değişimleri görülmektedir.



Şekil 4.17 Doğrudan PV yolu beslemesinde farklı yüklerin devreye alınma zamanları ve akım-gerilim-güç değişimleri.

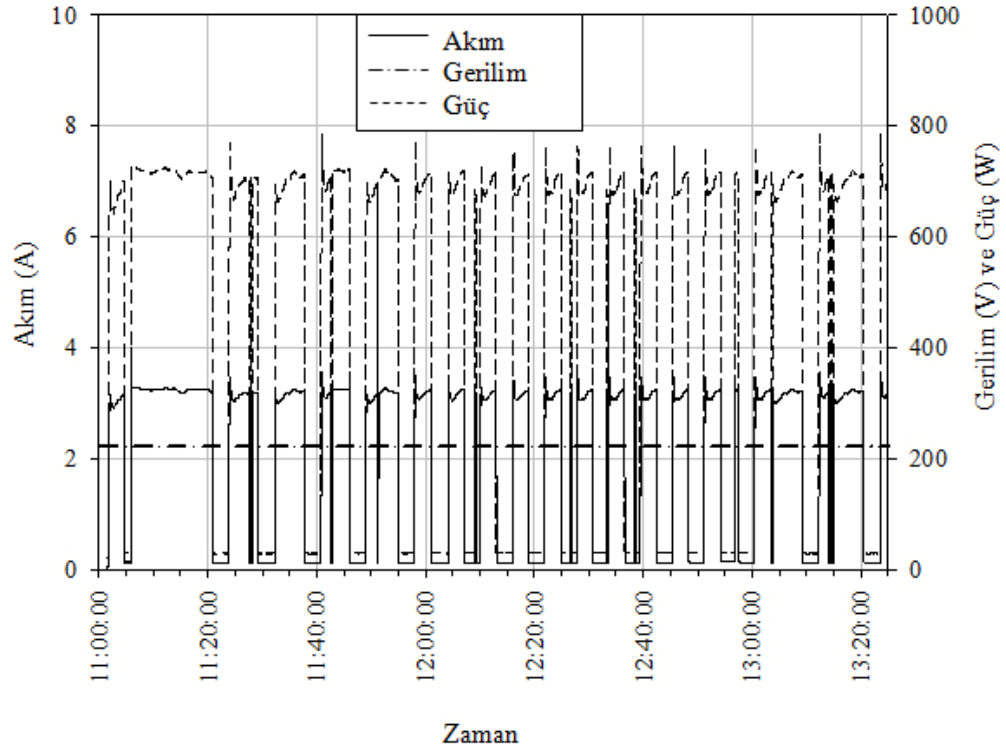
Şekilde görüldüğü gibi fanların devreye alınmalarında akım ve gerilim değerlerinde ani yükselmeler meydana getirmiştir. Fanların indüktif direnç karakteristiklerinin meydana getirdiği bu ani değişimlerin yükün karşılanmasına olumsuz etkisi olmamış ve invertörü zorlaması meydana gelmemiştir. Şekil 4.18’de, 5 kW invertör lineye çıkış hattı gerilim ve akım dalga şekilleri görülmektedir. Ölçüm değerleri, sisteme yük olarak bağlanan Fan 1 için alınmıştır. Yapılan ölçümde, gerilim ve akım sinüs dalga şekillerinin oldukça ideale yakın olduğu, herhangi bir bozulmanın

olmadığı gözlenmektedir. Şekil 4.18’de fanın indüktif karakteristik göstermesi nedeniyle akım-gerilim dalga şekilleri arasında faz farkı meydana geldiği anlaşılmaktadır. Yapılan ölçümlerde invertörün çıkış frekans değerinin 49.8 Hz olduğu, bunun da 50 Hz sistemler için kabul edilebilir bir değer olduğu görülmüştür. Gerilim, akım ve frekans değerleri tek fan yük için ideal değerler olarak gözlenmiştir. Fanın güç değerleri 64 VA görünür güç, 61 W aktif güç ve 20 VAR indüktif güç değerlerinde okunmuştur. 0.95’lik $\cos\phi$ değeri, ideal değer olan 1’e oldukça yakındır. Buna göre bu yük tipi için sistemde kompanzasyon ihtiyacı yoktur denilebilir.

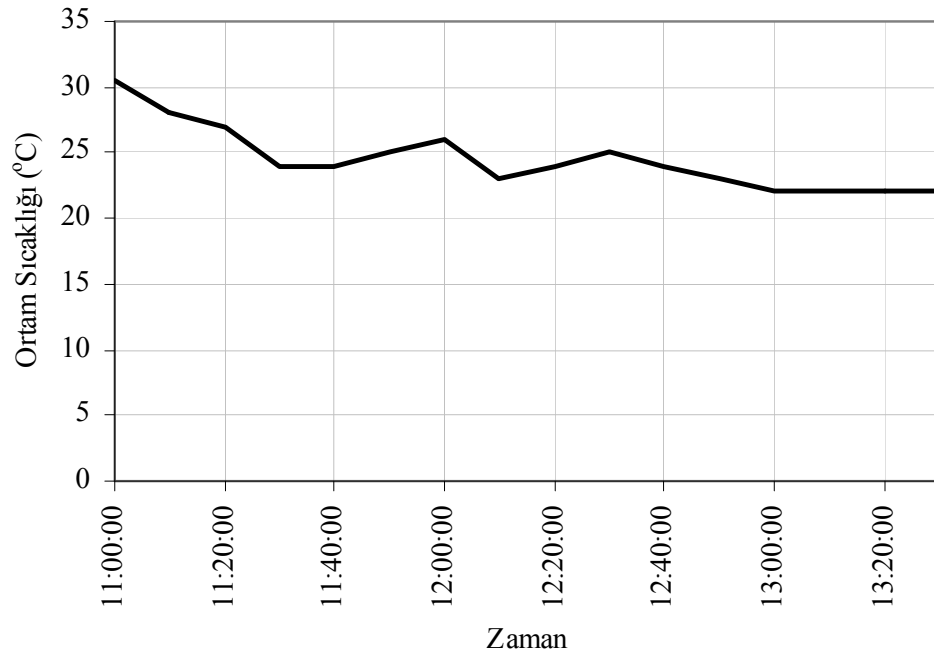


Şekil 4.18 Doğrudan PV yolu ile fan beslemede ölçülen invertör lineye çıkış hattı gerilim ve akım dalga şekilleri.

PV yolunun indüktif ve kapasitif direnç sahip bir yük altında elektriksel performans analizi için yük olarak klima ve buzdolabı seçilmiştir. Klimanın elektrik enerjisinin PV yolu ile karşılamasının zamana bağlı akım-gerilim ve güç değişimleri Şekil 4.19’da gösterilmektedir. Klima 18 m³ bir oda hacmini, 30.6°C’den konfor sıcaklığı olan 22°C’ye Şekil 4.20’deki gibi getirmeye çalışmaktadır. Klimanın devreye girmesiyle, ilk önce klimanın fanı çalışmaya başlamış ve 0.1 A akım çekmiştir. Ortam havasını soğutmak amacıyla devreye giren kompresörle akım değerinde ani bir yükselme meydana gelerek akım 3.11 A değerine ulaşmıştır. Bu akım değeri için klimanın 711 W güç ihtiyacı olmaktadır. Klima çalışması esnasında maksimum 785 W güç çekmektedir. Deneyler sırasında ani güç artışı sonucunda meydana gelen akım yükselmeleri ve gerilim düşümlerinin sistemin çalışmasına olumsuz etkileri olmadıkları görülmüştür.

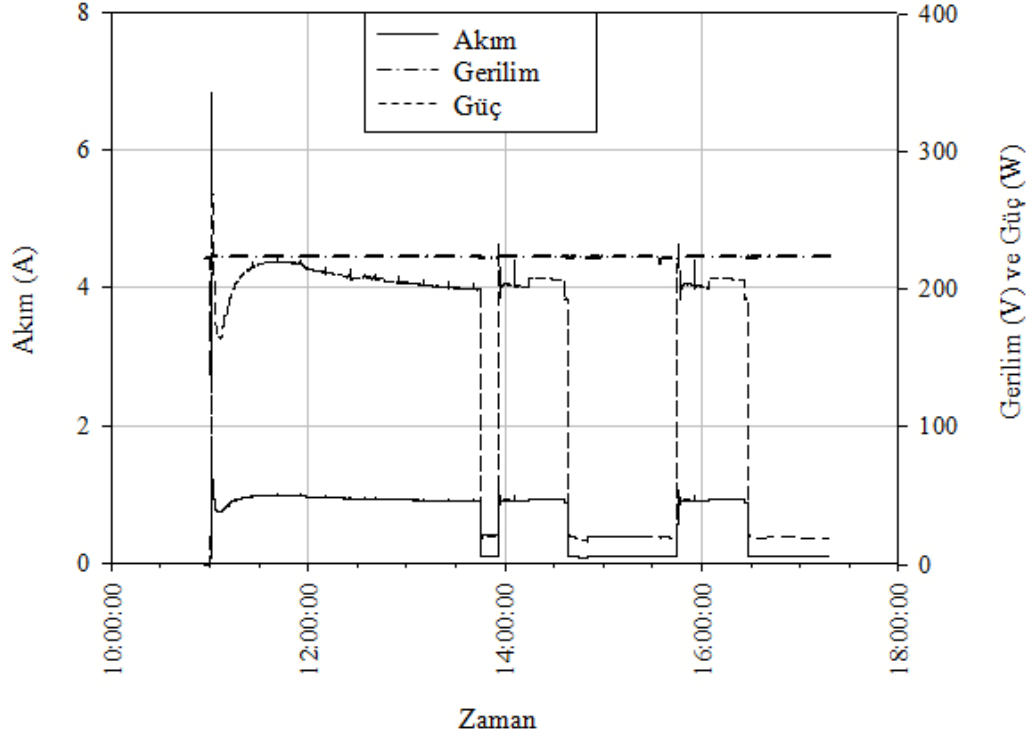


Şekil 4.19 Doğrudan PV yolu beslemesinde klimanın elektrik ihtiyacının zamana bağlı değişimi ve akım-gerilim-güç değişimleri.



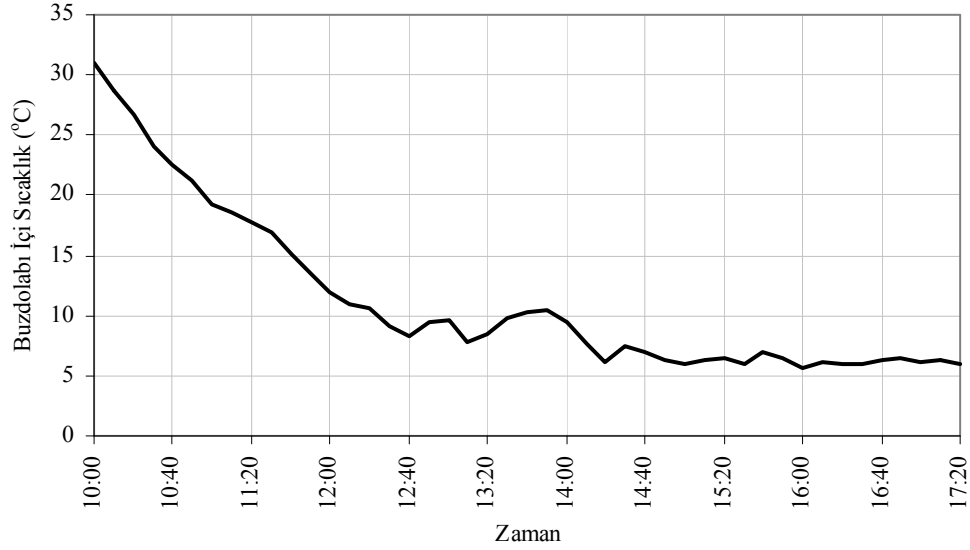
Şekil 4.20 Klima tarafından soğutulan mekanın ortam sıcaklığının zamana bağlı değişimi

Şekil 4.21’de buzdolabının elektrik enerjisinin PV yolu ile karşılamasının zamana bağlı akım-gerilim ve güç değişimleri gösterilmektedir. Buzdolabı, 31°C buzdolabı iç sıcaklığını ayarlanan 6°C’ye Şekil 4.22’deki gibi getirmeye çalışmaktadır. Buzdolabının çalışmaya başlaması ile invertörden yüksek miktarda akım çekilmeye başlanmıştır. Kararlı çalışma durumunda gözlenen 1 A akım değeri, ilk kalkış esnasında 3 A değerine kadar çıkmıştır.

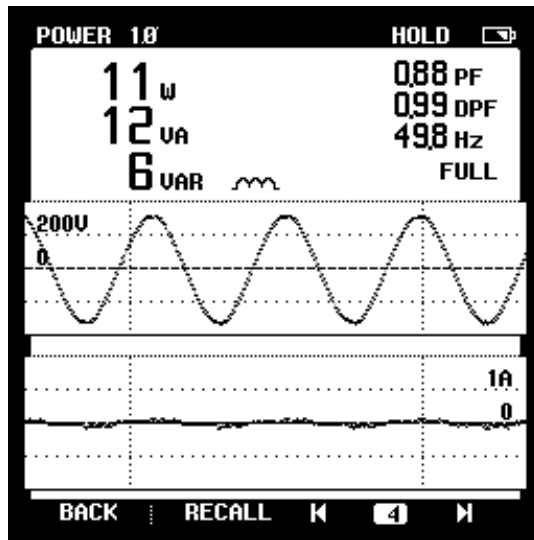


Şekil 4.21 Doğrudan PV yolu beslemesinde buzdolabının elektrik ihtiyacının zamana bağlı değişimi ve akım-gerilim-güç değişimleri.

Buzdolabının, sadece fan çalışırken yaklaşık 11 W güç ihtiyacı olmaktadır (Şekil 4.23). Dahil fan, buzdolabı içerisinde soğuk havanın sirkülasyonu maksatlı kullanılmaktadır. Bu durumda $\cos\phi$ 0.88 olarak tespit edilmiştir. 0.9'a oldukça yakın olması nedeniyle kabul edilebilir bir değerdir. Gerilim sinüs dalgasında bir bozulma yoktur. Sadece dahili fan tarafından akım çekilmektedir ve bu değer neredeyse 0A'dır. Dahili fanın çektiği aktif güç 11 W, görünür güç 12 VA ve reaktif güç 6 VAR değerindedir. Çalışma frekansı 49.8 Hz'dir ve ideal değer olan 50Hz'e oldukça yakındır.



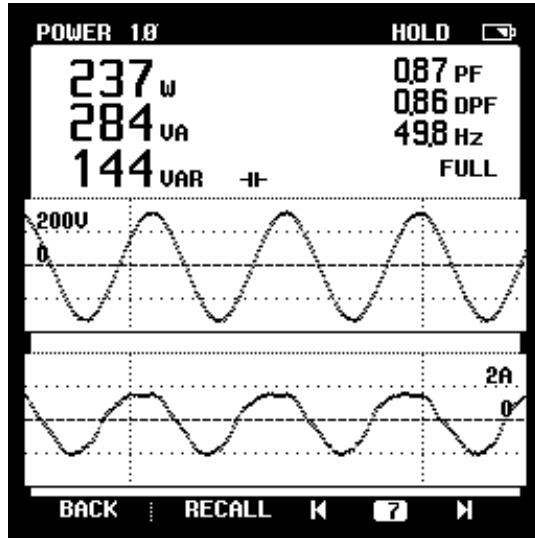
Şekil 4.22 PV yolu ile beslemede buzdolabı iç sıcaklığının zamana bağlı değişimi



Şekil 4.23 Doğrudan PV yolu ile buzdolabı fanının çalışması sırasında ölçülen invertör line çıkış hattı gerilim ve akım dalga şekilleri.

Buzdolabının kompresörünün çalışması esnasında kararlı durumda iken ise 237 W güç çekmektedir (Şekil 4.24). Gerilim sinüs dalga şeklinde herhangi bir bozulma olmamasına rağmen, akım dalga şekli pozitif alternans tepe değerinde harmoniklere bağlı çökme meydana gelmiştir. Sistemde bir harmonik filtrasyon ihtiyacı vardır. Bu durum, sistemlerde genel olarak etkili olan 3. ve 5. harmoniği yok edebilecek statik filtrasyon ile elimine edilebilir. Sistemde aktif güç 237 W, reaktif güç 144 VAR kapasitif e görünür güç 284 VA ölçülmüştür. $\cos\phi$ 0.87, çıkış frekansı 49.8Hz olarak

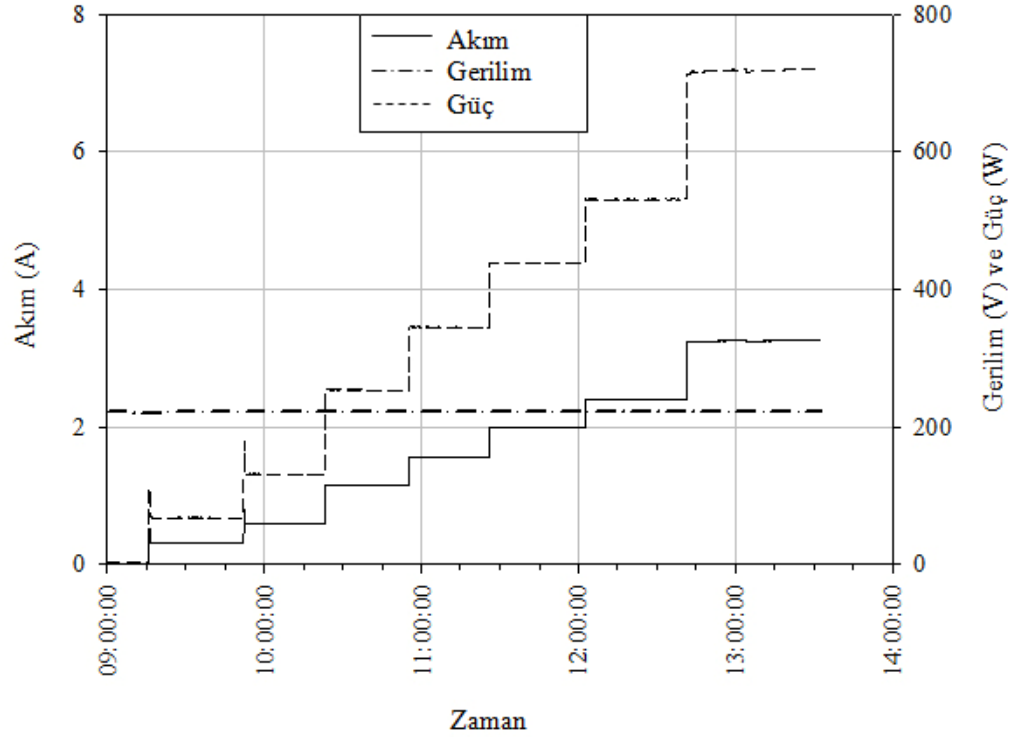
kaydedilmiştir. Bu değerler, ideal değerlere yakın bulunmuştur. Gerilim sinüs dalgası etkin değeri 222.1 V, akım etkin değeri ise 1.256 A'dır.



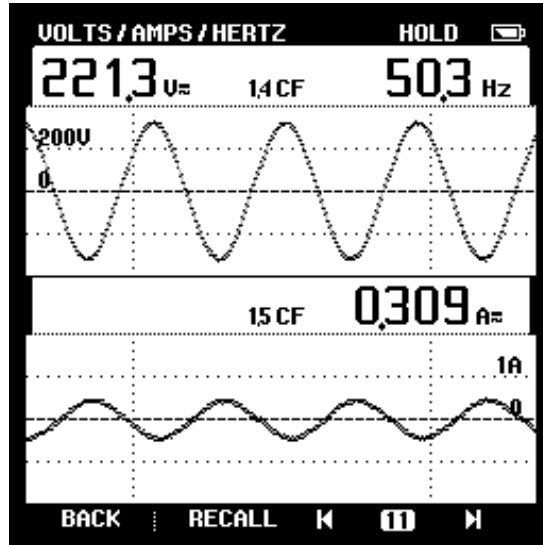
Şekil 4.24 Doğrudan PV yolu ile buzdolabının kompresörünün çalışması sırasında ölçülen invertör line çıkış hattı gerilim ve akım dalga şekilleri.

4.5.2.2. Akü yolunun elektriksel performans analizi

Akü yolunun farklı elektriksel karakteristiklere sahip yüklerin elektrik enerjisi ihtiyacını karşılaması amacıyla, PV yolunun elektriksel performans analizinde kullanılan aynı yükler kullanılmıştır. İlk önce fanlar, motor ve halojen lamba grubundan oluşan yükün etkileri incelenmiştir. Sırasıyla 1. fan, 2. fan, 150 W halojen, 150 W halojen, 150 W halojen, 100 W halojen ve son olarak motor devreye alınmıştır. Şekil 4.25'de yüklerin devreye alınma zamanları ve akım-gerilim-güç değişimleri görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi fanların devreye alınmalarında akım ve gerilim değerlerinde ani yükselmeler meydana getirmiştir. Fanların indüktif direnç karakteristiklerinin meydana getirdiği bu ani değişimlerin yükün karşılanmasına olumsuz etkisi olmamış ve invertörü zorlaması meydana gelmemiştir. Ayrıca, elde edilen gerilim sinüs dalgasının PV yolu ile beslemeye göre daha düzgün olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.26).

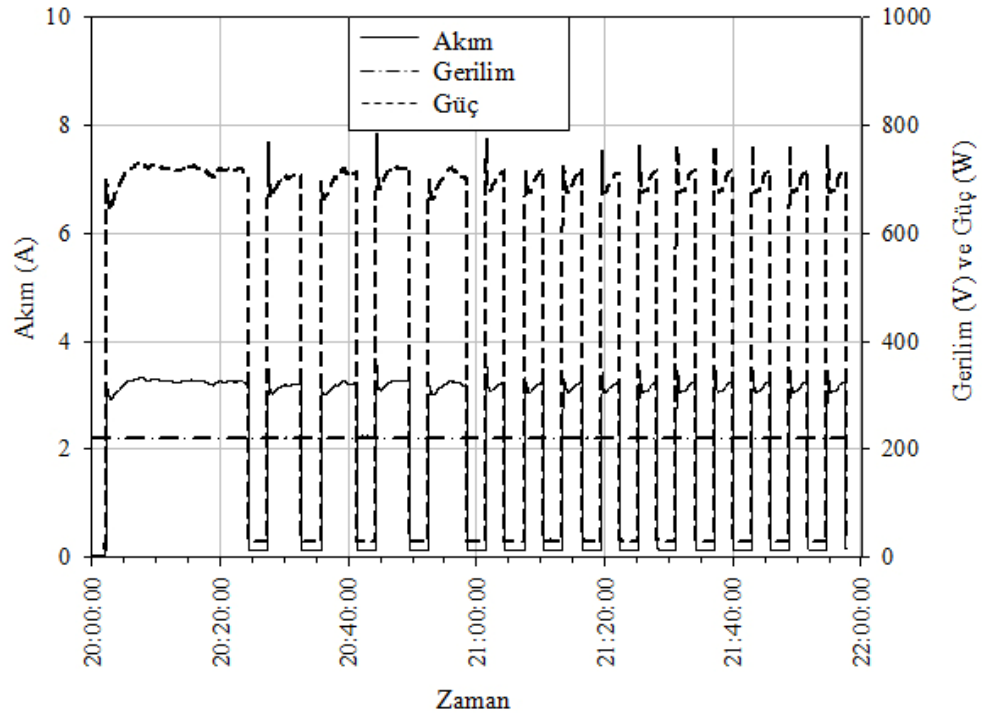


Şekil 4.25 Akü yolu beslemesinde farklı yüklerin devreye alınma zamanları ve akım-gerilim-güç değişimleri.

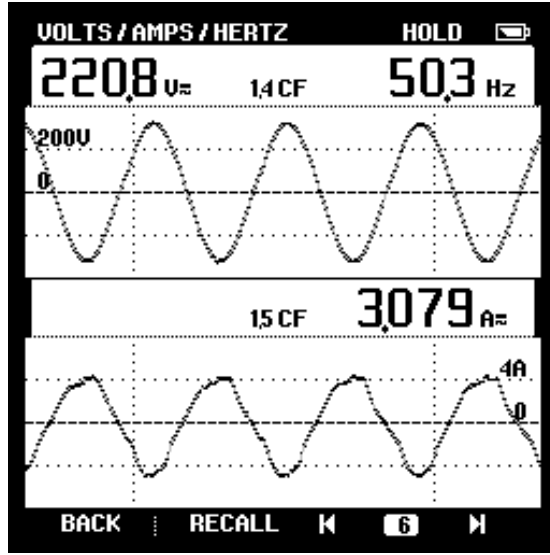


Şekil 4.26 Akü yolu ile fan beslemede ölçülen invertör linye çıkış hattı gerilim ve akım dalga şekilleri.

Akü yolunun indüktif ve kapasitif direnç sahip bir yük altında elektriksel performans analizi için yük olarak, PV yolundaki gibi klima ve buzdolabı seçilmiştir. Klimanın elektrik enerjisinin akü yolu ile karşılaşmasının zamana bağlı akım-gerilim ve güç değişimleri Şekil 4.27’de gösterilmektedir. Klima 18 m³ bir oda hacmini, 29.7°C’den konfor sıcaklığı olan 22°C’ye PV yolundakine benzer şekilde gibi getirmeye çalışmaktadır. Klimanın devreye girmesiyle, ilk önce klimanın fanı çalışmaya başlamış ve 0.1 A akım çekmiştir. Ortam havasını soğutmak amacıyla devreye giren kompresörle akım değerinde ani bir yükselme meydana gelerek akım 3.076 A değerine ulaşmıştır. Bu akım değeri için klimanın 720 W güç ihtiyacı olmaktadır. Klima çalışması esnasında maksimum 786 W güç çekmektedir. Klimanın çalışmasında, fazla sayıda dur-kalk yaptığı ve bunun aküler için sakıncalı olduğu gözlenmiştir. Akü geriliminde ani kalkış ve kompresörün devreye girdiği anlarda ani gerilim düşümleri meydana gelmiştir. Başlangıçta 50.2 VDC olan akü gerilimi bu anlarda 48.3 VDC değerlerine inmiştir. Ancak, deneyler sırasında ani güç artışı sonucunda meydana gelen akım yükselmeleri ve gerilim düşümlerinin sistemin çalışmasına olumsuz etkileri olmadıkları görülmüştür (Şekil 4.28).

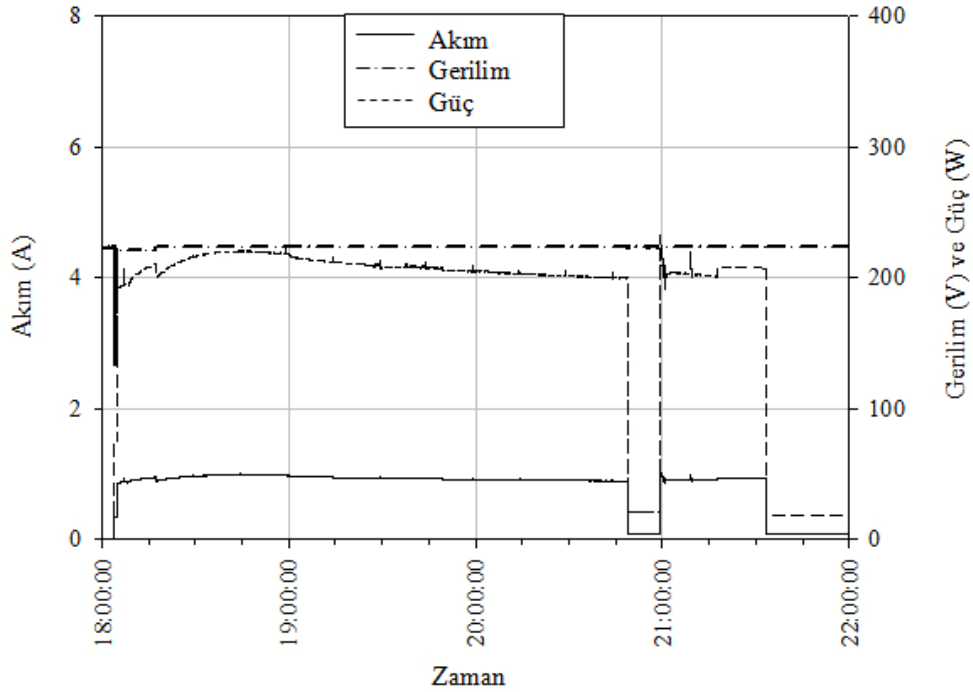


Şekil 4.27 Akü yolu beslemesinde klimanın elektrik ihtiyacının zamana bağlı değişimi ve akım-gerilim-güç değişimleri.

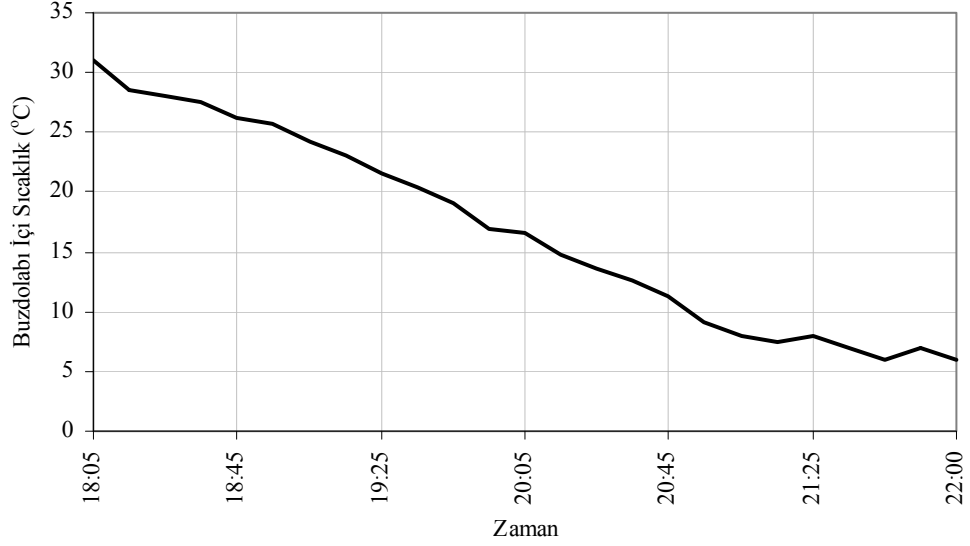


Şekil 4.28 Akü yolu ile klimanın çalışması sırasında ölçülen invertör lineye çıkış hattı gerilim ve akım dalga şekilleri.

Şekil 4.29’da buzdolabının elektrik enerjisinin akü yolu ile karşılamasının zamana bağlı akım-gerilim ve güç değişimleri gösterilmektedir. Buzdolabı, 31.1°C buzdolabı iç sıcaklığını ayarlanan 6°C’ye Şekil 4.30’daki gibi getirmeye çalışmaktadır.

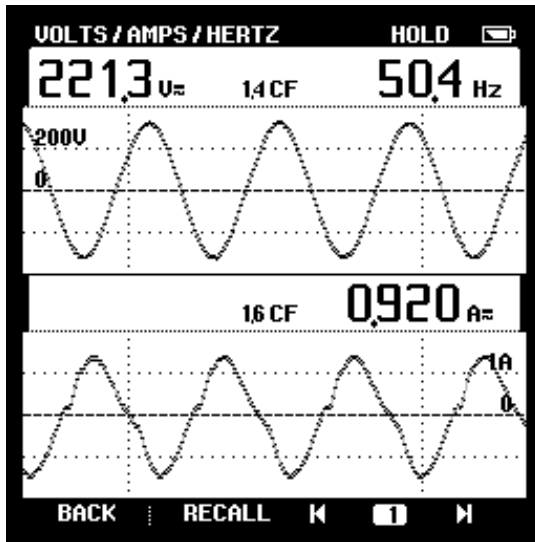


Şekil 4.29 Doğrudan PV yolu beslemesinde buzdolabının elektrik ihtiyacının zamana bağlı değişimi ve akım-gerilim-güç değişimleri.



Şekil 4.30 Akü yolu ile beslemede buzdolabı iç sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

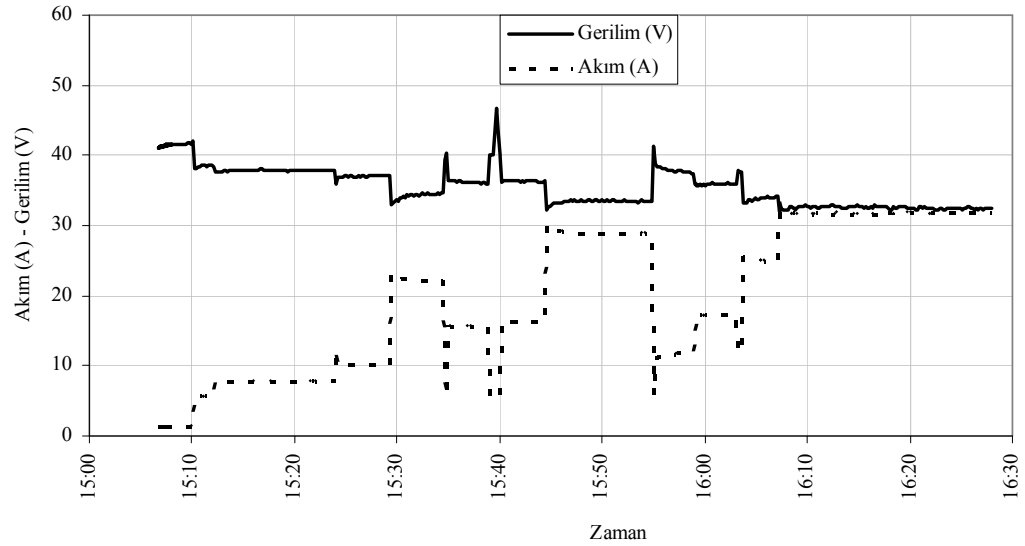
Şekil 4.29'dan de görüldüğü gibi, buzdolabındaki ani kalkış, akü yolunda daha az olmaktadır. Bu sayede, Şekil 4.31'deki gibi bir akım-gerilim salınımı elde edilmektedir. Sonuç olarak, akü yolunun PV yoluna göre daha stabil akım ve gerilim sağladığı söylenebilmektedir .



Şekil 4.31 Doğrudan akü yolu ile buzdolabının kompresörünün çalışması sırasında ölçülen invertör lineye çıkış hattı gerilim ve akım dalga şekilleri.

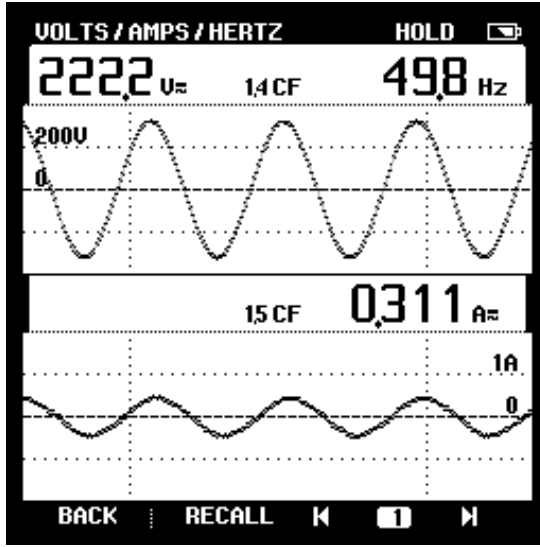
4.4.3. Hidrojen yolunun elektriksel performans analizi

Yakıt pili ve hidrojen yolunun farklı yükler altındaki elektriksel performansını ve davranışını gözlemlemek amacıyla PV yolu ve akü yolunda kullanılan yüklerden kullanılarak bu yükler altında yakıt pili ve invertörün çalışması gözlemlenmiştir. Bu amaçla motor, halojen aydınlatma grubu ve iki adet fan (toplam 1kW) değişik dönemlerde devreye alınmış ve bu durumda yakıt pili çıkış gerilim ve akım değerlerindeki değişimler Şekil 4.32'deki gibi gözlenmiştir. Son yükün devreye alınması ile birlikte akım ve gerilim değerleri stabil kalmış, devreye almalar esnasında sistemde herhangi bir anomali (yakıt pilinin veya invertörün yük atması) gözlenmemiştir.



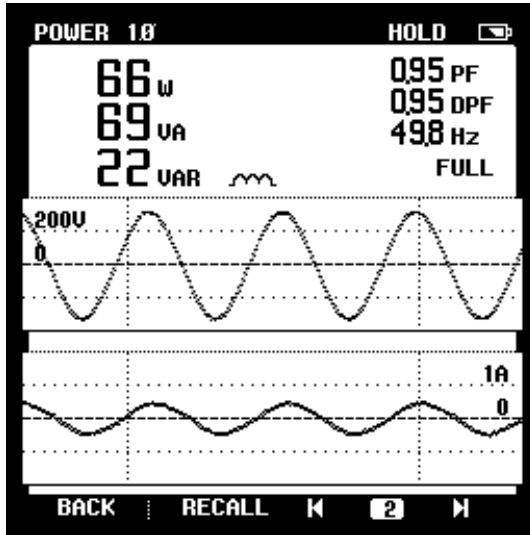
Şekil 4.32 Hidrojen yolu beslemesinde farklı yüklerin devreye alınma zamanları ve akım-gerilim değişimleri.

Şekil 4.33'de, Nexa Yakıt pili sistemi, 2.5kW invertör linie çıkış hattı gerilim ve akım dalga şekilleri görülmektedir. Ölçüm değerleri, sisteme yük olarak bağlanan Fan 1 için alınmıştır. Yapılan ölçümde, gerilim ve akım sinüs dalga şekillerinin oldukça ideale yakın olduğu, herhangi bir bozulmanın olmadığı gözlenmiştir.



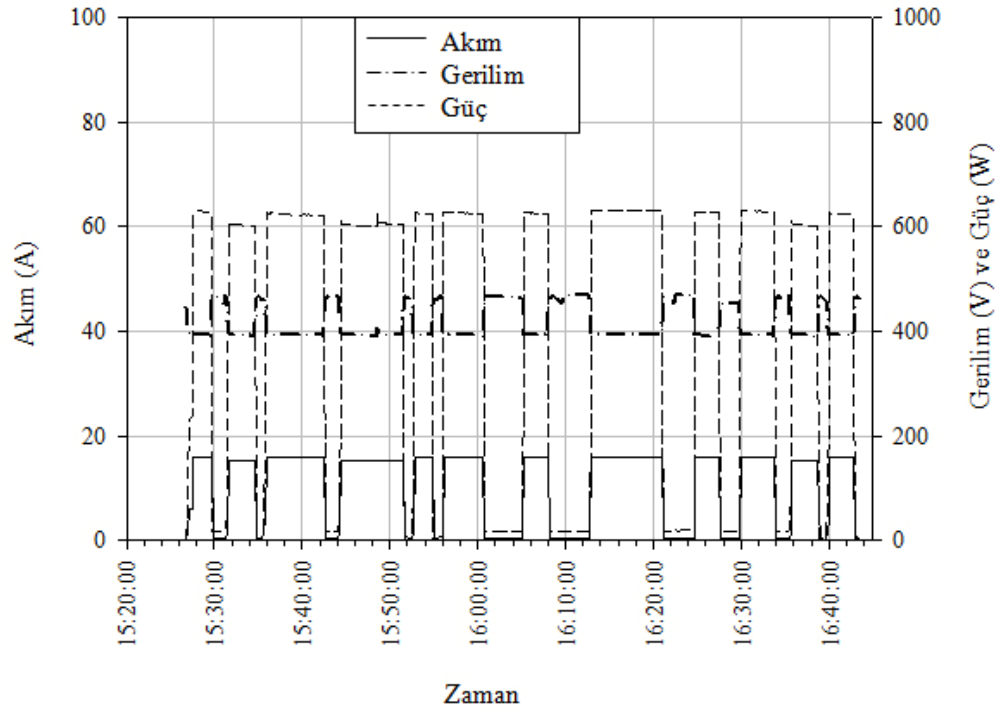
Şekil 4.33 Hidrojen yolu ile fan beslemede ölçülen invertör linye çıkış hattı gerilim ve akım dalga şekilleri.

Fan ile ölçümde invertör çıkışında gerilim değeri 222.2V, akım ise 0.311A'dır. Fanın indüktif karakteristik göstermesi nedeniyle akım-gerilim dalga şekilleri arasında faz farkı meydana gelmiştir. Yakıt pili invertörü çıkış frekans değerinin 49.8 Hz olduğu, bunun da 50 Hz sistemler için kabul edilebilir bir değer olduğu görülmüştür. Fanın güç değerleri 69 VA görünür güç, 66 W aktif güç ve 22VAR indüktif güç değerlerinde okunmuştur (Şekil 4.34). 0.95'lik $\cos\phi$ değeri, ideal değer 1'e oldukça yakındır. Buna göre bu yük tipi için sistemde kompanzasyon ihtiyacı yoktur denilebilir.



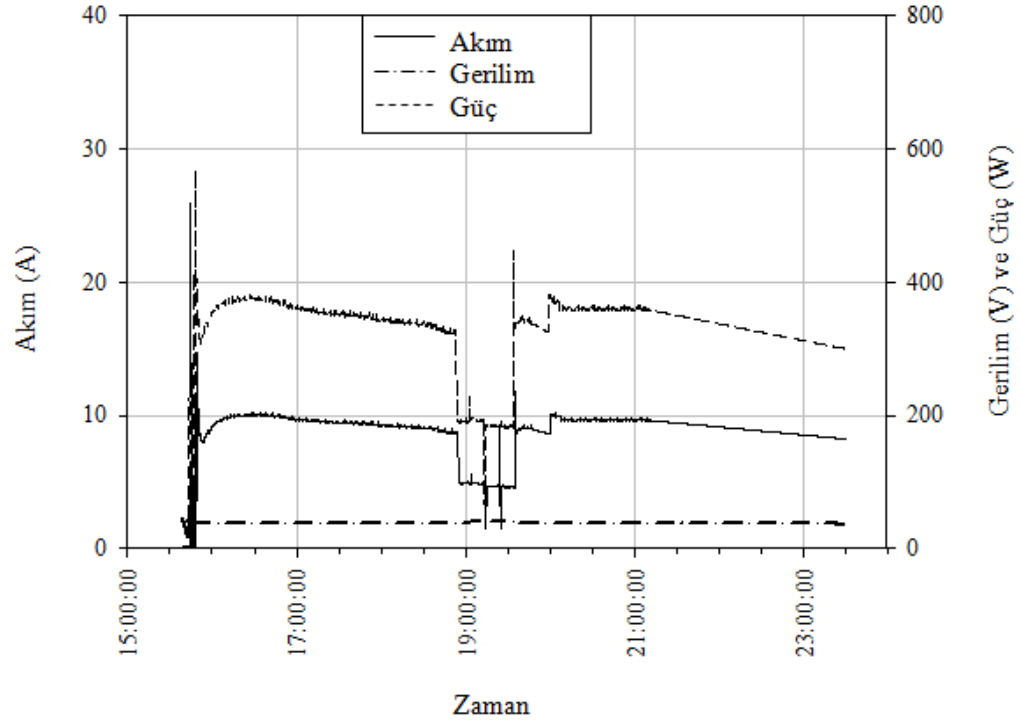
Şekil 4.34 Hidrojen yolu ile fan beslemede ölçülen güç değeri ve gerilim-akım dalga şekilleri

Hidrojen yolunun indüktif ve kapasitif direnç sahip bir yük altında elektriksel performans analizi için yük olarak, PV ve akü yolundaki gibi klima ve buzdolabı seçilmiştir. Klimanın elektrik enerjisinin yakıt pili sistemi ile karşılaşmasının zamana bağlı akım-gerilim ve güç değişimleri Şekil 4.35'de gösterilmektedir. Klima 18 m³ bir oda hacmini, 30°C'den konfor sıcaklığı olan 22°C'ye PV yolundakine benzer şekilde gibi getirmeye çalışmaktadır. Klimanın devreye girmesiyle, ilk önce klimanın fanı çalışmaya başlamış ve 0.35 A doğru akım çekmiştir. Ortam havasını soğutmak amacıyla devreye giren kompresörle akım değerinde ani bir yükselme meydana gelerek akım 16 A doğru akım değerine ulaşmıştır. Bu akım değeri için klimanın 627 W güç ihtiyacı olmaktadır. Klima çalışması esnasında maksimum 630 W güç çekmektedir. Klimanın devreye girmesiyle yakıt pili çıkış akımı 0-5ADC arasında, gerilim ise 40-45VDC arasında değişim göstermiştir. Bu esnada sistemde herhangi bir anomali (yakıt pilinin veya invertörün yük atması) gözlenmemiştir. Klimanın çalışmasında, fazla sayıda dur-kalk yaptığı ve yakıt pilinin hidrojen ihtiyacının arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, deneyler sırasında ani güç artışı sonucunda meydana gelen akım yükselmeleri ve gerilim düşümlerinin sistemin çalışmasına olumsuz etkileri olmadıkları görülmüştür



Şekil 4.35 Hidrojen yolu beslemesinde klimanın elektrik ihtiyacının zamana bağlı değişimi ve akım-gerilim-güç değişimleri.

Şekil 4.36’da buzdolabının elektrik enerjisinin hidrojen ile karşılamasının zamana bağlı elde edilen yakıt pili DC çıkış akımı ve gerilim dalga şekilleri görülmektedir.



Şekil 4.36 Hidrojen yolu beslemesinde buzdolabının elektrik ihtiyacının zamana bağlı değişimi ve akım-gerilim-güç değişimleri.

Şekil 4.36’da görüldüğü gibi buzdolabı ilk kalkış anında 14 A doğru akım ve bu esnada 550 W güç çekmiştir. Yakıt pili sistemi ve yakıt pilinden üretilen DC elektriği AC elektriğe dönüştüren invertörün ani akım ve gerilim dalgalanmalarından etkilenmedikleri gözlemlenmiştir. Ancak, ani akım-gerilim değişimlerinin yakıt pili hücrelerinde meydana getirdiği olumsuzlukların belirlenmesi gerekmektedir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. HOMER Programının Tanıtımı

Pamukkale Üniversitesi Güneş-Hidrojen Sistemi'nin yıllık enerji üretim ve tüketim değerlerinin bulunması, yükün karşılanma oranlarının elde edilmesinde gerekli olmaktadır. Daha önceki bölümde bahsedildiği gibi Pamukkale Üniversitesi Güneş-Hidrojen Hibrid Enerji Sistemi, yükü karşılarken “PV yolu”, “akü yolu” ve “hidrojen yolu” olmak üzere üç farklı yol kullanmaktadır.

Yükü karşılarken, sistem bu üç yolu farklı oranlarda kullanmaktadır. Bu oranların bilinmesi hibrid sistemin enerjetik ve ekserjetik performansının bulunabilmesi için önem taşımaktadır. Sistemin enerji verimi Denklem 5.1 ile hesaplanabilmektedir.

$$\eta_{sistem} = \frac{\eta_{PVY}(t_{PVY}) + \eta_{AY}(t_{AY}) + \eta_{HY}(t_{HY})}{t_{PVY} + t_{AY} + t_{HY}} \quad (5.1)$$

Aynı şekilde sistemin ekserji veriminin bulunmasında Denklem 5.2'den yararlanılabilir.

$$\psi_{sistem} = \frac{\psi_{PVY}(t_{PVY}) + \eta_{AY}(t_{AY}) + \eta_{HY}(t_{HY})}{t_{PVY} + t_{AY} + t_{HY}} \quad (5.2)$$

Burada η yollara ait enerji verimlerini, ψ yollara ait enerji verimlerini ve t hesaplama zaman dilimi içerisinde yolların kullanım sürelerini göstermektedir.

Bu üç yola ait kullanım oranlarının bulunması amacıyla HOMER bilgisayar yazılımı (WEB_7 2008), Pamukkale Üniversitesi Güneş-Hidrojen Sistemi'nin yıllık enerji modellenmesinde kullanılmak üzere seçilmiştir. Bu programın seçilme nedenleri sırasıyla aşağıdaki gibidir:

- güneş ışınım değerlerini uydu aracılığı ederek sistemde kullanabilmesi,

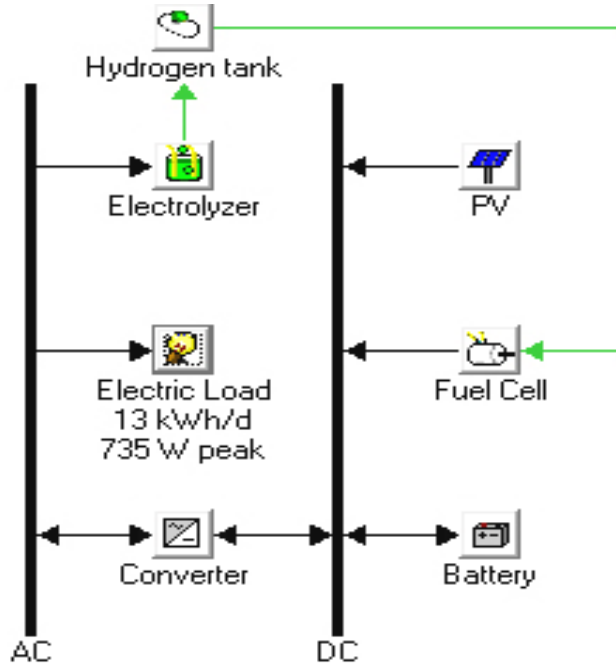
- güneş pillerinin verim hesaplarında sıcaklık ve yüzeyden kaynaklanan yayılım değerlerinin etkisini dikkate alması,
- istenilen sistem elemanlarının karakteristiklerinin modellemede kullanılmasına olanak sağlaması (elektrolizör hariç),
- hibrid sistemlerin güç üreten elemanlarının devreye girme zamanlarını belirleyebilmesi,
- yıllık enerji modellemesi yaparken, modelleme zamanı olarak 1 dakikaya kadar seçime olanak tanınması ve sonuçları seçilen zamana göre hesaplayabilmesi,
- dinamik yük modellemesi sayesinde sabit yük analizinden kaynaklanan hataları minimuma indirmesi,
- farklı kontrol stratejilerinin modellemedeki etkilerinin incelenebilmesi, optimizasyon ve duyarlılık analizi ile karşılaştırma yapabilmesi,
- ekonomik analiz yapılabilmesi,
- sistemin çevresel etkisinin değerlendirmesini yapabilmesi,
- şebekeden bağımsız ve şebekeye bağlı sistemleri karşılaştırabilmesi,
- arayüzünün kullanıcı dostu olması.

Ancak, HOMER yazılımının bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar kısaca aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- İzleyiciler ve sabit PV panelleri için iki ayrı üretim konfigürasyonunun seçilememesi,
- Elektrolizörün verim karakteristiğinin ilave edilememesi, sadece nominal güç ve verim ifadesine izin vermesi,
- İki invertör veya konvertör kullanımına izin vermemesi, sadece iki girişli invertör konfigürasyonuna olanak tanınması.

5.2. Sistem Bileşenlerinin Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Hibrid enerji sisteminin enerji modellemesini ve ekonomik analizini yapmak üzere sistemdeki güç üretim cihazlarının karakteristiklerinin HOMER programına eklenmesi gerekmektedir. Güneş-hidrojen sistemi elemanlarının HOMER yazılımında görünümü Şekil 5.1'deki gibi olmaktadır.



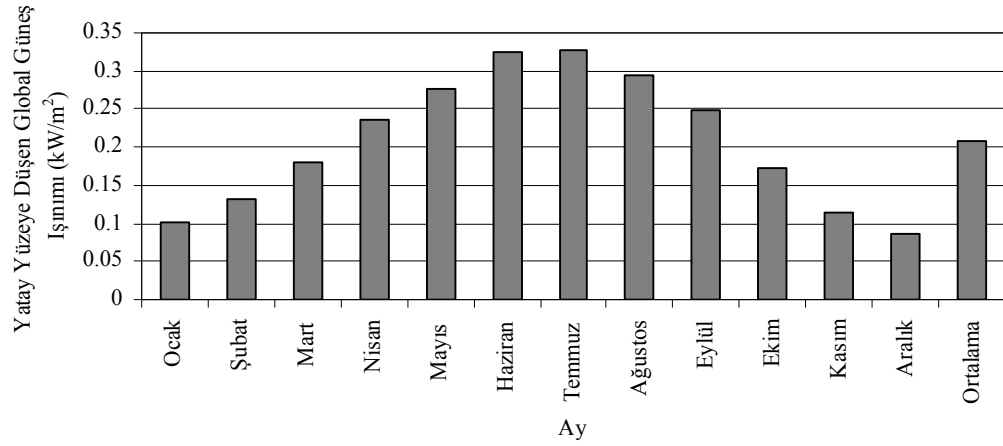
Şekil 5.1 Güneş-hidrojen sistemi elemanlarının HOMER yazılımında görünümü.

Sistem, programda modellenirken, programın yukarıda bahsedilen dezavantajlarından dolayı aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

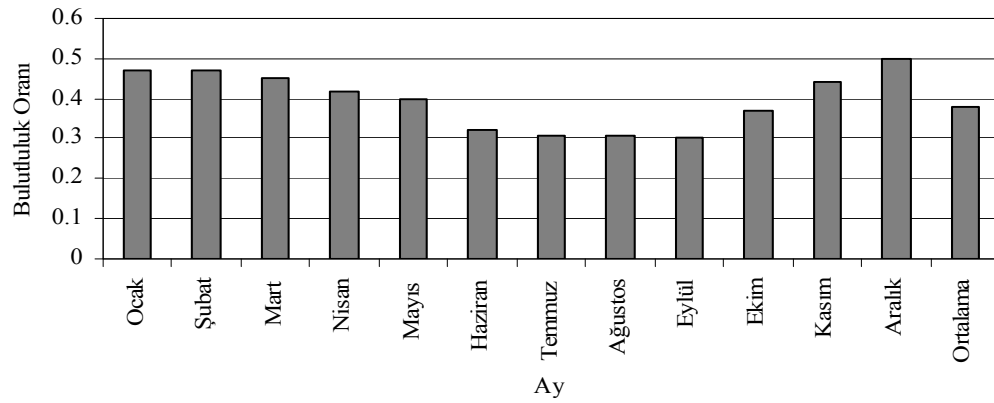
- Tüm PV panelleri 45° güneye yönelmiştir. Tek eksenli pasif izleyicilerin performansa etkisi ihmal edilmiştir.
- Elektrolizörün enerji ve ekserji verimi sabit kabul edilmiş; nominal gücünde ürettiği hidrojen miktarına göre değerler hesaplanmıştır.
- Modelleme zamanı 1 saattir.

5.2.1. Güneş pili panellerinin karakteristiği ve analizi

Sistemin kurulduğu Denizli iline ait meteorolojik veriler, ilin enlem ve boylamına göre 22 yıllık ortalama aylık değerler olarak programa girilmiştir. Denizli ilinin enlem ve boylamı sırasıyla $37^\circ 46'$ N ve $29^\circ 05'$ E şeklindedir. Yatay yüzeye düşen toplam güneş ışınımı ve bulutluluk oranı değerleri (Şekil 5.2 ve Şekil 5.3), Temmuz 1983 – Haziran 2005 arasındaki ortalama aylık değerler olarak NASA'nın uydu verilerinden elde edilmiştir (WEB_11 2008).



Şekil 5.2 Denizli ilinde yatay yüzeğe düşen ortalama aylık güneş ışınım miktarı.



Şekil 5.3 Denizli ilinin aylık ortalama bulutluluk oranı.

PV panelleri yüzeyine düşen toplam güneş ışınımının eldesinde ekstraterrestrial güneş ışınımının belirtilen yere düşme miktarının oranını belirten bulutluluk oranı (k) verilerinden yararlanılmaktadır. Yatay yüzeğe düşen toplam güneş ışınımı, Denklem 5.3'te gösterildiği gibi direkt ve difüz güneş ışınımından oluşmaktadır (Duffie ve Beckman 2006).

$$\bar{S}_T = \bar{S}_{T_b} + \bar{S}_{T_d} \quad (5.3)$$

Burada \bar{S}_T yatay yüzeğe düşen toplam güneş ışınımını, \bar{S}_{T_b} yatay düzeye düşen direkt güneş ışınımını ve \bar{S}_{T_d} ise yatay düzeye düşen difüz güneş ışınımını ifade etmektedir.

Genellikle güneş ışınımı ölçümlerinde yatay yüzeye düşen toplam güneş ışınımı kullanılmaktadır. Ancak direkt ve difüz güneş ışınımının elde edilmesi gerekmektedir. Bu değerlerin elde edilmesinde Denklem 5.4 kullanılabilir.

$$\frac{\bar{S}_{Td}}{\bar{S}_T} = \begin{cases} 1 - 0.09k & \text{eğer } k \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604k + 4.388k^2 - 16.638k^3 + 12.336k^4 & \text{eğer } 0.22 < k \leq 0.80 \\ 0.165 & \text{eğer } k > 0.80 \end{cases} \quad (5.4)$$

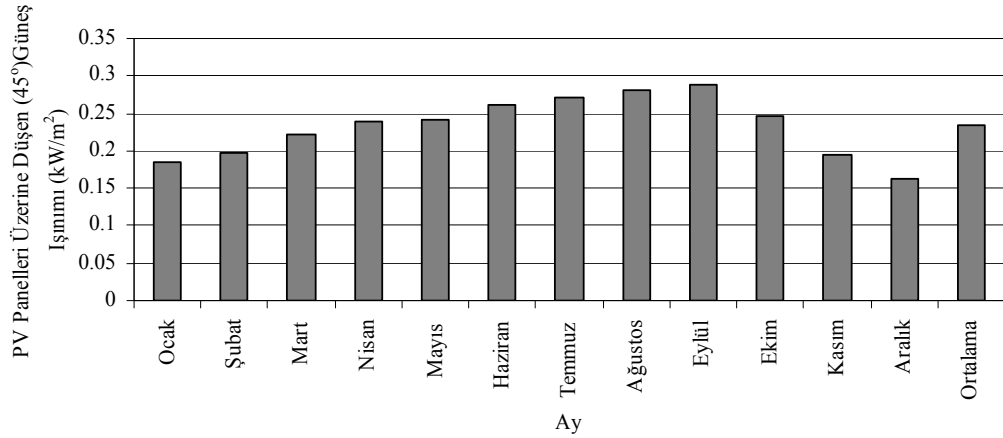
Eğimli bir yüzeye düşen, yani PV panellerinin üzerine düşen toplam güneş ışınımı ise Denklem 5.5 ile bulunabilir (Duffie ve Beckman 2006).

$$S_T = (\bar{S}_{Tb} + \bar{S}_{Td})R_b + \bar{S}_{Td}(1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[1 + f \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] + \bar{S}_T \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (5.5)$$

Burada R_b yatay yüzeye düşen direkt güneş ışınımının eğimli yüzeye düşen direkt güneş ışınımına oranını ($R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$) ifade etmektedir. f ise difüz ışınımın en çok geldiği yatay düzlemi gözönüne almak için kullanılmakta ve yatay aydınlık faktörü olarak alandırılmaktadır. Denklem 5.6, bu faktörün bağıntısını göstermektedir.

$$f = \sqrt{\frac{\bar{S}_{Tb}}{\bar{S}_T}} \quad (5.6)$$

Burada β eğimli yüzeyin yatayla yaptığı açı (45°) olmaktadır. ρ_g ise yüzey yayılım oranı (%) olup, bu çalışmada genel bir değer olan %20 değerindedir (Duffie ve Beckman 2006). Denklem 5.5 kullanılarak, PV panellerinin yüzeyine düşen toplam güneş ışınım miktarı Şekil 5.4'deki gibi elde edilmektedir.



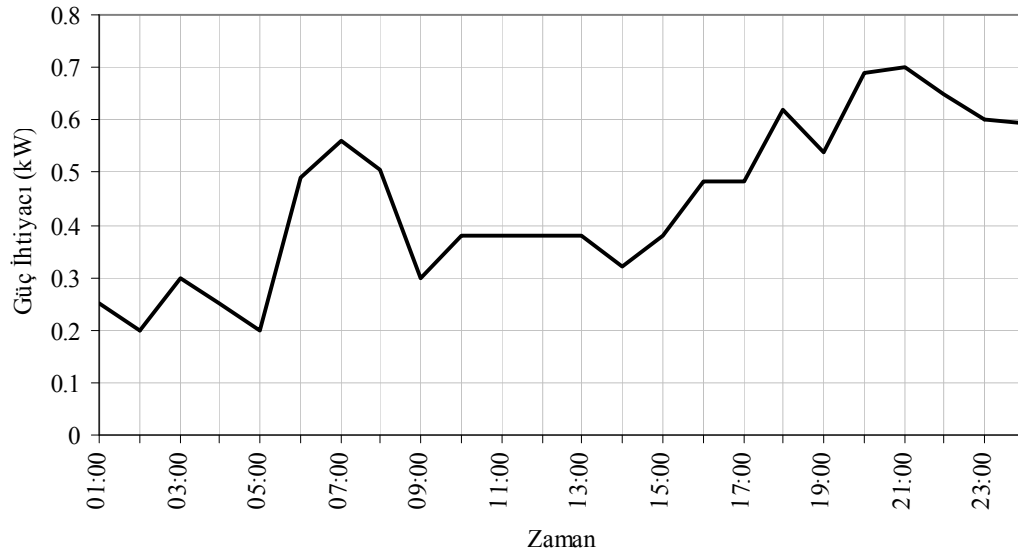
Şekil 5.4 PV panellerinin üzerine düşen toplam güneş ışınım miktarının aylık değerleri.

Hibrid sistemin ve bu sistemin güç üretim elemanlarından olan PV panellerinin performansını bulmak için yük altındaki davranışının incelenmesi gerekmektedir. Temiz Enerji Evi'nde bulunan alternatif akımla çalışan cihazların gün boyunca çektikleri toplam güç Tablo 5.1'de gösterilmektedir. Beyaz eşyalar seçilirken Arçelik markasının A sınıfı göz önüne alınmıştır. Temiz Enerji Evi'nde bulunmayan, fakat tipik bir evin ihtiyacı olan diğer cihazlar da tabloda gri olarak gösterilmiştir.

Tablo 5.1 Modellemede kullanılan elektrik enerjisi ihtiyacının tayini.

AC Cihazlar	Güç Tüketimi (W)	Sayısı	Günlük Çalışma Süresi (saat)	Günlük Enerji Tüketimi (Wh)
Aydınlatma	25	15	12	4500
Buzdolabı	160	1	24	1320
Bulaşık Makinası	50	1	1	50
Çamaşır Makinası	60	1	0.5	30
Televizyon	60	1	8	480
PC	100	5	8	4000
Müzik Seti	100	1	2	200
Kahve Makinası	200	1	1	200
Elektrikli Süpürge	300	1	1	300
Saç Kurutma Makinası	200	1	1	200
Aspiratör	180	1	2	360
Diğer				255
TOPLAM				12000

Tablodan görüldüğü gibi, günlük enerji ihtiyacı 12 kWh civarında olmaktadır. Yükün dinamik değişimini gözönünde alabilmek amacıyla HOMER yazılımı tarafından önerilen yükün saatlik ve günlük standart değişim yüzdesi kullanılmıştır. Bu değer, %10 olmaktadır. Yük değişimi, yıl boyunca yapılan analizde günlük olarak 675 W pik değerine ulaşmaktadır. Şekil 5.5, yükün seçilen bir gündeki değişimini (16 Temmuz) örnekleme amacıyla göstermektedir.

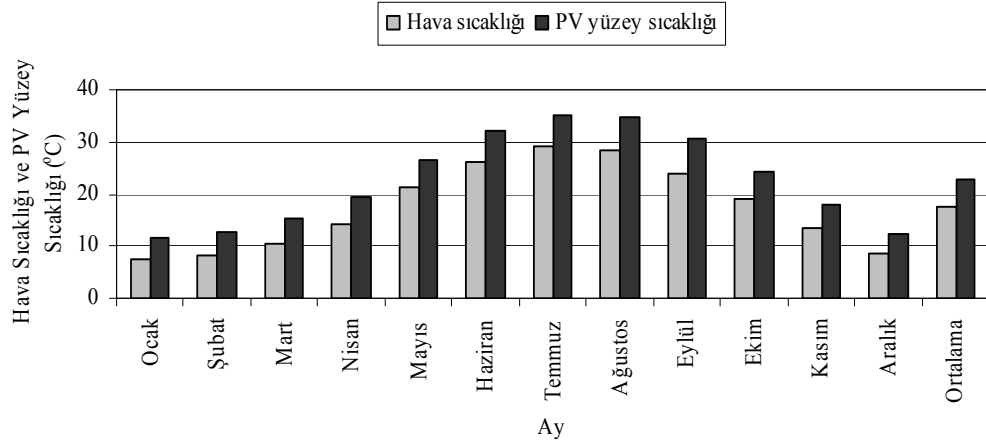


Şekil 5.5 Yük ihtiyacının bir günde saatlik değişimi.

PV panellerinin enerji ve ekserji verimlerinde etkide bulunan dış ortam hava sıcaklığı ve PV panellerinin yüzey sıcaklıkları Şekil 5.6'daki gibidir. Dış ortam hava sıcaklığı, NASA uydusu verilerinden elde edilmiştir (WEB_11 2008). PV panellerinin yüzey sıcaklığını bulmak için güneş pili üreticisi Kyocera'nın standart koşullardaki (ATM 1.5, 1000 W/m² güneş ışınımı ve yüzey sıcaklığı 47°C) değerlerden yararlanılmıştır. Yüzey sıcaklığı standart koşullardaki yüzey sıcaklığı, dış ortam sıcaklığı ve PV panelleri üzerinde düşen güneş ışınımının fonksiyonu olarak Denklem 5.7'den hesaplanabilmektedir (Würfel 2005).

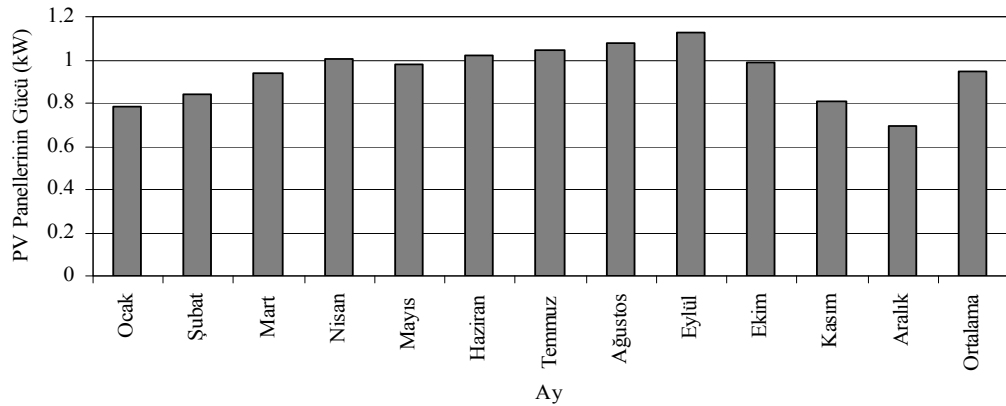
$$T_{cell} = T_{air} + \frac{S_T}{800}(T_{std} - 20) \quad (5.7)$$

Burada T_{cell} , PV panellerinin yüzey sıcaklığını, T_{air} dış ortam sıcaklığını ve T_{std} standart koşullardaki PV panellerinin yüzey sıcaklığını göstermektedir. T_{std} , bu çalışmada üreticinin belirlediği değer olan 47°C olarak kullanılmıştır.



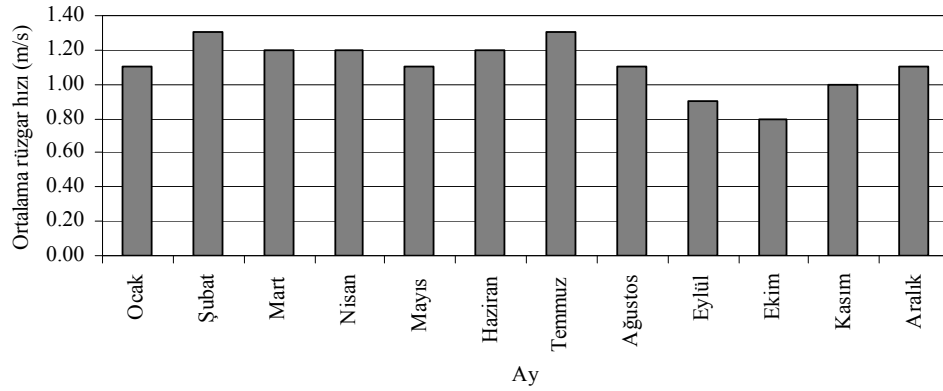
Şekil 5.6 Aylık ortalama hava sıcaklığı ve güneş pili panellerinin yüzey sıcaklığı.

PV panellerinden üretilen elektrik için panellerin kablolamasından, kir ve diğer etmenlerden kaynaklanabilecek üretim düşümü programda hesaba katılarak, %15 oranında alınmıştır. PV panellerinin (5 kWe) üretebileceği gücün aylık ve yıllık ortalama saatlik değerleri programla hesaplanmış ve Şekil 5.7’de gösterilmiştir.

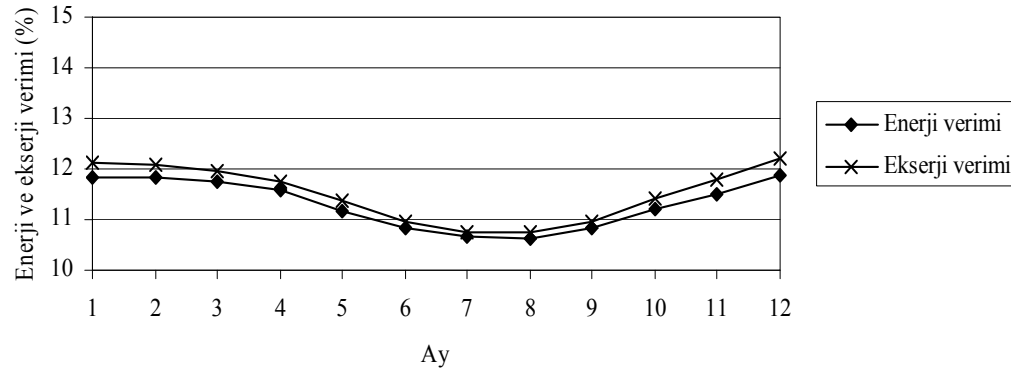


Şekil 5.7 Güneş pili panellerinin aylık ve yıllık ortalama saatlik güç üretimi.

PV panellerinin üretebileceği gücün aylık ortalama saatlik değerlerinin belirlenmesinden sonra Denizli iline ait aylık ortalama rüzgar hızları, hava ve PV panellerinin yüzey sıcaklıkları kullanılarak PV panellerinin aylık ortalama enerji ve ekserji verimleri hesaplanabilmektedir. Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nün 1975-2005 yılları arasındaki verilerine göre (MGM 2007) Denizli iline ait aylık ortalama rüzgar hızları Şekil 5.8'deki gibi olmaktadır. PV panellerinin aylık ortalama enerji ve ekserji verimleri Şekil 5.9'daki gibi değişim göstermektedir.



Şekil 5.8 Denizli iline ait aylık ortalama rüzgar hızları.

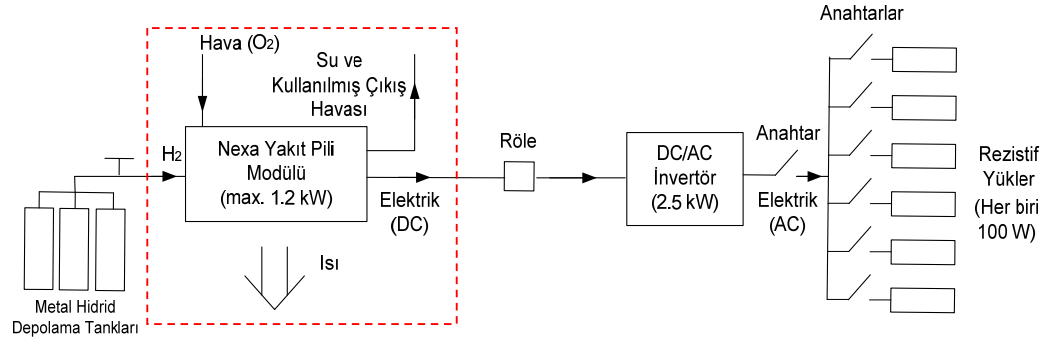


Şekil 5.9 PV panellerinin aylık ortalama enerji ve ekserji verimleri.

Şekil 5.10'da görüldüğü gibi ekserji verimleri enerji verimlerinden daha büyük olmaktadır. Yıllık ortalama enerji verimi %11.24, ekserji verimi ise %11.43 civarındadır. Bunun temel sebebi düşük rüzgar hızları dolayısıyla PV panellerinden çevreye gerçekleşen ısı transferinin az olmasıdır. Yaz aylarında PV panellerinin yüzey sıcaklıklarının ve panellerin üzerine düşen güneş ışınımının artması sonucu PV panellerinin enerji ve ekserji verimlerinde düşme gözlenmektedir.

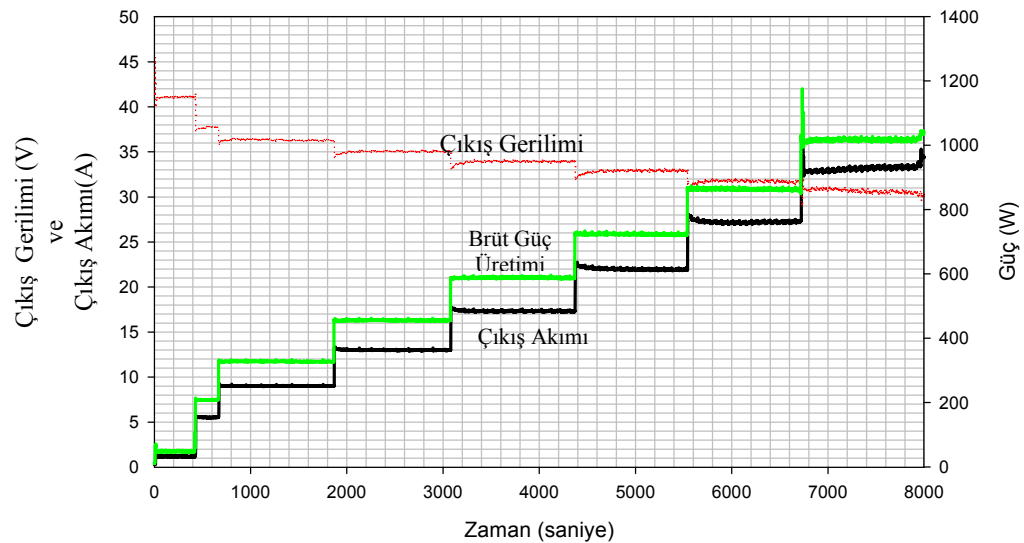
5.2.2. Yakıt pili sisteminin karakteristiği ve analizi

Yakıt pilinin performans analizi için oluşturulan deney düzeneği Şekil 5.10'da görülmektedir. Düzenek, metal-hidrid hidrojen tankları, yakıt pili sistemi, röle, DC/AC invertör ve rezistif yüklerden oluşmaktadır.



Şekil 5.10 Nexa yakıt pili sisteminin performans analizi için kurulan deney düzeneği.

Düzenekte, hidrojenin katı halde depolandığı üç adet metal hidrid tank kullanılmıştır. Hidrojen gaz basıncı, tanklarda 0 ila 17 bar (gösterge) aralığındadır. Röle ise yakıt pili sistemi kapalıyken veya stand-by konumundayken açık, yakıt pili sistemi çalışırken kapalı konumda bulunmaktadır. İnvörtör ise AC elektrik yüklerini ve düzenekte kullanılan, her biri 100 W'lık altı adet AC rezistif yükü karşılamak amacıyla kullanılmıştır. Deney sırasında, yakıt pili sisteminin zamana bağlı yük karakteristiği Şekil 5.11'deki gibidir.



Şekil 5.11 Nexa yakıt pili sisteminin yük karakteristiği.

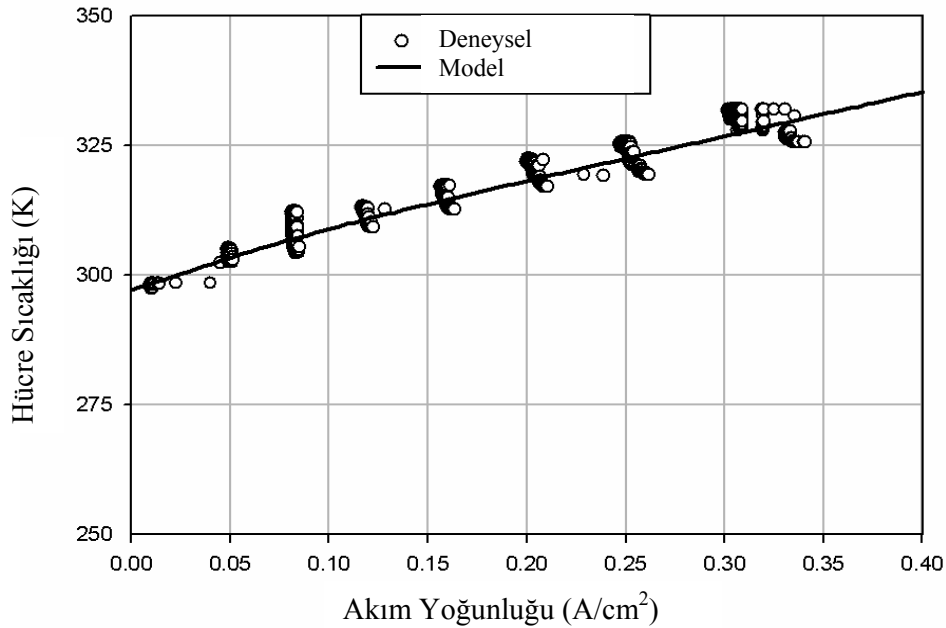
Yakıt pilinin çalışma sıcaklığı (hücre sıcaklığı), akım yoğunluğunun artması ile değişmekte ve artmaktadır. Hücre sıcaklığı, yakıt pili tarafından maksimum güçte 65°C'de sabit tutulmaya çalışılmaktadır. Zhang vd (2008) tarafından yapılan çalışmadaki Nexa yakıt pili sisteminin sıcaklık değişim modeli kullanılarak, Denklem 5.8 ile hücre sıcaklığı tahmin edilebilmektedir.

$$T_{FC} = 273.15 + T_1 + (T_1 - b + c \cdot i \cdot A_{cell}) (1 - e^{-t/\tau}) \quad (5.8)$$

Burada T_1 , yakıt pili sisteminin başlangıç sıcaklığıdır. b ve c ise yakıt pili sistemine ait sabitlerdir. t , deney zamanını (yükleme zamanını) ifade etmektedir. Zaman sabiti aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır:

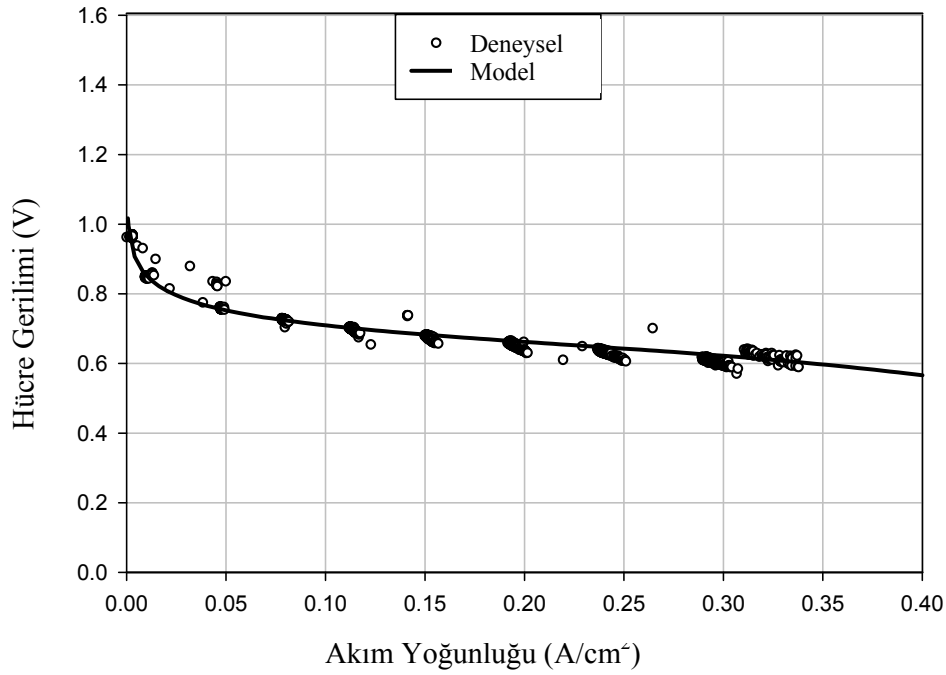
$$\tau = \frac{d}{i \cdot A_{cell}} \quad (5.9)$$

Burada, $T_1=24^\circ\text{C}$, $b=20$, $c=0.7$, ve $d=4000$ olmaktadır. Deney ve model sonuçları Şekil 5.12'de gösterilmektedir.



Şekil 5.12 Nexa yakıt pili sisteminin sıcaklık profili.

Yakıt pili sisteminin içerisindeki parazitik yüklerin yanı sıra, invertör fanı da invertörün soğutması için 175 W güç tüketmektedir. Bu güç, tüketim olarak sistem yüküne ilave edilmiştir. Tersinir hücre gerilimi hesaplanarak 1.173 V olarak bulunmasına rağmen, pratikteki çalışma koşulları altında açık devre gerilimi 1.030 V olarak modellemede kullanılan denklemlerle bulunmuştur. Tersinir hücre gerilimi ile pratikte gerçekleşen hücre gerilimi arasındaki fark gerilim kayıpları olmaktadır ve aynı zamanda polarizasyonlar olarak isimlendirilmektedir; bu kayıplardan bir önceki bölümde bahsedilmiştir. Yakıt pili sisteminin polarizasyon dağılımı Şekil 5.13'deki gibi deneysel ve modelleme denklemleri ile elde edilmiştir.



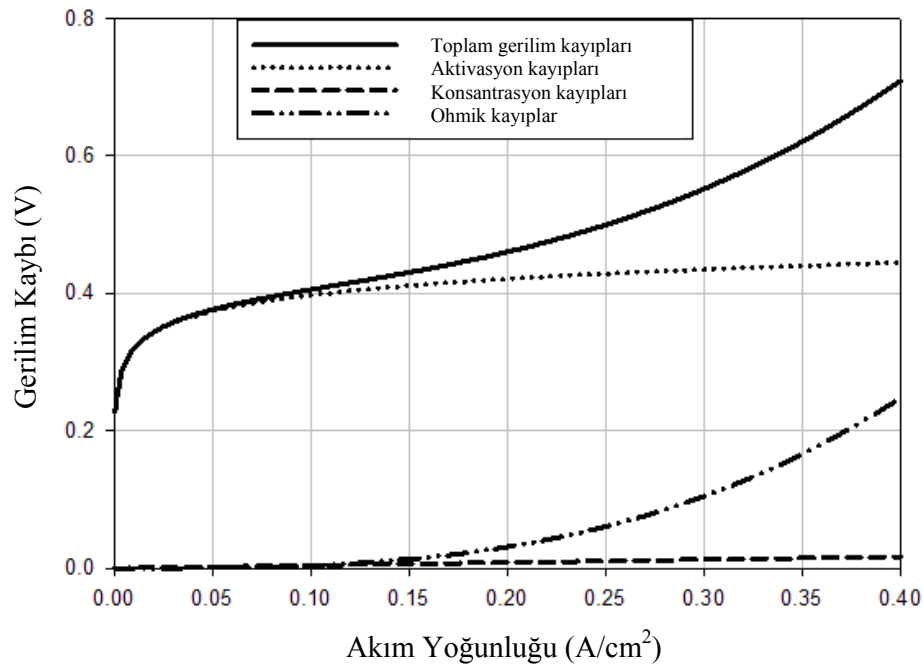
Şekil 5.13 Nexa yakıt pili sisteminin deneysel ve modelleme sonucu elde edilen polarizasyon eğrisi.

Yakıt pili sisteminin çalışma koşulları, deneyler sırasında ölçülerek aşağıdaki Tablo 5.2'de gösterilmektedir.

Tablo 5.2 Nexa yakıt pili sisteminin çalışma koşulları

Hücre sıcaklığı (Yakıt pili çalışma sıcaklığı), T_{FC} (K)	298-335
Anod basıncı, P_A (bar)	1.345
Katod sıcaklığı, P_C (bar)	1.152
Anod stokiyometrisi (ζ_A)	1.1
Katod stokiyometrisi (ζ_C)	2.5

Gerilim kayıplarının türlerine göre dağılımı aktivasyon, ohmik ve konsantrasyon gerilim kayıpları olarak belirtilmiştir. Bu gerilim kayıpları çalışma koşullarına bağlı olarak modelleme denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır ve Şekil 5.14'de görülmektedir.

**Şekil 5.14** Yakıt pili sisteminin aktivasyon, ohmik, konsantrasyon gerilim kayıpları ve toplam (tersinmez) gerilim kayıpları.

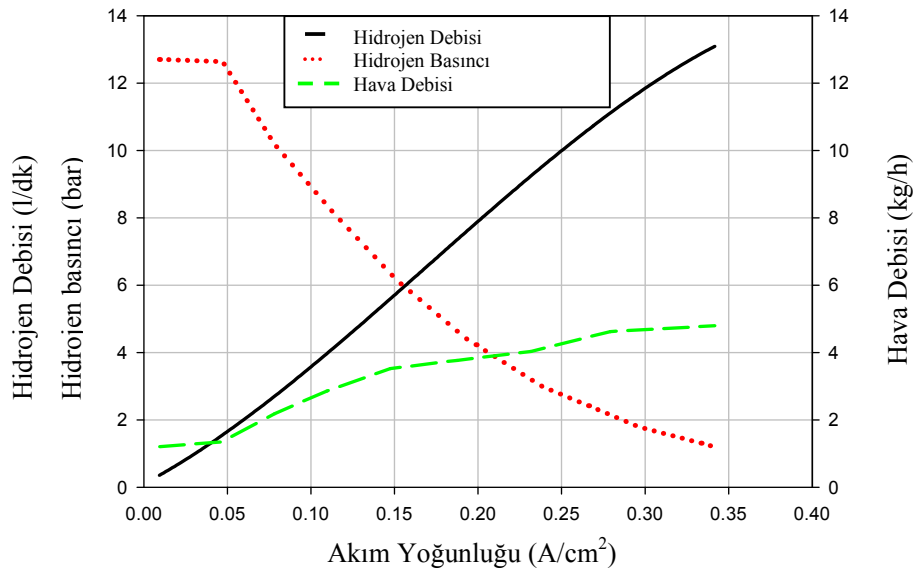
Şekil 5.15'de görüldüğü gibi aktivasyon gerilim kayıpları sistemin çalışmaya başladığı anda etkili olmaktadır ve hücre geriliminin ani düşüşüne neden olmaktadır. Bu etki, yaklaşık 0.10 A/cm² akım yoğunluğu değerinde azalmaya başlamakta, ohmik ve

konsantrasyon gerilim kayıplarının etkisi artmaktadır. Özellikle akım yoğunluğunun 0.15 A/cm^2 değerinden sonra ohmik gerilim kayıplarının etkisi daha fazla artmaktadır.

Deney başlangıcında metal-hidrid tanklarında yer alan hidrojen 12.7 bar basınçtır. Hidrojen kullanıldıkça, tanklardaki basınç Şekil 5.15'deki gibi azalmaya başlamaktadır. Hidrojen debisi ise akım yoğunluğu artışına bağlı olarak artmaktadır. Şekilde ayrıca giriş havasının debi değişimi de yer almaktadır. Giriş havasının debisi yakıt pili sisteminin yazılımı ile kayıt altına alınabilmektedir. Çıkış hava debisi için ise aşağıdaki Denklem 5.10 kullanılabilir (Larmine ve Dicks 2003).

$$\dot{m}_{air, çıkış} = 3.57 \times 10^{-7} \times \lambda_C \times \frac{\dot{W}_{net}}{V_{hücre}} - 8.29 \times 10^{-8} \times \frac{\dot{W}_{net}}{V_{hücre}} \text{ (kg/s)} \quad (5.10)$$

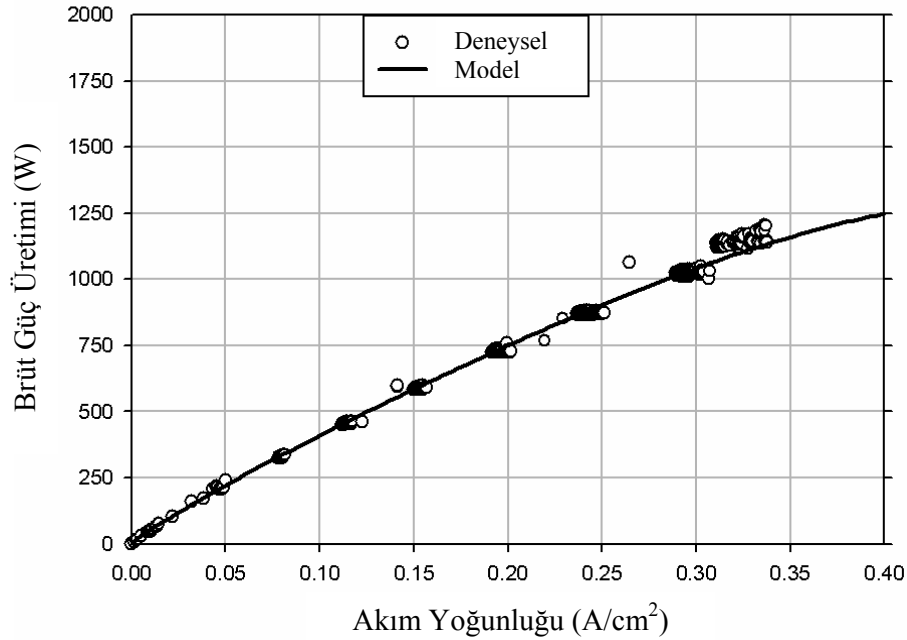
Burada λ_C , katod stokiyometrisidir. $V_{hücre}$, her bir hücre için çıkış gerilimi, deneysel çıkış gerilimi değerlerinden ve yakıt pili dizinini oluşturan 47 hücre adedinden hesaplanmıştır. Hidrojen kaçak miktarı veya tepkimeye girmeyen hidrojen debisi çok küçük değerlere sahip olduğundan ihmal edilmiştir. Tepkime sonucu oluşan suyun debisi gerçek zamanlı ölçümler ile elde edilmiştir



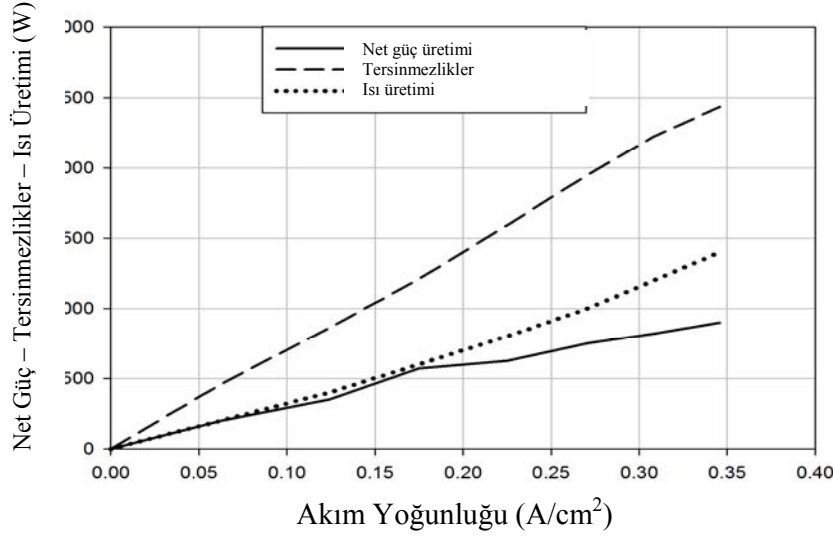
Şekil 5.15 Hidrojen, hava giriş debilerinin ve hidrojen basıncının değişimi.

Yakıt pili sisteminin brüt güç üretimi deneysel olarak elde edilmiş ve modellemede kullanılan güç ile karşılaştırılmıştır. Deneysel ve model verilerinin uyumlu olduğu Şekil 5.16'de söylenebilmektedir. Yakıt pilinin başlangıçta ihtiyaç duyduğu parazitik yük, yaklaşık 35 W civarında olmaktadır. Nominal güç olan 1.2 kWe gücünde ise 250 W parazitik yüke ihtiyaç duymaktadır.

Yakıt pili sisteminin sınırları içerisindeki bu yüklere ilave olarak DC/AC invertörün soğutma havasını karşılayan fan 175 W güç tüketimi gerçekleştirmektedir. Bu yüzden invertör fanının tükettiği güç, yakıt pili sisteminin çalışması boyunca sabit ve yakıt pili sistemi tarafından karşılanması gereken ilave bir yük olarak göz önüne alınmıştır. Şekil 5.17'de yakıt pili sisteminin net güç üretimi ve ısı üretimi deneysel sonuçlara göre görülmektedir. Ayrıca, Şekil 5.18'de hesaplanan tersinmezlikler bulunmaktadır.



Şekil 5.16 Yakıt pili tarafından üretilen brüt gücün değişimi.

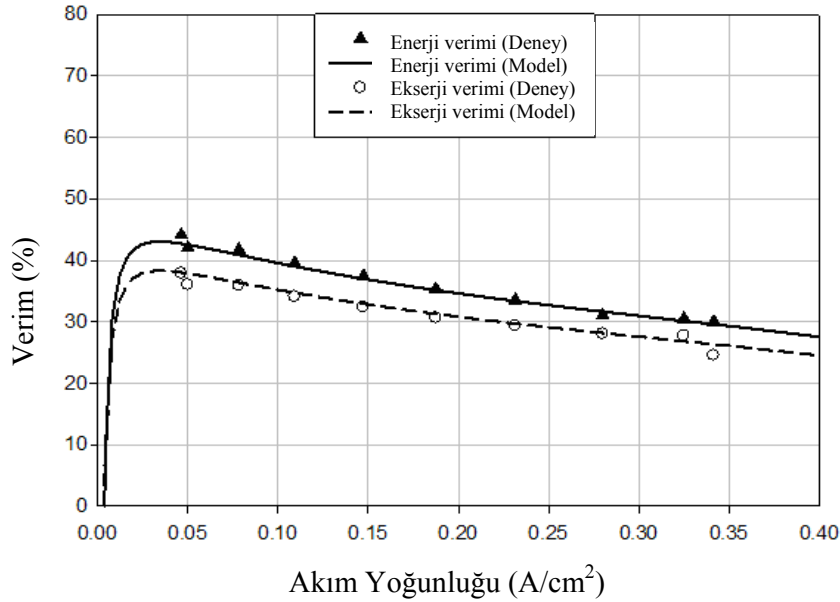


Şekil 5.17 Net güç üretimi, tersinmezlikler ve ısı üretiminin akım yoğunluğuyla değişimi.

Çalışmada, ekserji analizi ve yakıt pilinin verimliliğinin değerlendirilmesinde aşağıdaki kabuller ve değerler kullanılmıştır:

- Tepkimeye giren gazlar düzgün akışlı, sıkıştırılamaz ve laminer akışlıdır.
- Gazlar, ideal gazdır.
- Kinetik ve potansiyel ekserjiler ihmal edilmiştir.
- Ölü hal basıncı 1 bar ve ölü hal sıcaklığı 298 K'dir.

Sonuç olarak, hesaplanan enerji ve ekserji değerleri Şekil 5.18'deki gibi elde edilmiştir. Akım yoğunluğunun 0.047 ila 0.348 A/cm² arasında değişmesiyle yakıt pili sisteminin enerji veriminin %44 ila %30 arasında olduğu, buna rağmen ekserji veriminin %38 ila %24.5 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Şekilden net güç üretimi artışı ile sistemin enerji ve ekserji verimliliğinde düşüşün olduğu gözlenmektedir. Yine 5.6 A (0.047 A/cm²) akım değerinde invertör fanının çalışmaya ve AC elektrik üretimine başladığı söylenebilir.

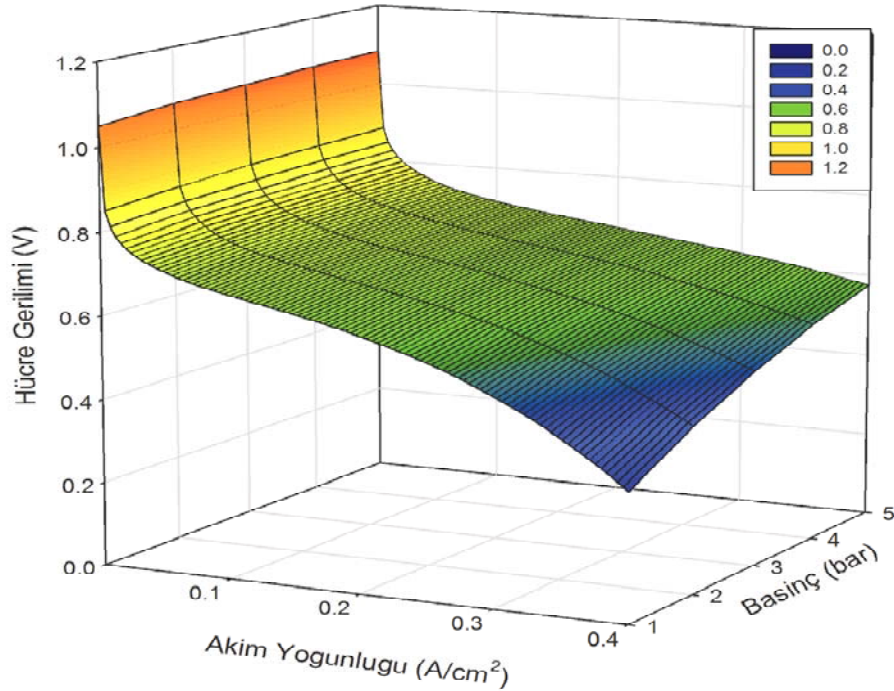


Şekil 5.18 Yakıt pili sisteminin enerji ve ekserji veriminin akım yoğunluğu ile değişimi.

Farklı yüklere ait enerji ve ekserji verimleri, yakıt pili sisteminin yüksek tersinmezliğe sahip olduğunu göstermiştir. Yakıt pillerinin yüksek verime sahip cihazlar olmasına rağmen, kimyasal ve elektrokimyasal tepkimelerin gerçekleştiği yerlerde ekserji yıkımlarının arttığı söylenebilir.

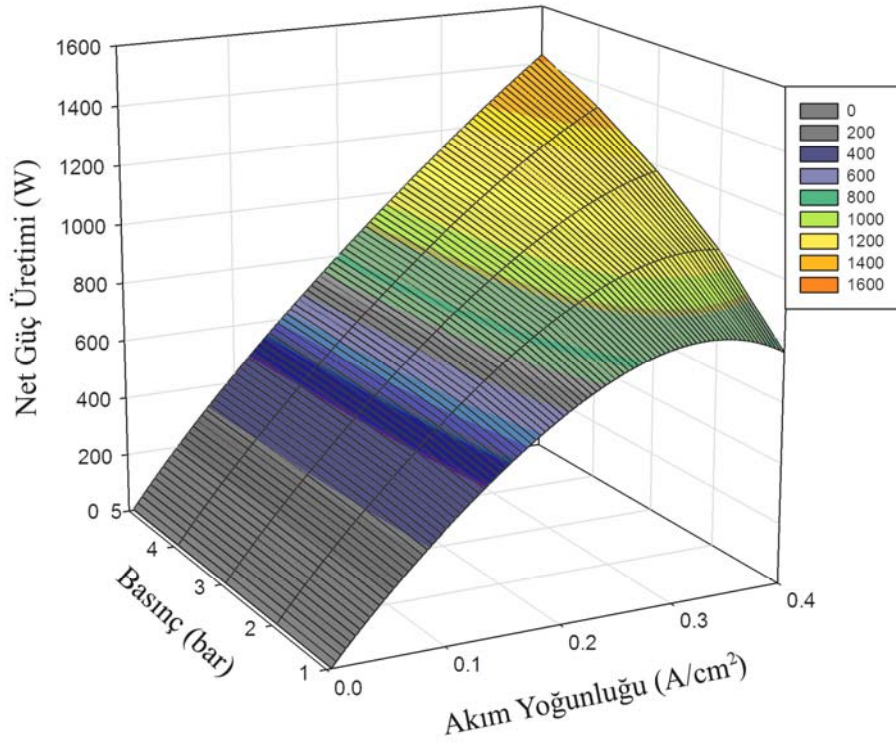
PEM yakıt pili sisteminin farklı çalışma koşulları altında performansının değişimini gözlemek amacıyla, aynı zamanda parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Modelleme denklemleri kullanılarak farklı çalışma koşullarının polarizasyon eğrilerine, net güç üretimine ve enerji-ekserji verimlerine etkisi bu parametrik çalışma ile incelenmiştir. Farklı çalışma koşullarının (basınç, sıcaklık ve anod stokiyometrisi) modellemede kullanılması ile polarizasyon eğrilerinin, net güç üretiminin ve enerji-ekserji verimlerinin değişimleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Basıncın anod ve katod için aynı olduğu kabulü yapılmıştır. Basıncın etkisini görebilmek amacıyla basınç 1-5 bar arasında değiştirilerek, sıcaklık ve anod stokiyometrisi sabit tutulmuştur. Sıcaklığın, akım yoğunluğu ile değiştiği daha önceki kısımlarda belirtilmesine rağmen, yakıt pili sistemi sıcaklığı yaklaşık 330 K değerinde tutmaya çalışılmaktadır. Bu yüzden 330 K değeri, çalışma sıcaklığı olarak seçilmiştir. Anod stokiyometrisinin 1.1 olduğu göz

önüne alınmıştır. Şekil 5.19'de basıncın polarizasyon eğrilerine etkisi görülebilmektedir.



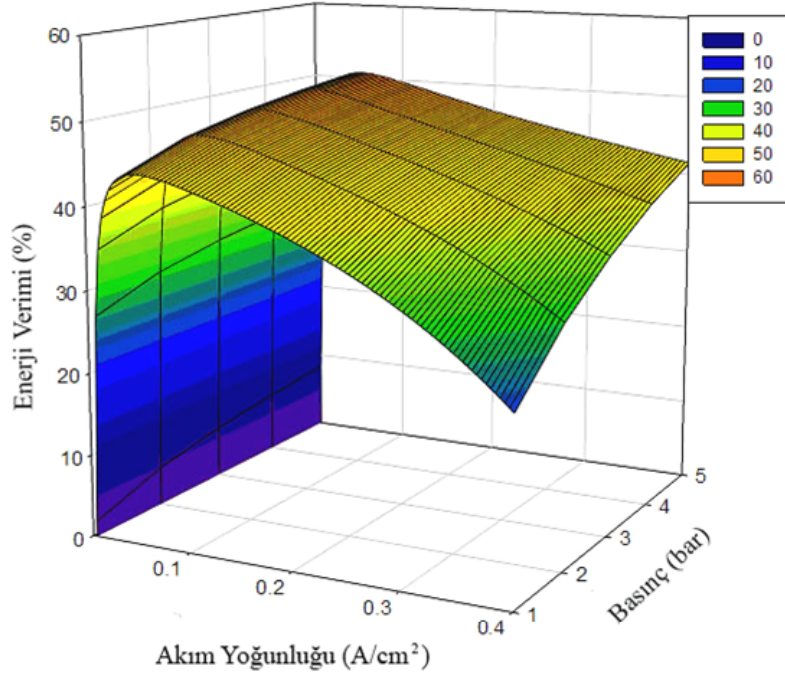
Şekil 5.19 Polarizasyon eğrilerinin basıncın fonksiyonu olarak sabit sıcaklık (330 K) ve sabit anod stokiyometrisi (1.1) altında değişimi.

Tersinir hücre gerilimi, aktivasyon, ohmik ve konsatrasyon gerilim kayıpları basınca bağlı olmaktadır. Bu etki, lineer olmayan bir şekildedir ve Şekil 5.21'de görülmektedir. Açık devre gerilimi 1 bar basınçta 0.96 V iken, 5 bar basınçta 1.04 V gerilimine yükselmektedir. Yüksek akım yoğunluklarında basıncın hücre gerilimine etkisi daha fazla olmaktadır. Örneğin, 5 bar basınçta hücre geriliminin 0.4 A/cm² akım yoğunluğundaki değeri 0.58 V iken, 1 bar basınçta aynı akım yoğunluğu için gerilim değeri 0.22 V değerine düşmektedir. Yüksek akım yoğunluklarında soğutma fanının ve hava kompresörünün güç tüketimi artmasına rağmen net güç üretimi Şekil 5.20'deki gibi artmaktadır.

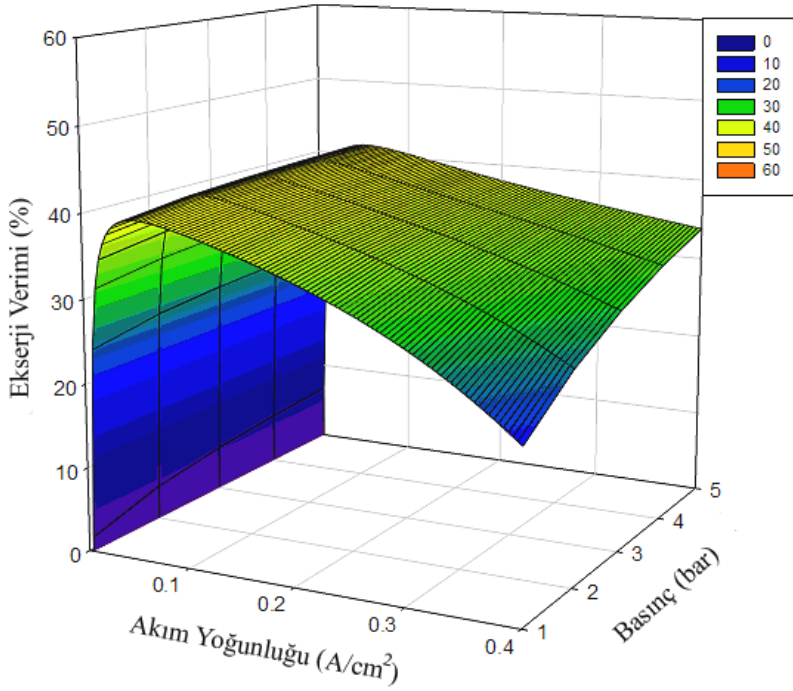


Şekil 5.20 Net güç üretiminin basıncın fonksiyonu olarak sabit sıcaklık (330 K) ve sabit anod stokiyometrisi (1.1) altında değişimi.

Basıncın, sistem performansına enerji ve ekserji verimleri göz önüne alınarak etkisi ise Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'de görülmektedir. Sistemin enerji ve ekserji verimi 0.047 A/cm^2 akım yoğunluğu değerinde maksimum değerlerine ulaşmaktadır. Bu akım yoğunluğu değerinden sonra hava kompresörünün devreye girmesiyle enerji ve ekserji verimlerinde düşme yaşanmaktadır. Basıncın artmasıyla polarizasyon ve net güç üretimindeki gibi enerji ve ekserji verimleri de artmaktadır. 0.047 ile 0.4 A/cm^2 akım yoğunluğu aralığında enerji verimi 1 bar basınç için %43 ile %20; 5 bar basınç için %51 ile %41 arasında değişmektedir (Şekil 5.21); ekserji verimi ise 1 bar basınç için %40 ile %18 ve 5 bar için %41 ile %33 arasında olmaktadır (Şekil 5.22).

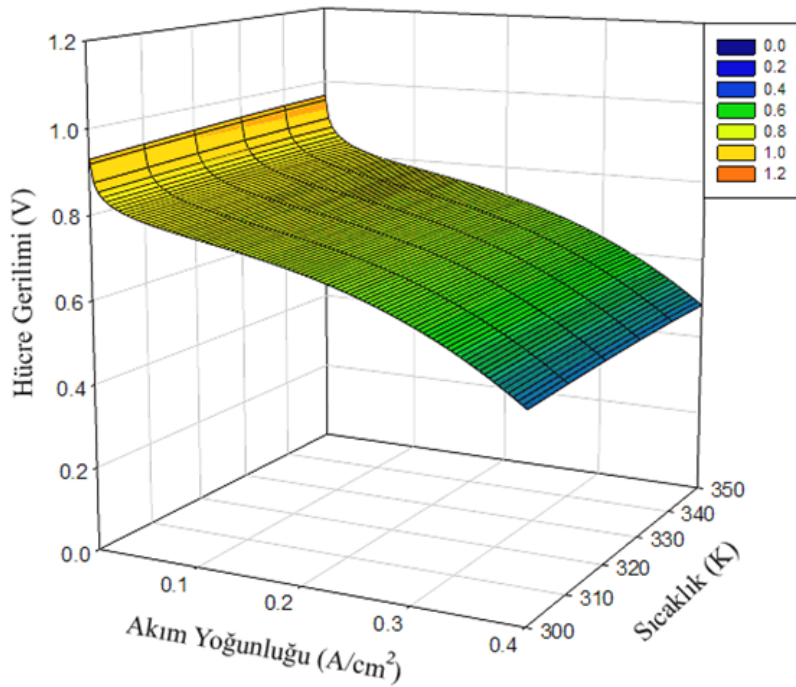


Şekil 5.21 Enerji veriminin basıncın fonksiyonu olarak sabit sıcaklık (330 K) ve sabit anod stokiyometrisi (1.1) altında değişimi.



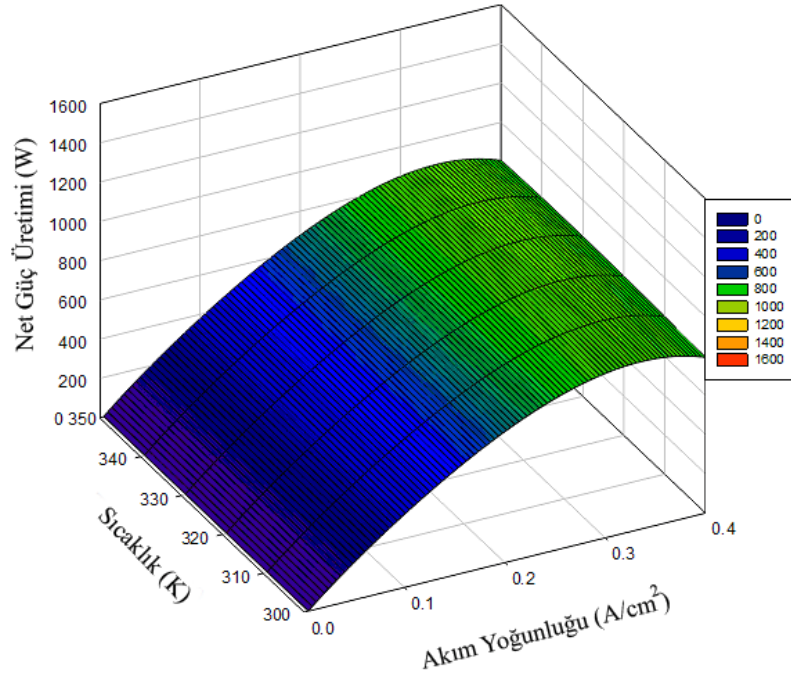
Şekil 5.22 Ekserji veriminin basıncın fonksiyonu olarak sabit sıcaklık (330 K) ve sabit anod stokiyometrisi (1.1) altında değişimi.

Sıcaklığın, polarizasyon eğrilerine, net güç üretimine ve enerji-ekserji verimine etkisini incelemek amacıyla sabit basınç ve sabit anod stokiyometrisi altında parametrik çalışma yapılmıştır. Sıcaklık 300-350 K arasında değiştirilerek basınç 1 bar, anod stokiyometrisi 1.1 olarak alınmıştır. Şekil 5.24’de sıcaklığın polarizasyon eğrilerine etkisi görülmektedir. Açık devre gerilimi sıcaklığa bağlı olarak seçilen çalışma koşullarında 0.91 V ile 0.95 V arasında değişmektedir. Şekil 5.23’de görüldüğü gibi sıcaklığın yüksek akım yoğunluklarında etkisi oldukça az olmaktadır. Seçilen 300-350 K aralığında hücre geriliminin değişmediği söylenebilir.

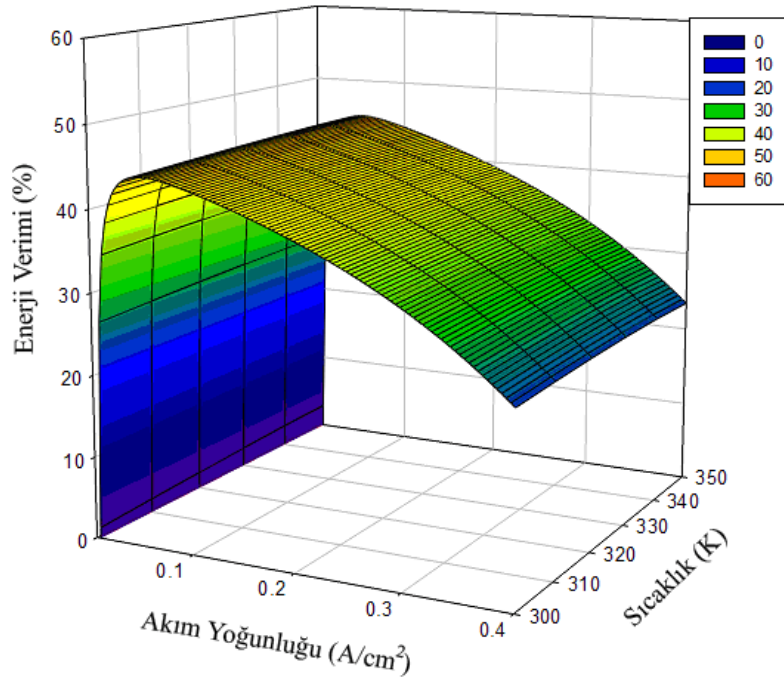


Şekil 5.23 Polarizasyon eğrilerinin sıcaklığın fonksiyonu olarak sabit basınç (1 bar) ve sabit anod stokiyometrisi (1.1) altında değişimi.

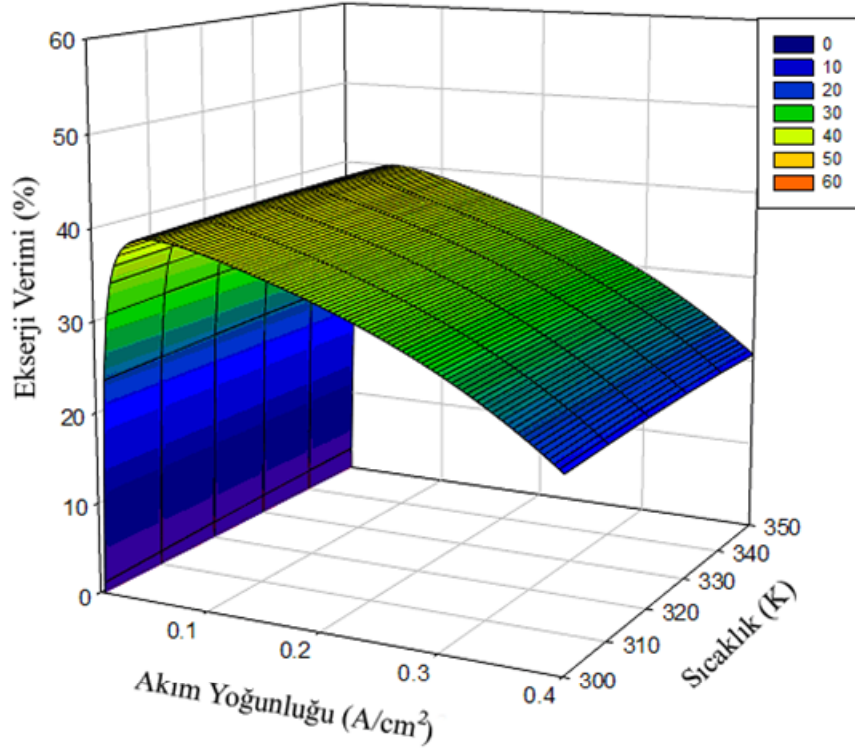
Sıcaklığın net güç üretimine etkisi Şekil 5.24’de görülmektedir. Sıcaklığın net güç üretimine etkisinin olmadığı Şekil 5.24’den söylenebilmektedir. Şekil 5.25 ve Şekil 5.26’da ise enerji ve ekserji verimlerinin sıcaklığın fonksiyonu olarak değişimi bulunmaktadır. 0.07 ile 0.4 A/cm² akım yoğunluğu aralığında enerji verimi %45 ile %23 arasında değişmektedir (Şekil 5.25); ekserji verimi ise %40.5 ile %20 arasında olmaktadır (Şekil 5.26).



Şekil 5.24 Net güç üretiminin sıcaklığın fonksiyonu olarak sabit basınç (1 bar) ve sabit anod stokiyometrisi (1.1) altında değişimi.

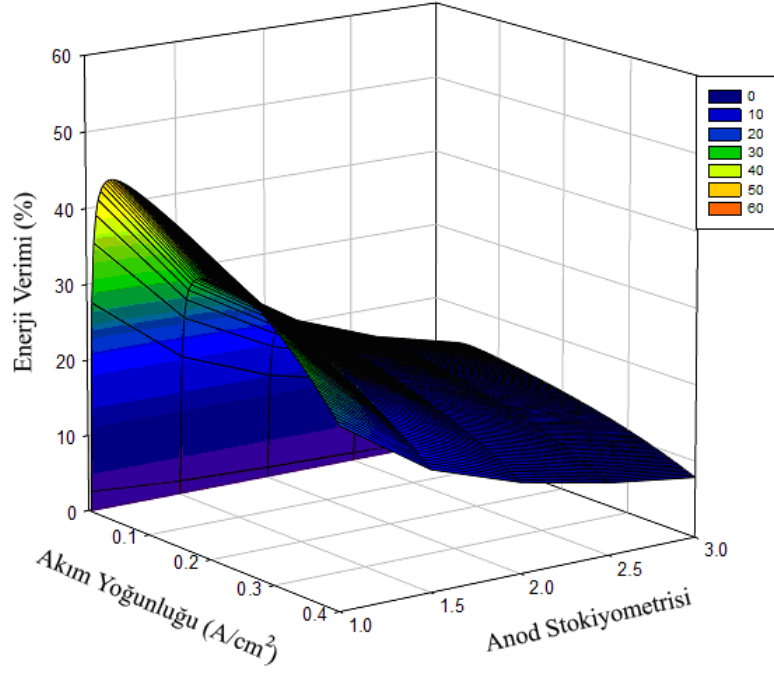


Şekil 5.25 Enerji veriminin sıcaklığın fonksiyonu olarak sabit basınç (1 bar) ve sabit anod stokiyometrisi (1.1) altında değişimi.

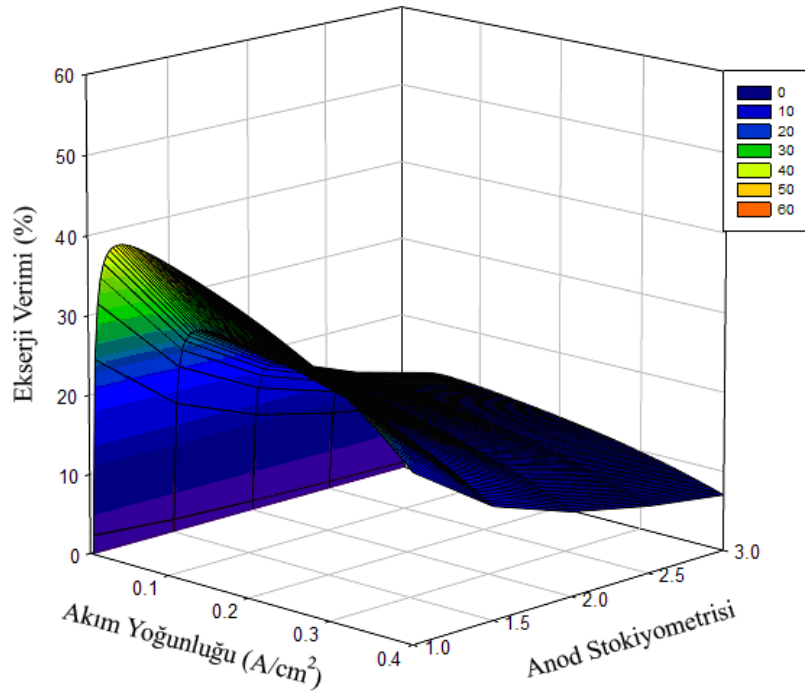


Şekil 5.26 Ekserji veriminin sıcaklığın fonksiyonu olarak sabit basınç (1 bar) ve sabit anod stokiyometrisi (1.1) altında değişimi.

Son olarak, parametrik çalışma anod stokiyometrisinin 1-3 arasında değişiminin etkisini gözlemlemek amacıyla sabit basınç (1 bar) ve sabit sıcaklık (330 K) için gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.27, anod stokiyometrisinin 1-3 arasında değişiminin enerji verimine etkisini göstermektedir. Düşük akım yoğunluklarında enerji ve ekserji verimleri oldukça fazla değişim göstermektedir. Enerji ve ekserji verimlerinin anod stokiyometrisinin artmasıyla azaldığı gözlenmektedir. Enerji verimi, 0.07 ile 0.4 A/cm² akım yoğunluğu aralığında, anod stokiyometrisinin 1 değeri için %43 ile %25 arasında; anod stokiyometrisinin 3 değeri için %13 ile %8 arasında değiştiği görülmektedir (Şekil 5.27). Aynı akım yoğunluğu aralığı için, ekserji veriminin anod stokiyometrisinin 1 değeri için %39 ile %21 arasında; anod stokiyometrisinin 3 değeri için %12 ile %7 arasında değiştiği görülmektedir (Şekil 5.28).



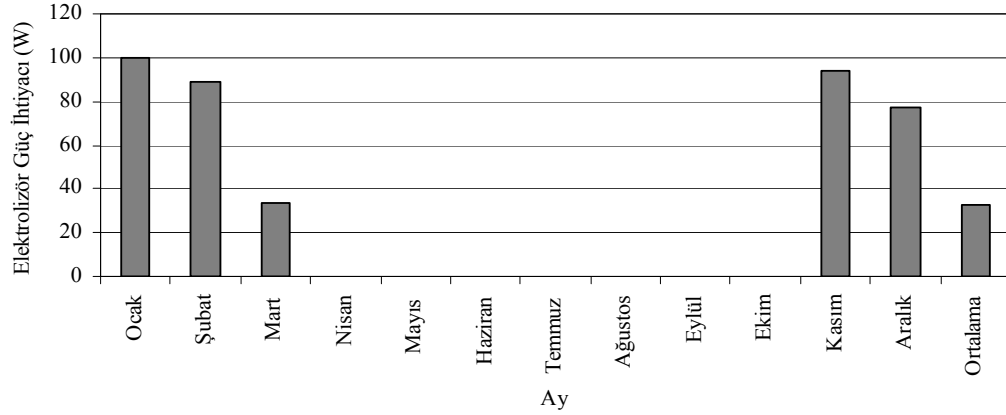
Şekil 5.27 Enerji veriminin anod stokiyometrisinin fonksiyonu olarak sabit basınç (1 bar) ve sabit sıcaklık (330 K) altında değişimi.



Şekil 5.28 Ekserji veriminin anod stokiyometrisinin fonksiyonu olarak sabit basınç (1 bar) ve sabit sıcaklık (330 K) altında değişimi.

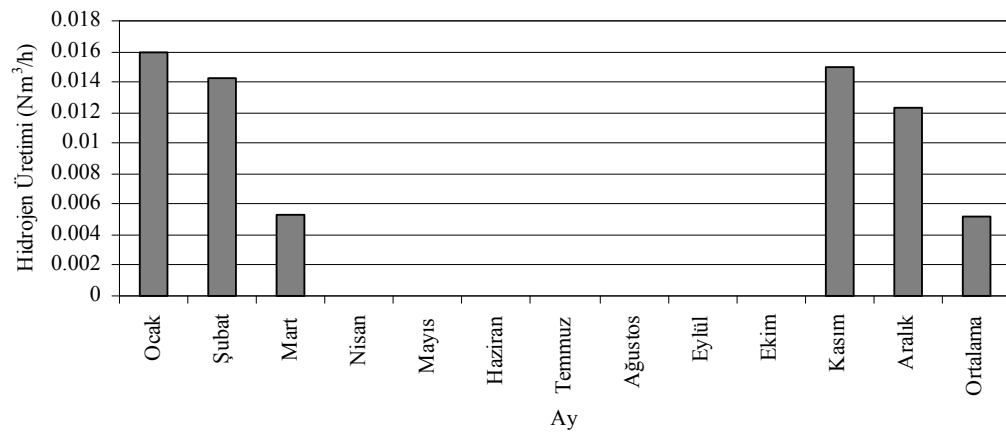
5.3. Enerji Analizi Sonuçları

HOMER programı kullanılarak yapılan yıllık enerji analizi sonucu elektrolizörün aylık ortalama saatlik güç ihtiyacı Şekil 5.29'daki gibi belirlenmiştir. Elektrolizörün, Nisan-Ekim aylarında çalıştırılmasının ekonomik açıdan fizibl olmadığı ve hidrojen tanklarının dolu olması sebebiyle elektrolizörün çalışmasına ihtiyaç duyulmayacağı program tarafından ortaya çıkarılmıştır.



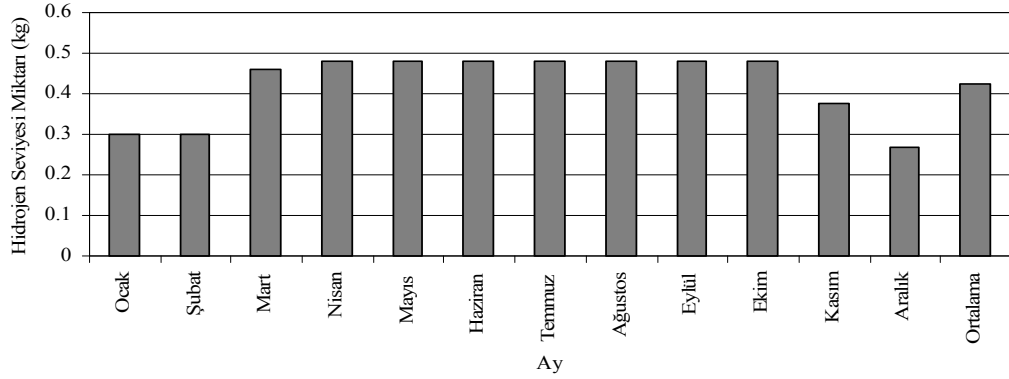
Şekil 5.29 Elektrolizörün aylık ortalama saatlik güç ihtiyacı.

Elektrolizör tarafından üretilen hidrojen miktarının aylık değişimi ise Şekil 5.30'de görülebilir. Elektrolizörün devreye girmesi akülerin şarj durumlarına göre belirlenmiştir. Bu sayede akülerin %100 şarj durumlarını aşması sonucu PV panellerinden elde edilen fazla elektrik gücü elektrolizörün çalıştırılmasında kullanılmaktadır.



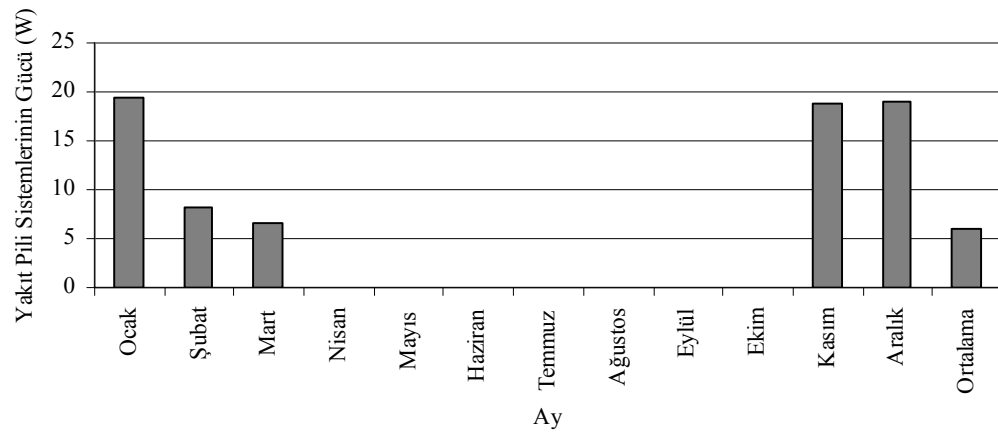
Şekil 5.30 Aylık ortalama saatlik hidrojen üretimi.

Üretilen hidrojenin metal hidrid tanklardaki seviyesi ise Şekil 5.31'deki gibi gerçekleşmektedir. Sistemde bulunan 6 adet metal hidrid tankın toplam kapasitesi 480 g H_2 olmaktadır. Ocak ayından başlayarak Nisan ayına kadar hidrojen üretimi ve kullanımı sonucu tankların seviyesi şekildeki gibi hesaplanmıştır. Aynı şekilde depolanan hidrojenin Kasım ve Aralık aylarında kullanılması şekildeki gibi gerçekleşmiştir.



Şekil 5.31 Hidrojen seviyesinin aylık değişimi.

Yakıt pillerinin yükü karşılamak için devreye yıllık 201 saat girerek yıllık 52.5 kWh enerji üretimi gerçekleştirdiği HOMER tarafından hesaplanmıştır. Yakıt pillerinin ömrünün 1000 saat olması ve ilk yatırım maliyetinin yüksek olması düşük enerji üretimine sebep olmaktadır. İki adet yakıt pili sistemi tarafından üretilen aylık ortalama saatlik güç değerlerinin değişimi Şekil 5.32'deki gibi olmaktadır.

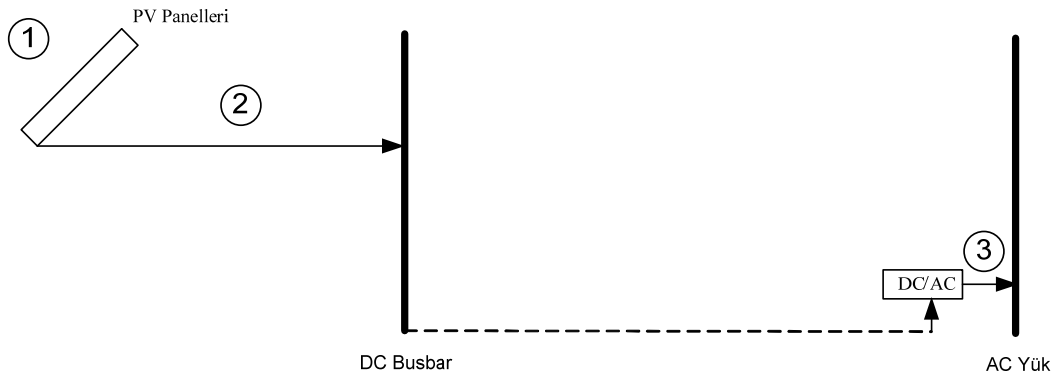


Şekil 5.32 Yakıt pili sistemleri tarafından üretilen aylık ortalama saatlik güç değerleri.

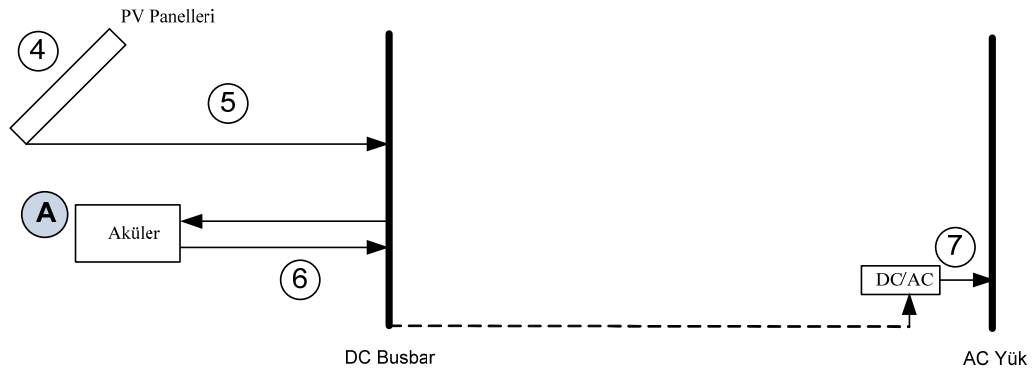
Sistemin yıllık enerji dengesini hesaplamak için sistem üç farklı enerji yoluna ayrılabilir. Bu yollar daha önce de bahsedildiği gibi sırasıyla aşağıdaki şekildedir:

- 1) *PV yolu*: PV panelleri ve şarj regülatörleri – DC/AC İnvörtör – Yük (Şekil 5.33a).
- 2) *Akü yolu*: PV panelleri ve şarj regülatörleri – Aküler – DC/AC İnvörtör – Yük (Şekil 5.33b).
- 3) *Hidrojen yolu*: PV panelleri ve şarj regülatörleri – DC/AC İnvörtör – Elektrolizör – Hidrojen depolama tankları – Yakıt pili sistemleri – DC/AC İnvörtör – Yük (Şekil 5.33c).

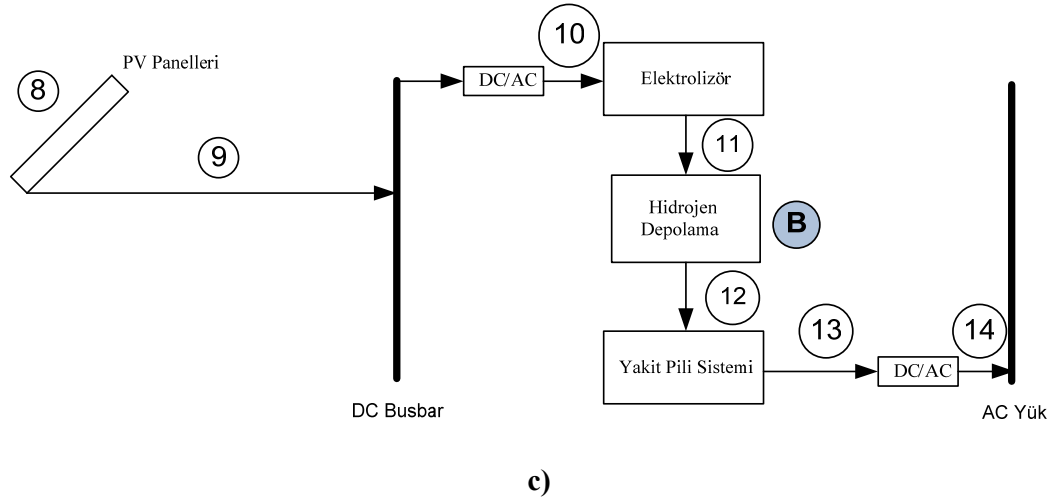
Bu yollara ait güç akış değerlerini bulmak amacıyla sistem bileşenlerine giren ve çıkan güç noktaları Şekil 5.34'teki gibi numaralandırılmıştır. Bu numaralandırma işlemi sonucu yükün üç yoldan karşılanma miktarlarını hesaplamak olanaklı olmaktadır.



a)



b)



Şekil 5.33 a) Güneş-hidrojen sisteminin PV yolunun şematik gösterimi. **b)** Güneş-hidrojen sisteminin akü yolunun şematik gösterimi. **c)** Güneş-hidrojen sisteminin hidrojen yolunun şematik gösterimi (1-PV yoluna ait panel yüzeylerine düşen güneş ışınımı miktarı, 2-PV yoluna ait panellerden üretilen güç miktarı, 3-PV yolu tarafından karşılanan yük miktarı, 4-Akü yoluna ait panel yüzeylerine düşen güneş ışınımı miktarı, 5-Akü yoluna ait panellerden üretilen ve akülere giren güç miktarı, 6-Akü yoluna ait akülerden çıkan güç miktarı, 7-Akü yolu tarafından karşılanan yük miktarı, 8-Hidrojen yoluna ait panel yüzeylerine düşen güneş ışınımı miktarı, 9-Hidrojen yoluna ait panellerden üretilen güç miktarı, 10-Hidrojen yoluna ait elektrolizörün ihtiyaç duyduğu güç miktarı, 11-Hidrojen yoluna ait elektrolizör tarafından üretilen hidrojenin eşdeğer güç miktarı, 12-Hidrojen yoluna ait yakıt pillerine sağlanan hidrojenin eşdeğer güç miktarı, 13-Hidrojen yoluna ait yakıt pilleri tarafından üretilen güç miktarı, 14-Hidrojen yolu tarafından karşılanan yük miktarı, A-Aküler tarafından depolanan aylık güç miktarı, B-Hidrojen seviyesinin aylık değişimi).

Bu noktadaki güç akış değerleri Tablo 5.3’de gösterilmektedir. Ayrıca sistemdeki depolama elemanları olan akülerin aylık güç dengesi değerleri ve hidrojen tanklarının seviyeleri Tablo 5.4’deki gibi hesaplanmıştır.

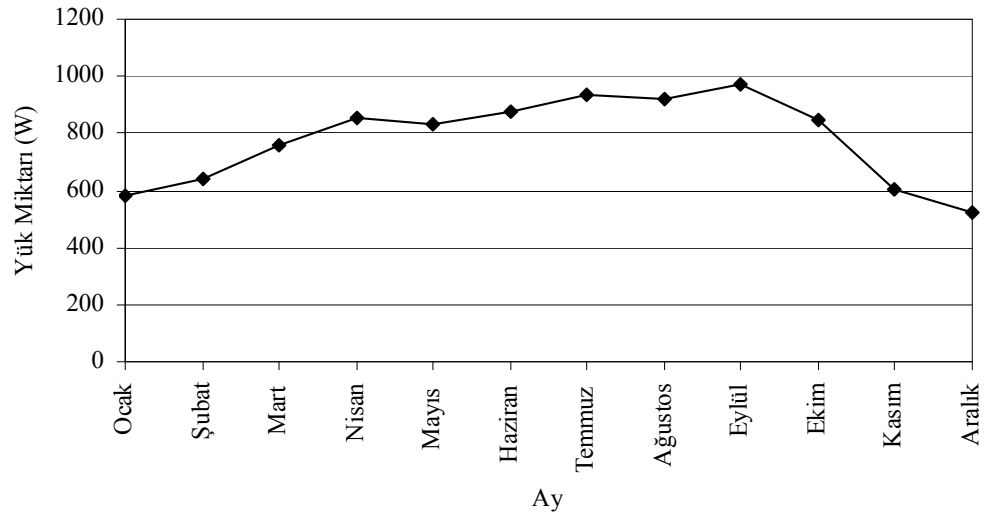
Tablo 5.3 Güneş-hidrojen sisteminin enerji yollarının aylık ortalama saatlik güç akışı (W).

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
1	2669.07	3357.85	4613.30	5708.62	5804.78	6448.72	6759.93	6965.56	7273.53	5686.59	3060.35	2362.71
2	316.24	397.80	541.72	660.77	648.89	699.45	720.37	741.21	787.46	637.19	352.04	280.52
3	284.62	358.02	487.55	594.69	584.00	629.51	688.33	667.09	708.71	573.47	316.85	252.45
4	3039.70	2925.91	3074.54	2938.54	2927.16	2994.04	3032.29	3122.68	3148.26	3154.87	3061.87	2772.70
5	360.158	346.63	361.03	340.13	327.21	324.75	323.13	332.29	340.842	353.51	352.21	329.17
6	307.90	302.20	295.30	288.80	277.10	275.80	274.90	282.40	289.70	307.10	301.30	281.80
7	277.09	272.01	265.74	259.93	249.38	248.22	247.41	254.16	260.75	276.35	271.14	253.61
8	934.28	835.42	318.85	0	0	0	0	0	0	0	907.14	720.39
9	110.70	98.97	37.44	0	0	0	0	0	0	0	104.35	85.52
10	99.63	89.07	33.70	0	0	0	0	0	0	0	93.92	76.97
11	55.71	49.84	18.83	0	0	0	0	0	0	0	52.59	43.10
12	55.57	23.29	19.00	0	0	0	0	0	0	0	53.69	54.09
13	19.45	8.15	6.65	0	0	0	0	0	0	0	18.79	18.93
14	17.51	7.34	5.99	0	0	0	0	0	0	0	16.91	17.04

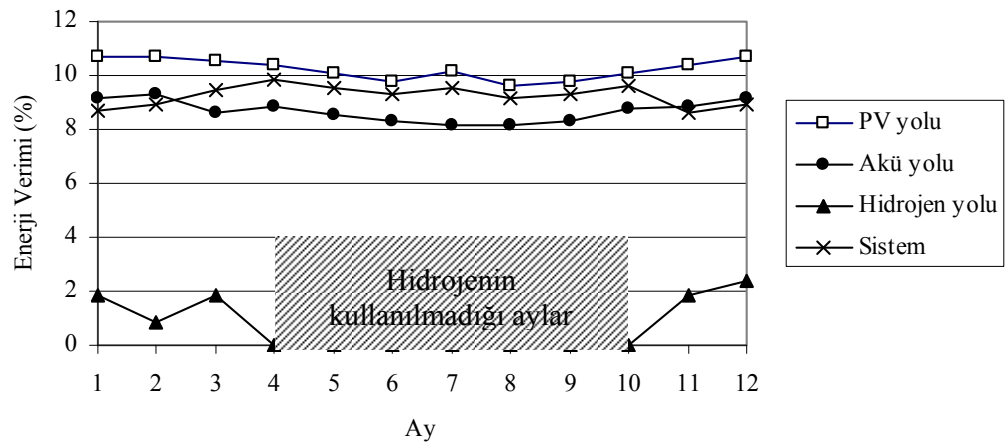
Tablo 5.4 Güneş-hidrojen sisteminin akülerinde depolanan aylık ortalama saatlik net güç akışı (W) ve hidrojen tanklarının aylık seviyesi (g).

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
A	52.28	44.40	65.76	51.32	50.12	48.95	48.23	49.89	51.12	46.45	50.94	47.38
B	299.87	300.41	461.30	480.00	480.00	480.00	480.00	480.00	377.52	269.55	299.87	300.41

Sistem tarafından karşılanması gereken yük miktarları üç yolun yük karşılama miktarlarının toplamı kadar olmaktadır. Bu noktalar 3, 7 ve 14 numaralar ile gösterilmiştir. Toplam karşılanması gereken ortalama AC yük miktarının aylık değişimi Şekil 5.34'deki gibi gerçekleşmektedir. Tablo 5.3'te elde edilen güç akışı verilerinden yararlanılarak her bir enerji yolunun aylık ortalama enerji verimi Şekil 5.35'teki gibi hesaplanmıştır.



Şekil 5.34 Güneş-hidrojen sistemi tarafından karşılanması gereken aylık ortalama yük miktarı.

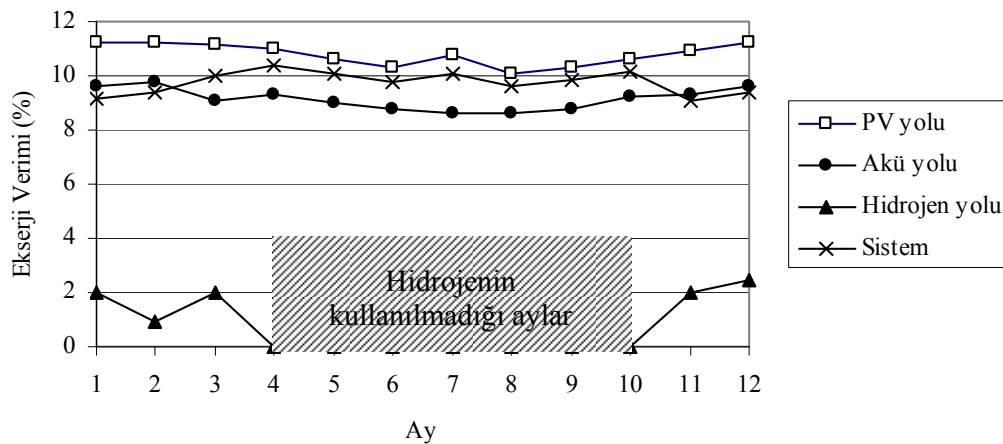


Şekil 5.35 Güneş-hidrojen sisteminin enerji yollarının ve sistemin ortalama enerji veriminin aylık değişimi.

Şekil 5.35'de görüldüğü gibi PV yolunun enerji verimi diğer enerji yollarından daha yüksek olmaktadır. Bunun temel sebebi bu yolda kullanılan sistem bileşeni sayısının az olmasıdır. PV yolunun enerji verimi değerleri, %9.57 ile %10.68 arasında değişmektedir. Akü yolunun enerji verimi değerleri, %8.13 ile %9.17 arasında değişmektedir. Enerji veriminin en düşük olduğu hidrojen yolunda ise enerji verimi değerleri %0.88 ile %2.36 arasında olmaktadır. Sistemin enerji verimi ise yük karşılama oranına göre hesaplanarak %8.06 ile %9.88 arasında bulunmuştur.

5.4. Ekserji Analizi Sonuçları

Sistemin enerji dengesi bulunduktan sonra sistemin ekserji analizi yapılmıştır. Elektrik enerjisi akışının olduğu noktalarda güç ile ekserji akışı değerleri aynı olmaktadır. Elde edilen ekserji akışı değerleri Tablo 5.5'de gösterilmektedir. Ayrıca, tabloda elde edilen ekserji akışı verilerinden yararlanılarak her bir enerji yolunun aylık ortalama ekserji verimi Şekil 5.36'daki gibi hesaplanmıştır. PV yolunun ekserji verimi değerleri, %10.28 ile %11.24 arasında değişmektedir. Akü yolunun ekserji verimi değerleri, %8.59 ile %9.78 arasında değişmektedir. Ekserji veriminin en düşük olduğu hidrojen yolunda ise ekserji verimi değerleri %0.92 ile %2.49 arasında olmaktadır. Sistemin ekserji verimi ise yük karşılama oranına göre hesaplanarak %9.06 ile %10.41 arasında bulunmuştur.

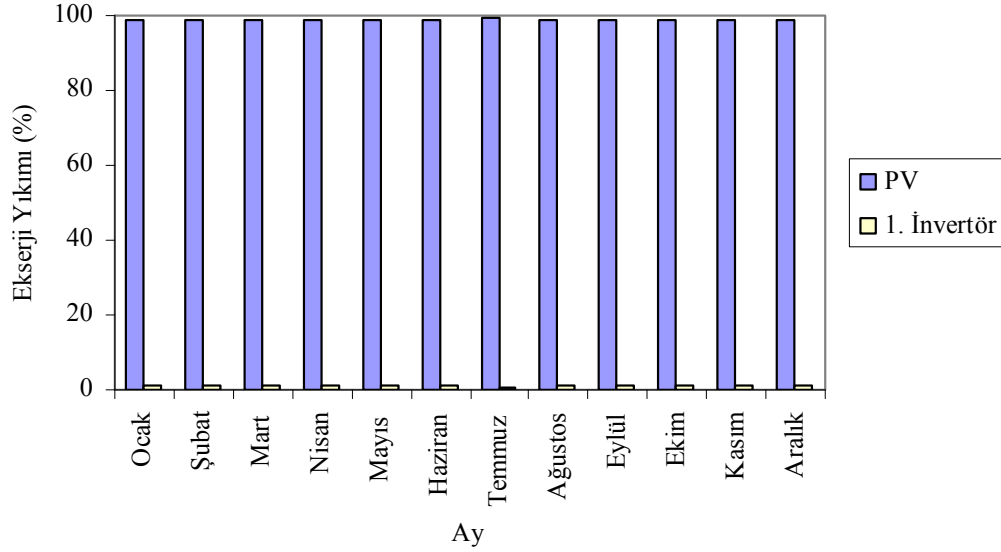


Şekil 5.36 Güneş-hidrojen sisteminin enerji yollarının ve sistemin ortalama ekserji veriminin aylık değişimi.

Tablo 5.5 Güneş-hidrojen sisteminin enerji yollarının aylık ortalama ekserji akışı (W).

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
1	2537.69	3192.10	4383.96	5421.02	5505.11	6115.80	6401.70	6597.29	6894.59	5395.31	2906.55	2245.92
2	316.24	397.80	541.72	660.77	648.89	699.45	720.37	741.21	787.46	637.19	352.04	280.52
3	284.62	358.02	487.55	594.69	584.00	629.51	688.33	667.09	708.71	573.47	316.85	252.45
4	2890.08	2781.48	2921.70	2790.50	2776.05	2836.85	2871.60	2957.58	2984.24	2993.27	2907.99	2635.64
5	360.158	346.63	361.03	340.13	327.21	324.75	323.13	332.29	340.842	353.51	352.21	329.17
6	307.90	302.20	295.30	288.80	277.10	275.80	274.90	282.40	289.70	307.10	301.30	281.80
7	277.09	272.01	265.74	259.93	249.38	248.22	247.41	254.16	260.75	276.35	271.14	253.61
8	888.29	794.18	303.00	0	0	0	0	0	0	0	861.55	684.78
9	110.70	98.97	37.44	0	0	0	0	0	0	0	104.35	85.52
10	99.63	89.07	33.70	0	0	0	0	0	0	0	93.92	76.97
11	51.81	46.32	17.52	0	0	0	0	0	0	0	48.84	40.02
12	64.83	27.17	22.17	0	0	0	0	0	0	0	62.63	63.10
13	19.45	8.15	6.65	0	0	0	0	0	0	0	18.79	18.93
14	17.51	7.34	5.99	0	0	0	0	0	0	0	16.91	17.04

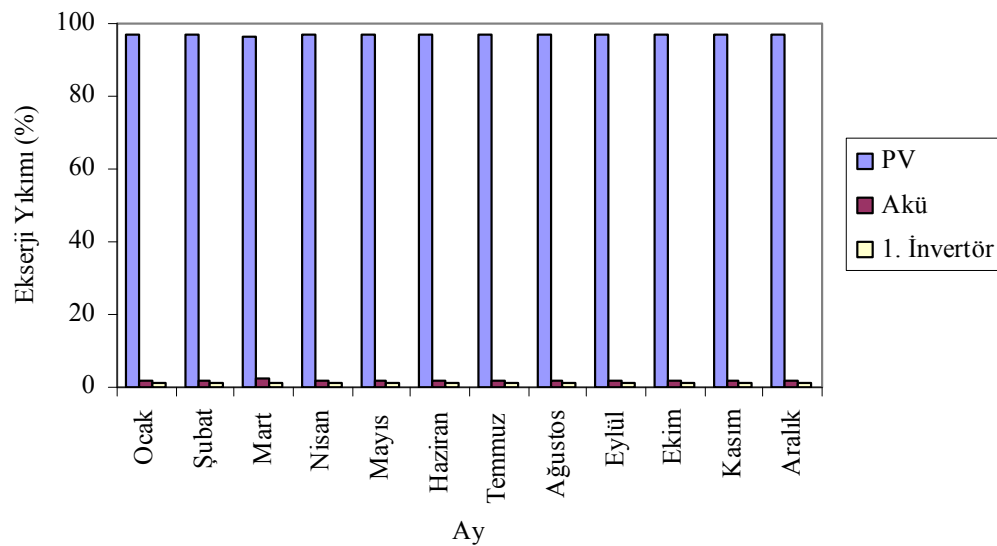
Pamukkale Üniversitesi güneş-hidrojenli hibrid enerji sisteminin ana elemanlarında meydana gelen ekserji yıkımları hesaplanmıştır. Hesaplanan ekserji yıkımlarının ana elemanlara göre yüzdelik payları Şekil 5.37, Şekil 5.38, Şekil 5.39 ve Şekil 5.40'de her bir enerji yolu ve toplam sistem için gösterilmektedir. Şekil 5.37'de PV yolunda meydana gelen ekserji yıkımları görülmektedir.



Şekil 5.37 PV yolunda meydana gelen ekserji yıkımlarının ana elemanlara göre yüzdesel dağılımı.

Şekil 5.37'de görüldüğü gibi PV yolunda meydana gelen ekserji yıkımlarının yaklaşık %98.7'lük bir kısmı güneş pili panelleri ve bağlantılarından meydana gelmektedir. Bu oranın yüksek olmasının temel sebebi, güneş pili panellerinin güneş ışınımından elektrik elde etme verimlerinin %12 gibi düşük seviyelerde kalmasındandır. İnvertörün veriminin yüksek olması sonucu (%90), enerji yıkımlarındaki payı ortalama %1.3 gibi oldukça düşük bir değerdedir. PV yolunun ana elemanlarının ekserji yıkım değerlerine bakıldığında toplam ekserji yıkımlarının yaz aylarında arttığı ve güneş pili panellerinde meydana gelen ekserji yıkımlarının yaz aylarında en yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Temmuz ayında, 5713.37 kWh olan toplam ekserji yıkımlarının %99.4'lük kısmı güneş pili panellerinden kaynaklanmaktadır. En düşük ekserji yıkımı ise Aralık ayında meydana gelerek, toplam ekserji yıkımlarının %98.6'sının güneş pili panellerinden kaynaklandığı anlaşılmaktadır.

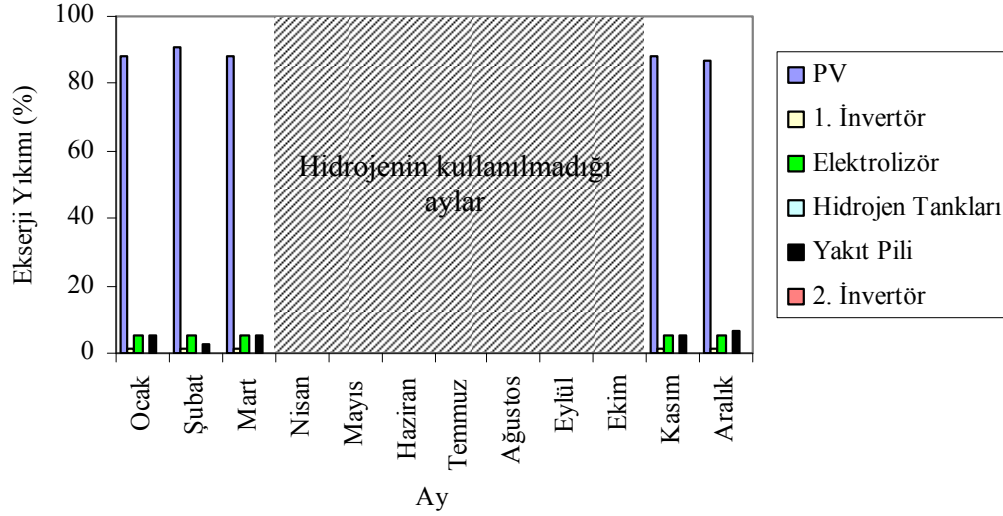
Şekil 5.38’de akü yolunda meydana gelen ekserji yıkımlarının ana elemanlara göre yüzdesel dağılımı bulunmaktadır. Şekilden görüldüğü gibi akü yolunda meydana gelen ekserji yıkımlarının yaklaşık %96.9’luk bir kısmı güneş pili panelleri ve bağlantılarından meydana gelmektedir. Akü yolundaki en yüksek ekserji yıkımının 2723.49 kWh ile Eylül ayında meydana geldiği gözlemlenmektedir. Eylül ayında güneş pili panellerinden meydana gelen ekserji yıkımlarının payı %97.06 değerine ulaşmaktadır. En düşük ekserji yıkımı ise 2382.3 kWh ile Aralık ayında meydana gelmektedir. Güneş pili panellerinden sonra ekserji yıkımları, ortalama %1.95 oranında akülerde ve %1.12 oranında ise invertörde meydana gelmektedir.



Şekil 5.38 Akü yolunda meydana gelen ekserji yıkımlarının ana elemanlara göre yüzdesel dağılımı.

Şekil 5.39’da hidrojen yolunda meydana gelen ekserji yıkımlarının, bu enerji yolunda bulunan ana elemanlara göre dağılımı görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi hidrojenin kullanımının olduğu Ocak, Şubat, Mart, Kasım ve Aralık aylarında hidrojen yolunda meydana gelen ekserji yıkımlarının yaklaşık %89.55’lik bir kısmı güneş pili panelleri ve bağlantılarından meydana gelmektedir. Hidrojen yolunun ana elemanlarının ekserji yıkım değerlerine en yüksek ekserji yıkımının 883.8 kWh ile Ocak ayında meydana geldiği gözlemlenmektedir. Şubat ayında ise güneş pili panellerinden meydana gelen ekserji yıkımlarının payı %90.5 değerine ulaşmaktadır. En düşük ekserji yıkımı ise 301.66 kWh ile Mart ayında meydana gelmektedir. Güneş pili panellerinden sonra

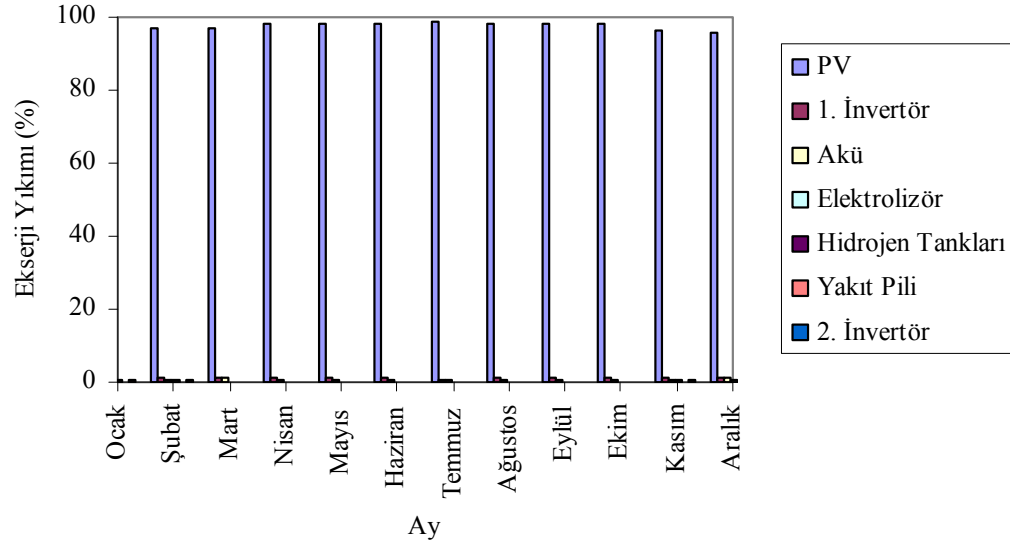
ekserji yıkımları ortalama %5.39 oranında elektrolizörde, %4.85 oranında yakıt pili sistemlerinde, %1.24 oranında 1. invertörde ve %0.21 oranında 2. invertörde meydana gelmektedir. Hidrojen depolama tanklarında enerji ve ekserji verimleri %100 olarak kabul edildiğinden ekserji yıkımı olmamaktadır.



Şekil 5.39 Hidrojen yolunda meydana gelen ekserji yıkımlarının ana elemanlara göre yüzdesel dağılımı.

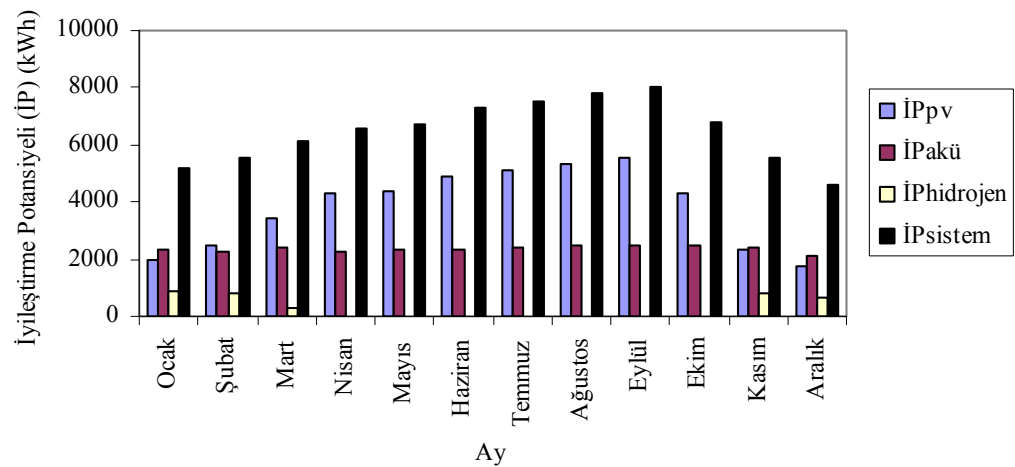
Şekil 5.40'de yapılan yıllık ekserji akışı sonucunda sistemdeki aylık ortalama meydana gelen ekserji yıkımlarının sistemin ana elemanlarına göre dağılımı görülmektedir. Yıllık sistemde meydana gelen ekserji yıkımlarının yaklaşık %97.5'lik bir kısmı güneş pili panelleri ve bağlantılarından meydana gelmektedir. Sistem ana elemanlarının ekserji yıkım değerlerine en yüksek ekserji yıkımının 8909.37 kWh ile Eylül ayında meydana geldiği gözlemlenmektedir. Temmuz ayında ise güneş pili panellerinden meydana gelen ekserji yıkımlarının payı %98.71 değerine ulaşmaktadır. En düşük ekserji yıkımı ise 4458.51 kWh ile Aralık ayında meydana gelmektedir. Güneş pili panellerinden sonra ekserji yıkımları ortalama %1.205 oranında 1. invertörde, %0.74 oranında akülerde, %0.286 oranında elektrolizörde, %0.259 oranında yakıt pili sistemlerinde ve %0.011 oranında 2. invertörde meydana gelmektedir. Sistemde meydana gelen ekserji yıkımları yaz aylarında artmaktadır. Bu artışın temel sebebi güneş pili panellerinden kaynaklanmaktadır. Güneş pili panellerinin güneş ışınımını elektrik enerjisine dönüştürme verimlerinin düşük olması yüksek ekserji yıkımlarına sebep olmaktadır. Bu yüzden sistemde meydana gelen ekserji yıkımlarının

azaltılması için güneş pili panellerinin enerji ve ekserji verimliliklerinin artırılması gerekmektedir.



Şekil 5.40 Sistemde meydana gelen ekserji yıkımlarının ana elemanlara göre yüzdesel dağılımı.

Enerji yolları ve sistem için ayrıca “İyileştirme Potansiyelleri” değerleri hesaplanmıştır. Şekil 5.41’de hesaplanan bu değerler yer almaktadır.



Şekil 5.41 Enerji yolları ve sistem için iyileştirme potansiyeli değerlerinin aylık değişimi.

Şekil 5.41’te görüldüğü gibi, sistemin iyileştirme potansiyeli değerleri yaz aylarında artmaktadır. Bu artışta, güneş ışınımı değerlerinin bu aylardaki artması etkili olmaktadır. Bu değerler, ekserji verimleri ile doğrudan bağlantılı olduklarından düşük ekserji verimine sahip güneş pili panellerinin verimlerinde meydana gelecek artışlar sistemi daha verimli hale getirebilecektir. Aynı zamanda bu durum, PV yolunun iyileştirme potansiyelinin yüksek olmasından da anlaşılmaktadır. Sistemin en çok kullandığı enerji yolları olan PV yolu ve akü yolu için iyileştirme potansiyeli değerleri hidrojen yoluna göre daha yüksek olmaktadır. Sistemin iyileştirme potansiyeli yıllık ortalama 6475.02 kWh olarak hesaplanmıştır. Sistemin en yüksek iyileştirme potansiyeline sahip ayı ise 8035.05 kWh değeri ile Eylül ayı olmaktadır. Aralık ayında ise iyileştirme potansiyeli değeri 4569.3 kWh değerine gerilemektedir.

5.5. Ekonomik ve Eksergoekonomik Analiz Sonuçları

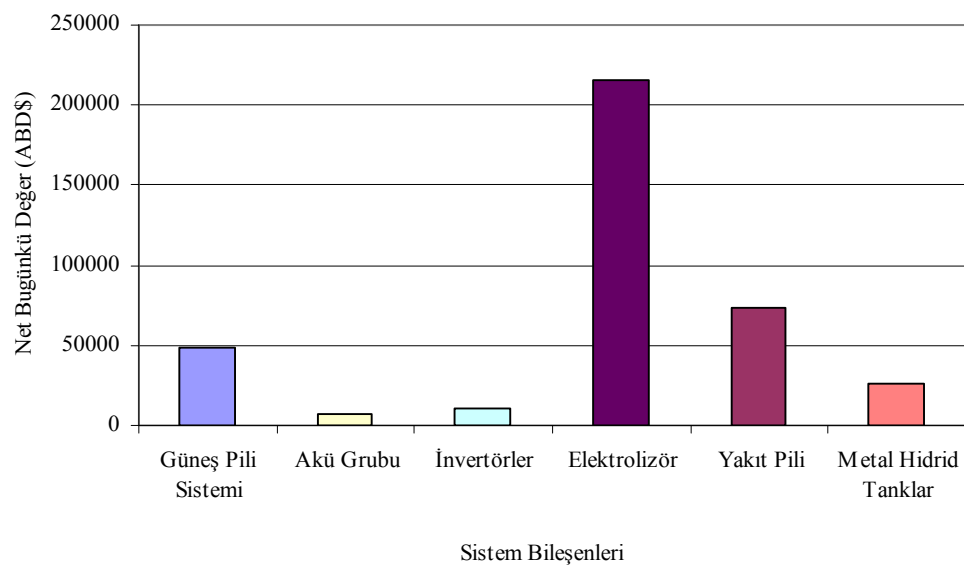
5.5.1. Ekonomik analiz

Eksergoekonomik analizin yapılabilmesi için sistemin ekonomik analizi hesaplanmalıdır. Sistemin ilk yatırım maliyetleri, yenileme maliyetleri, işletme maliyetleri ve hurda değerlerinin net bugünkü değerleri Tablo 5.6’daki gibi olmaktadır. Güneş pili sisteminin ilk yatırım maliyetine izleyicilerin, sistemde kullanılan şarj regülatörlerinin maliyetleri ve kablolama-işçilik masrafları eklenmiştir. Akü grubunun ilk maliyetine ise akü kabini ve kablolama-işçilik masrafları ilave edilmiştir. Aynı şekilde elektrolizörün ilk yatırım maliyeti, deiyonizörün maliyeti ve elektrolizörün devreye alınma-işçilik masraflarını içermektedir. Ekonomik analizde sistemin ömrünün 20 yıl ve yıllık faiz oranının %6 olacağı varsayılmıştır. Enerji analizi sonucu, sistem bileşenlerinin ömürleri hesaplanmıştır. Sistem bileşenlerinden sistem ömrü içinde yenilenmesi gereken akü grubu, inverörler, elektrolizör, metal hidrid tanklar ve yakıt pili sistemleri için ilk yatırım maliyetleri kadar yenileme maliyeti olacağı göz önüne alınmıştır. İşletme maliyetleri için, akülerin ve invertörlerin yıllık ilk yatırım maliyetlerinin %10’u, elektrolizörün yıllık ilk yatırım maliyetlerinin %1’i dikkate alınmıştır. PV panellerinin, metal hidrid tankların ve yakıt pili sistemlerinin işletme maliyetlerinin olmadığı varsayılmıştır.

Tablo 5.6 Pamukkale Üniversitesi Güneş-Hidrojen Sistemi'nin yatırım maliyetlerinin net bugünkü değerleri.

Sistem Bileşeni	İlk Yatırım Maliyeti (ABD\$)	Yenileme Maliyeti (ABD\$)	İşletme Maliyeti (ABD\$)	Hurda Değeri (ABD\$)	Toplam (ABD\$)
Güneş Pili Sistemi	50777	0	0	-1827	48950
Akü Grubu	4492	1874	5152	-934	10585
İnvertörler	8109	3384	9301	-1686	19108
Elektrolizör	104000	54555	57350	0	215905
Metal Hidrid Tanklar	18114	8360	0	0	26474
Yakıt Pili Sistemi	34623	70668	231	-10580	94941
Toplam Sistem	220115	138841	72033	-15026	415963

Tablo 5.7'de hesaplanan yatırım maliyetlerinin net bugünkü değerlerinde sistem bileşenlerinin payı Şekil 5.42'da gösterilmektedir. Buna göre, elektrolizörün yatırım maliyetleri arasındaki payı en fazla olmaktadır. Sistem ömrü sonunda elektrolizör için yapılması gereken yatırım miktarının bugünkü değeri 215905 ABD\$ olarak, 415963 ABD\$ olan toplam sistem maliyetinin yaklaşık yarısını oluşturmaktadır. İkinci en pahalı yatırım ise 94941 ABD\$ yatırım maliyeti değeri ile yakıt pili sistemleridir.



Şekil 5.42 Pamukkale Üniversitesi Güneş-Hidrojen Sistemi'nin yatırım maliyetlerinin net bugünkü değerinde sistem bileşenlerinin payı.

Ekserji analizinde hesaplanan aylık ortalama saatlik ekserji akışının eksergoekonomik analizde kullanılabilmesi amacıyla yatırım maliyetlerinin saatlik bugünkü değerleri Tablo 5.7’de gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Eksergoekonomik analizde her bir bileşen için toplam yatırım maliyetlerinin saatlik bugünkü değerleri dikkate alınmıştır.

Tablo 5.7 Pamukkale Üniversitesi Güneş-Hidrojen Sistemi’nin yatırım maliyetlerinin saatlik net bugünkü değerleri.

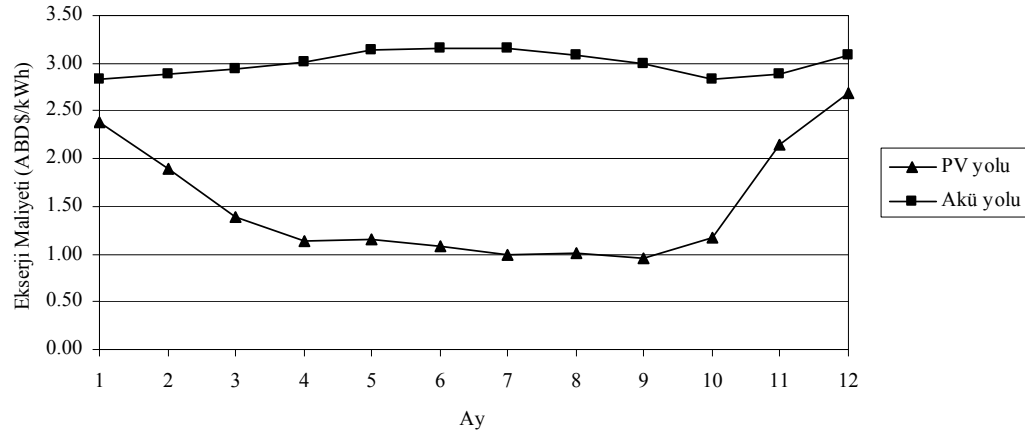
Sistem Bileşeni	İlk Yatırım Maliyeti (ABD\$/h)	Yenileme Maliyeti (ABD\$/h)	İşletme Maliyeti (ABD\$/h)	Hurda Değeri (ABD\$/h)	Toplam (ABD\$/h)
Güneş Pili Sistemi	0.505	0	0	-0.018	0.487
Akü Grubu	0.045	0.019	0.051	-0.009	0.105
İnvertörler	0.081	0.034	0.093	-0.017	0.190
Elektrolizör	1.035	0.543	0.571	0	2.149
Metal Hidrid Tanklar	0.180	0.083	0.000	0	0.263
Yakıt Pili Sistemi	0.345	0.301	0.002	-0.106	0.542
Toplam Sistem	2.191	0.980	0.717	-0.151	3.737

5.5.2. Eksergoekonomik analiz

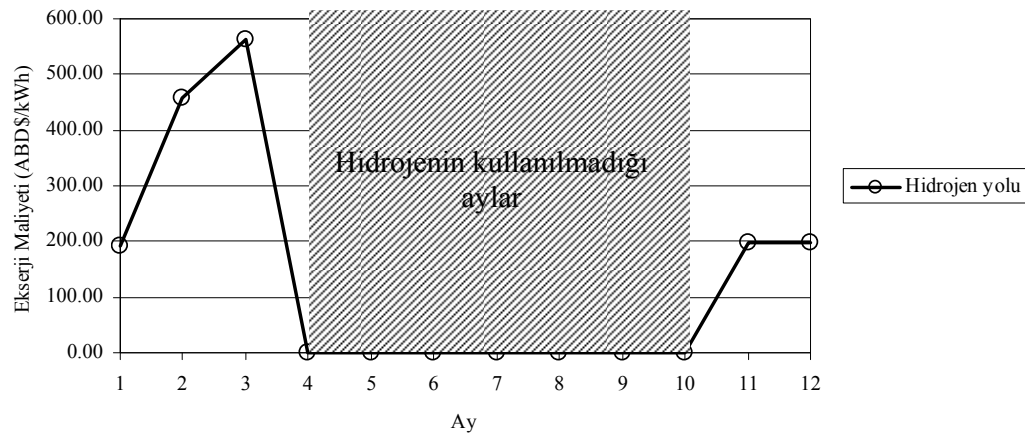
Ekserji analizinde bulunan ekserji akışı değerleri ve ekonomik analiz sonucu elde edilen her bir bileşen için toplam yatırım maliyetlerinin saatlik bugünkü değerleri ile eksergoekonomik analiz yapılmıştır. Enerji yollarının her bir noktasına ait ekserji akışı maliyetleri Tablo 5.8’de gösterilmektedir. Hesaplanan ekserji maliyetlerine göre enerji yollarının yük karşılama maliyetleri Şekil 5.43 ve Şekil 5.44’de gösterilmiştir.

Tablo 5.8 Güneş-hidrojen sisteminin enerji yollarının aylık ortalama ekserji maliyetleri (ABD\$/kWh).

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1.54	1.22	0.90	0.74	0.75	0.70	0.68	0.66	0.62	0.76	1.38	1.74
3	2.38	1.89	1.39	1.14	1.16	1.08	0.98	1.01	0.96	1.18	2.14	2.68
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1.35	1.41	1.35	1.43	1.49	1.50	1.51	1.47	1.43	1.38	1.38	1.48
6	1.92	1.96	2.01	2.05	2.14	2.15	2.15	2.10	2.04	1.93	1.97	2.10
7	2.82	2.88	2.95	3.01	3.14	3.15	3.16	3.08	3.00	2.83	2.89	3.09
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	4.40	4.92	13.01	0	0	0	0	0	0	0	4.67	5.70
10	6.80	7.61	20.10	0	0	0	0	0	0	0	7.21	8.80
11	45.83	51.26	135.51	0	0	0	0	0	0	0	48.61	59.33
12	40.69	97.08	118.97	0	0	0	0	0	0	0	42.12	41.80
13	163.34	389.81	477.74	0	0	0	0	0	0	0	169.08	167.83
14	192.30	458.74	562.12	0	0	0	0	0	0	0	199.12	197.60



Şekil 5.43 PV yolu ve akü yolunun yük karşılamadaki aylık ortalama ekserji maliyetleri.



Şekil 5.44 Hidrojen yolunun yük karşılamadaki aylık ortalama ekserji maliyetleri.

Şekil 5.43 ve 5.44’de görüldüğü gibi en yüksek ekserji maliyeti hidrojen yoluna ait olmaktadır. Elektrolizör ve yakıt pili sistemlerinin yatırım maliyetlerinin yüksek oluşu, hidrojen yolunun ekserji veriminin düşüklüğü ve yakıt pili sistemlerinin ömürlerinin kısa olması sebebiyle ekserji maliyetlerinin oldukça fazla olduğu gözlenmektedir. Buna göre PV yolunun yükü karşılamadaki ekserji maliyetleri 0.96 ile 2.68 ABD\$/kWh arasında olurken, akü yolunun 2.82 ile 3.16 ABD\$/kWh arasında değiştiği görülmektedir. Hidrojen yolunun yük karşılamadaki ekserji maliyetleri ise 192.30 ile 562.12 ABD\$/kWh arasında değişmektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Fosil enerji kaynakları rezervleri, bu kaynakların tükenebilir doğalarından dolayı, ülkelerin ekonomik gelişmesi ve nüfus artışı ile birlikte artan enerji ihtiyacı sonucunda gün geçtikçe azalmaktadır. Bu rezervlerin dünyanın belli bölgelerinde ve ülkelerinde bulunmasından dolayı ülkeler arasında egemenlik krizleri, çeşitli bölgesel ve uluslararası gerilimler ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, fosil enerji kaynaklarına sahip ülkelerin izlediği fiyat politikaları ve azalan rezerv miktarları nedeniyle özellikle doğal gaz ve petrol fiyatları artmaktadır. Bu durum ekonomi biliminin temel teorisini oluşturan arz ve talep dengesi ile bağdaşmaktadır. Çünkü, rezervlerin azalması beraberinde yüksek fiyatları getirmekte ve fiyat artış eğiliminin gelecekte de devam etmesini kaçınılmaz kılmaktadır. Tüm bunların yanı sıra, günümüzde sağlanan enerjinin yaklaşık %85'ini oluşturan fosil enerji kaynakları ekolojik ve çevresel olumsuzluklara neden olmaktadır. Bu olumsuz etkiler, yerel ve küresel ölçekte hava, su ve toprak kirliliğinin artması, insan sağlığını ve ekosistemi tehdit etmesi ile kendisini göstermektedir.

Yapılan bu çalışmayla, Türkiye’de ilk kez bir güneş-hidrojen hibrid enerji üretim sistemi aydınlatma ve konut içi enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla kurulmuştur. Sistem, 2007 yılının Şubat ayından itibaren sorunsuz olarak çalışmasına devam etmektedir. Pamukkale Üniversitesi’nde kurulan güneş-hidrojenli hibrid enerji üretim sisteminin yük altındaki davranışı AC elektrik tüketen cihazların elektrik ihtiyacının karşılanmasının elektriksel performansının incelenmesi ile sağlanmıştır. Sistemin farklı cihazların elektrik ihtiyaçlarını karşılarken izlediği davranışların tespiti amacıyla farklı elektriksel karakteristiklere sahip halojen lamba grubu, fanlar, motor, klima ve buzdolabı seçilmiştir. Bu cihazların, her üç enerji yolundan beslenmesi sağlanmıştır. Sistemin enerji yollarını oluşturan PV yolu, akü yolu ve hidrojen yolunun elektriksel analizi yapılarak, akım-gerilim dalgalanmalarında meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. Elde edilen akım ve gerilim sinüs dalgaları sonucunda akü yolunun PV yoluna göre daha stabil akım ve gerilim sağladığı gözlenmiştir. Ani akım çeken klima ve buzdolabı gibi cihazlarla yapılan deneylerde PV yolu, akü yolu ve hidrojen yolunun bu yükler altında sorunsuz çalıştığı görülmüştür. Ancak, hidrojen yolunda yakıt pili sistemine ani akım ve gerilim değişiminin uzun süreli olumsuz etkileri bilinmemektedir.

Sistemin performans performans analizinde enerji, ekserji ve eksergoekonomik analiz yöntemleri kullanılmıştır. Sistem bileşenlerinin karakteristikleri elde edildikten sonra yıllık enerji, ekserji analizi yapılmıştır. Ayrıca, ekonomik analiz ve ekserji analizi birlikte kullanılarak sistemin enerji yollarının yük karşılamadaki ekserji maliyetleri hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda PV yolunun enerji ve ekserji veriminin diğer enerji yollarından daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun temel sebebi bu yolda kullanılan sistem bileşeni sayısının az olmasıdır. PV yolunun enerji verimi değerleri, %9.57 ile %10.68 arasında değişmektedir. Akü yolunun enerji verimi değerleri, %8.13 ile %9.17 arasında değişmektedir. Enerji veriminin en düşük olduğu hidrojen yolunda ise enerji verimi değerleri %0.88 ile %2.36 arasında olmaktadır. Sistemin enerji verimi ise yük karşılama oranına göre hesaplanarak %8.06 ile %9.88 arasında bulunmuştur. Sistemin enerji dengesi bulunduktan sonra sistemin ekserji analizi yapılmıştır. Elektrik enerjisi akışının olduğu noktalarda güç ile ekserji akışı değerleri aynı olmaktadır. Ayrıca, tabloda elde edilen ekserji akışı verilerinden yararlanılarak her bir enerji yolunun aylık ortalama ekserji verimi hesaplanmıştır. PV yolunun ekserji verimi değerleri, %10.28 ile %11.24 arasında değişmektedir. Akü yolunun ekserji verimi değerleri, %8.59 ile %9.78 arasında değişmektedir. Ekserji veriminin en düşük olduğu hidrojen yolunda ise ekserji verimi değerleri %0.92 ile %2.49 arasında olmaktadır. Sistemin ekserji verimi ise yük karşılama oranına göre hesaplanarak %9.06 ile %10.41 arasında bulunmuştur.

Çalışmada, Pamukkale Üniversitesi güneş-hidrojenli hibrid enerji sisteminin ana elemanlarında meydana gelen ekserji yıkımları da hesaplanmıştır. Ekserji yıkımlarının ana elemanlara göre yüzdeler payları her bir enerji yolu ve toplam sistem için elde edilmiştir. Güneş pili panellerinin güneş ışınımını elektrik enerjisine dönüştürme verimlerinin düşük olmasının yüksek ekserji yıkımlarına sebep olduğu gözlenmiştir. Bu yüzden sistemde meydana gelen ekserji yıkımlarının azaltılması için güneş pili panellerinin enerji ve ekserji verimliliklerinin artırılması gerekmektedir. Güneş-hidrojenli sistemin iyileştirme potansiyeli değerleri hesaplandığında yaz aylarında arttığı gözlenmektedir. Bu artışta, güneş ışınımı değerlerinin bu aylardaki artması etkili olmaktadır. Bu değerler, ekserji verimleri ile doğrudan bağlantılı olduklarından düşük ekserji verimine sahip güneş pili panellerinin verimlerinde meydana gelecek artışlar sistemi daha verimli hale getirebilecektir. Aynı zamanda bu durum, PV yolunun iyileştirme potansiyelinin yüksek olmasından da anlaşılmaktadır. Sistemin en çok

kullandığı enerji yolları olan PV yolu ve akü yolu için iyileştirme potansiyeli değerleri hidrojen yoluna göre daha yüksek olmaktadır.

Yapılan çalışmada eksergoekonomik analiz ile PV yolunun yükü karşılamadaki ekserji maliyetleri 0.96 ile 2.68 ABD\$/kWh arasında olurken, akü yolunun 2.82 ile 3.16 ABD\$/kWh arasında değiştiği görülmüştür. Hidrojen yolunun yük karşılamadaki ekserji maliyetleri ise 192.30 ile 562.12 ABD\$/kWh arasında değişmektedir. Bu yüksek değerlerde elektrolizör ve yakıt pili sistemlerinin yatırım maliyetlerinin yüksek oluşu etkili olmaktadır. Hidrojen yolunun ekserji veriminin düşüklüğü ve yakıt pili sistemlerinin ömürlerinin kısa olması sebebiyle ekserji maliyetlerinin hidrojen yolu için oldukça fazla olduğu gözlenmiştir.

Bu çalışma ile güneş-hidrojenli sistemlerin performanslarının analizinde enerji yollarının önemli olduğu ve sistem boyutlandırılmasının iyi yapılması gerektiği anlaşılmıştır. Aksi takdirde, sistemin elektrik ihtiyacının karşılanmasında sorunlar meydana gelebilmektedir. Bu yüzden bu sistemlerin yıllık enerji dengelerinin ortaya çıkarılması ve farklı kontrol stratejilerinin denenmesi gerekmektedir. Bu sistemlerin pahalı olması nedeniyle kısa ve orta vadeli yaygınlaşmaları beklenmemelidir. Fakat, pilot tesisler ile konu hakkında tecrübe ve bilgi kazanılmalıdır. Bu çalışma sonucu, ileride yapılacak benzer çalışmalar için aşağıdaki öneriler sıralanabilir:

- Deneysel çalışmalar yapılarak teorik incelemeler sonucu elde edilen bulgular karşılaştırılmalıdır.
- Güneş ışıması verilerinin uzun vadeli ölçülerek, kurulması düşünülen güneş-hidrojenli hibrid enerji sistemlerinin kurulumu bu verilere göre yapılmalıdır.
- Depolamada iyi bir kontrol stratejisi seçilmelidir ve mümkün olduğunca otomatik kontrol cihazları kullanılmalıdır. Bu sayede elektrik ihtiyacının karşılanmasında kesintiler meydana gelmesinin önlenmesi sağlanabilir.
- Sistem bileşenlerinin seçimi ve sistemin boyutlandırılması titizlikle yapılmalıdır. Sistemde, fazla bileşen kullanılmamaya özen gösterilmelidir. Örneğin iki invertör yerine çift girişli invertör kullanılması yoluna gidilmelidir. Boyutlandırma yapılırken sistem gereksinimleri gözönünde bulunmalı ve böylelikle maliyet artışı- verim düşümünde kaçınılmalıdır.
- Geleceğe dönük projeksiyonlar oluşturularak, günümüzde maliyetli ve nispeten düşük verimli bu sistemlerin ilerideki durumları irdelenmelidir.

KAYNAKLAR

- Abaoud H., and Steeb H., (1998) German-Saudi HYSOLAR Program, *International Journal of Hydrogen Energy*, 23 (6): 445-449.
- Agbossou K., Chahine R., Hamelin J., Laurencelle F., Anouar A., St-Arnaud J.M., and Bose T.K., (2001) Renewable Energy Systems Based on Hydrogen for Remote Applications, *Journal of PoWer Sources*, 96: 168–172.
- Agbossou K., Kolhe M.L., Hamelin J., Bernier E., and Bose T.K., (2004) Electrolytic Hydrogen Based Renewable Energy System with Oxygen Recovery and Re-Utilization, *Renewable Energy*, 29: 1305–1318.
- Agrafiotis C., Pagkoura C., Lorentzou S., Kostoglou M., and Konstandopoulos A. G., (2007) Hydrogen Production in Solar Reactors, *Catalysis Today*, 127: 265–277s.
- Agrafiotis C., Roeb M., Konstandopoulos A. G., Nalbandian L., Zaspalis V.T., Sattler C., Stobbe P., and Steele A.M., (2005) Solar Water Splitting for Hydrogen Production with Monolithic Reactors, *Solar Energy*, 79: 409–421s.
- Amphlett J.C., Baumert R.M., Mann R.F., Peppley B.A., Roberge P.R. and Harris T.J., (1995a) Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell. I. Mechanistic model development, *J. Electrochemical Society*, 142:1-8.
- Amphlett J.C., Baumert R.M., Mann R.F., Peppley B.A., Roberge P.R. and Harris T.J., (1995b) Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell. II. Empirical model development, *J. Electrochemical Society*, 142:9-15.
- Ay M., Midilli A., and Dincer I., (2006) Exergetic performance analysis of a PEM fuel Cell, *Int. J. Energy Research*, 30: 307–32.
- Bak T., Nowotny J., Rekas M., and Sorrell C.C., (2002) Photo-Electrochemical Hydrogen Generation from Water Using Solar Energy: Materials-Related Aspects, *International Journal of Hydrogen Energy*, 27: 991 – 1022s.
- Barbir F., (2005) PEM Fuel Cells: Theory and Practice, *Elsevier Academic Press*, ISBN 978-0120781423, 310s.
- Barsoum, N.N. and Goh, W.C. (2006) Modelling the Feasibility of an Integrated Hydrogen Hybrid Energy System for Stand Alone PoWer System, *Proceedings of the 2006 Australasian Universities PoWer Engineering Conference (AUPEC'06)*, ISBN: 978 1 86272 669 7, s. 175.
- Barthels H., Brocke W. A., Bonhoff K., Groehn H.G., Heuts G., Lennartz M., Mai H., Mergel J., Schmid L., and Ritzenhoff P., (1997) Phoebus-Jülich: An Autonomous Energy Supply System Comprising Photovoltaics, Electrolytic Hydrogen, Fuel Cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 23(4): 295-301.
- Baykara S.Z., (2004) Hydrogen Production by Direct Solar Thermal Decomposition of Water, Possibilities for Improvement of Process Efficiency, *International Journal of Hydrogen Energy*, 29: 1451 – 1458s.
- Baykara S.Z., and Bilgen E., (1989) An Overall Assessment of Hydrogen Production by Solar Water Thermolysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, 14(12): 881–889s.

- Bilgen E., Galindo J., and Baykara S.Z., (1983) Experimental Study of Hydrogen Production by Direct Decomposition of Water, *Proceedings of the 18th IECEC*, 3:564–567s.
- Bilodeau A., and Agbossou K., (2006) Control Analysis of Renewable Energy System with Hydrogen Storage for Residential Applications, *Journal of PoWer Sources*, 162: 757–764.
- Bodvarsson, G., and Eggers, D. E., (1972) The Exergy of Thermal Water. *Geothermics*, 1: 93-95.
- Bose T.K., Agbossou K., Kolhe M.L., and Hamelin J., (2004) Stand-Alone Renewable Energy System Based on Hydrogen Production, www.ieahia.org/pdfs/res_quebec.pdf.
- BP, (2008) BP Statistical Review of World Energy 2007, *British Petroleum Company*, <http://www.bp.com>
- Cerneaux S.A., Zakeeruddin S.M., Grätzel M., Cheng Y., and Spiccia L., (2008) New Functional Triethoxysilanes as Iodide Sources for Dye-Sensitized Solar Cells, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, DOI: doi: 10.1016 / j.jphotochem, 2008 (Article in press).
- Chamberlin C.E., Lehman P.A., Reid R.M., and Herron T.G., (1994) Preliminary Results of the Schatz Fuel Cell Research Project, *Hydrogen '94: The 10th World Hydrogen Energy Conference*, Cocoa Beach, Florida, June 20-24, s. 44-54.
- Chaparro A.M., Soler J., Escudero M.J., Ceballos E.M.L., Wittstadt U., and Daza L., (2005) Data Results and Operational Experience with a Solar Hydrogen System, *Journal of PoWer Sources*, 144: 165–169
- Christianson G.E., (1999) Greenhouse: The 200-Year Story of Global Warming, *Walker & Company*, ISBN-13: 978-0802713469, s. 305
- Çengel, Y. A., ve Boles, M. A., (1996) Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, Derbentli, T., *McGraw-Hill – Literatür*, İstanbul, 867s.
- Della R.M. and Rand D.A.J. (2001) Energy Storage-A Key Technology for Global Energy Sustainability, *Journal of PoWer Sources*, 100: 2–17
- Deshmukh S.S., and Boehm R.F., (2007) Review of Modeling Details Related to Renewably PoWered Hydrogen Systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, doi:10.1016/j.rser.2007.06.008 (Basım aşamasında)
- Dincer I., (2002a) Technical, Environmental and Exergetic Aspects of Hydrogen Energy Systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(3): 265-285s.
- Dincer I. (2002b), The role of exergy in energy policy making, *Energy Policy*, 30(2):137–149.
- Dincer I., (2007) Environmental and Sustainability Aspects of Hydrogen and Fuel Cell Systems, *International Journal of Energy Research*, 31:29–55.
- DOE (2005) Solar and Wind Technologies for Hydrogen Production, US Department of Energy, *Report to Congress*, ESECS EE-3060.
- Duffie J.A., and Beckman W.A., (2006) Solar Energy Thermal Processes, *Wiley*, New York, 928s.

- EIA, (2008) Energy Information Administration, *Official Energy Statistics from the U.S. Government*, http://tonto.eia.doe.gov/dnav/pet/pet_pri_spt_s1_d.htm.
- El-Sharkh M.Y., Rahman A., Alam M.S., Byrne P.C., Sakla A.A., and Thomas T., (2004) A dynamic model for a stand-alone PEM fuel cell power plant for residential applications, *J. Power Sources*, 138: 199–204.
- El Zayat M. Y., Saed A. O., and El-Dessouki M. S., (1998) Photoelectrochemical Properties of Dye Sensitized Zr-Doped SrTiO₃ Electrodes, *International Journal of Hydrogen Energy*, 23(4): 259-266s.
- El-Shatter T.F., Eskandar M.N., and El-Hagry M.T., (2002) Hybrid PV/fuel Cell System Design and Simulation, *Renewable Energy*, 27: 479–485.
- EPI, (2001) CO₂ Emissions, *Signposts 2001/CD-Rom, Earth Policy Institute*, Washington, U.S.
- Fischedick M., Nitsch J., and Ramesohl S., (2005) The Role of Hydrogen for the Long Term Development of Sustainable Energy Systems—A Case Study for Germany, *Solar Energy*, 2: 678–686.
- Friberg R., (1993) Photovoltaic Solar Hydrogen Power Plant for Rural Electrification in India. Part 1: A General Survey of Technologies Applicable within the Solar Hydrogen Concept, *International Journal of Hydrogen*, 18(10): 853-882.
- Fujii K., Karasawa T., and Ohkawa K., (2005) Hydrogen Gas Generation by Splitting Aqueous Water Using n-type GaN Photoelectrode with Anodic Oxidation, *Japanese Journal of Applied Physics, Part 2: Letters*, 44:16-19s.
- Fujishima A., and Honda K., (1972) Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode, *Nature*, 238: 37–38s.
- Gammon R., Roy A., Barton J., and Little M., (2006) Hydrogen and Renewables Integration (HARI), *International Energy Agency Hydrogen Implementing Agreement*, Case Study, s. 47.
- Ghosh P.C., Emonts B., and Stolten D., (2003), Comparison of Hydrogen Storage with Diesel-Generator System in a PV–WEC Hybrid System, *Solar Energy*, 75: 187–198.
- Goetzberger A., Bopp G., Griesshaber W., and Stahl W., (1993) The PV/Hydrogen/Oxygen-System of the Self-Sufficient Solar House Freiburg, *Conference Record of the TWenty Third IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1152-1158s.
- Granovskii M., Dincer I., and Rosen M.A., (2007) Greenhouse Gas Emissions Reduction by Use of Wind and Solar Energies for Hydrogen and Electricity Production: Economic factors, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32: 927 – 931.
- Haraldsson K., and Wipke K., (2004) Evaluating PEM fuel cell system models, *J. Power Sources*, 126: 88–97.
- Hedström L., Wallmark C., Alvfors P., Rissanen M., Stridh B., and Ekman J., (2004) Description and Modelling of the Solar–Hydrogen–Biogas–Fuel Cell System in GlashusEtt, *Journal of Power Sources*, 131: 340–350.

- Heller A., and Vadimsky R. G., (1981) Efficient Solar to Chemical Conversion: 12% Efficient Photoassisted Electrolysis in the [p-Type InP(Ru)]/HCl-KCl/Pt(Rh) Cell, *Physical Review Letters*, 46: 17, 1153-1156s.
- Hoffheinz G., Kelly N., and Ete A., (2007) Evaluation of Hydrogen Demonstration Systems & United Kingdom Hydrogen Infrastructure (Years 2-3 of Task 18 of The IEA Hydrogen Implementing Agreement), **Contract Number: F/04/00287/00/Rep**, **URN Number: 07/770**, Contractor: Sgurr Energy Ltd.
- HOKEN, (2005) HOKEN 40 Series 2 Hydrogen Generator Installation & Operation Instructions, Proton Energy Systems, 140s.
- IEA, (2002) International Energy Agency. CO₂ Emissions from Fuel Combustion. <http://www.iea.org/stats/files/co2.htm>
- IEA, (2006), World Energy Outlook 2006, *International Energy Agency, Head of Publications Service*, OECD/IEA, France.
- Ihara S., (1979), Direct Thermal Decomposition of Water, Solar Energy Systems, *Pergamon Press*, New York.
- Joshi A.S., (2006) Evaluation of Cloudiness/Haziness Factor and its Application for Photovoltaic Thermal (PV/T) System for Indian Climatic Conditions, PhD Thesis, *IIT Delhi*, 162s.
- Kainthla R. C., Zelenay B., and Bockris J. O'M., (1987) Significant Efficiency Increase in Self-Driven Photoelectrochemical Cell for Water Photoelectrolysis, *Journal of the Electrochemical Society*, 134(4): 841-845s.
- Kazim A., and Veziroglu T.N., (2001) Utilization of Solar-Hydrogen Energy in the UAE to Maintain its Share in the World Energy Market for the 21st Century, *Renewable Energy*, 24: 259-274.
- Kazmerski L.L., and Broussard K., (2004) Solar Photovoltaic Hydrogen: The Technologies and Their Place in Our Roadmaps and Energy Economics, *19th European PV Solar Energy Conference and Exhibition*, Paris, France, June 7-11.
- Khan S.U.M., Al-Shahry M., and Ingler W.B.Jr., (2002) Efficient Photochemical Water Splitting by a Chemically Modified n-TiO₂, *Science*, 297: 2243-2245s.
- Koçyiğit, M., (2001) Proje Değerlendirmede Enflasyon Etkisi, TTMD Yayınları, 150s.
- Kogan A., (1998) Direct Solar Thermal Splitting of Water and On-Site Separation of the Products—II. Experimental Feasibility Study, *International Journal of Hydrogen Energy*, 23(2): 89-98s.
- Kotas T.J., (1985) The Exergy Method of Thermal Plant Analysis, Butterworths, 457s.
- Kotay S.M., and Das D., (2008) Biohydrogen as a Renewable Energy Resource—Prospects and Potentials, *International Journal of Hydrogen Energy*, 33: 258 – 263.
- Kothari R., Buddhi D., and Sawhney R.L., (2008) Comparison of Environmental and Economic Aspects of Various Hydrogen Production Methods, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12: 553-563.
- Larminie J., and Dicks A., (2003) Fuel Cell Systems Explained, 2nd Edition, ISBN: 978-0-470-84857-9, John Wiley & Sons, England, 428s.

- Lee, K. C., (2001) Classification of Geothermal Resources by Exergy. *Geothermics*, 30: 431-442.
- Lehman P.A., Chamberlin C.E., and Pauletto G., (2001) Operating Experience with a Photovoltaic-Hydrogen Energy System 2, *International Journal of Hydrogen Energy*, 24: 260-274.
- Lehman P.A., Chamberlin C.E., Pauletto G., and Rocheleau M.A., (1997) Operating Experience with a Photovoltaic-Hydrogen Energy System, *International Journal of Hydrogen Energy*, 22 (5): 465-470.
- Lehman P.A., Chamberlin C.E., Zoellick J.I., and Engel R.A., (2000) A Photovoltaic/Fuel Cell PoWer System for a Remote Telecommunications Station, *28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Anchorage, Alaska, September 15-20.
- Licht S., Wang B., Mukerji S., Soga T., Umeno M., and Tributsch H., (2001) Over 18% Solar Energy Conversion to Generation of Hydrogen fuel; Theory and Experiment for Efficient Solar Water splitting, *International Journal of Hydrogen Energy*, 26: 653–659s.
- Loa M., (2008) Atmospheric Carbon Dioxide, *NOAA/ESRL*, http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/co2_data_mlo.html
- Luzzi A., Bonadio L., and McCann M., (2004) In Pursuit of the Future - 25 years of IEA Research Towards the Realisation of Hydrogen Energy Systems, *International Energy Agency – Hydrogen Implementing Agreement*.
- Markandya A., and Wilkinson P., (2007) Electricity Generation and Health, *Energy and Health* 2, <http://www.thelancet.com>, 370: 4-17.
- Meurer C., Barthels H., Brocke W.A., Emonts B., and Groehn H.G., (1999) Phoebus - An Autonomous Supply System with Renewable Energy: Six Years of Operational Experience and Advanced Concepts, *Solar Energy*, 67 (1–3): 131–138.
- MGM, (2007) Denizli İline Ait Meteorolojik Değerler, *Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü Araştırma ve Bilgi İşlem Daire Başkanlığı*, Ankara.
- Midilli A., and Dincer I., (2007) Key Strategies of Hydrogen Energy Systems for Sustainability, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32: 511 – 524.
- Midilli A., Ay M., Dincer I., and Rosen M.A., (2005) On Hydrogen and Hydrogen Energy Strategies I: Current Status and Needs, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9: 255–271.
- Miland H., (2005) Operational Experience and Control Strategies for a Stand-Alone PoWer System based on Renewable Energy and Hydrogen, *Norwegian University of Science and Technology-Faculty of Natural Sciences and Technology, Department of Materials Technology*, PhD Thesis, s. 278.
- Mills A., and Al-Hallaj S., (2004) Simulation of Hydrogen-Based Hybrid Systems Using Hybrid2, *International Journal of Hydrogen Energy*, 29: 991-999.
- Momirlan M., and Veziroglu T.N., (2002) Current Status of Hydrogen Energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6: 141–179.
- Momirlan M., and Veziroğlu T.N., (1999) Recent Directions of World Hydrogen Production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 3: 219-231.

- Moran J.M., and Shapiro H.N., (2000) Fundamentals of Engineering Thermodynamics, John Wiley & Sons, 4 Sub edition, 918s.
- Morisaki H., Watanabe T., Iwase M., and Yazawa K., (1976) Photoelectrolysis of Water with TiO₂-Covered Solar-Cell Electrodes, *Applied Physics Letters*, 29(6): 338-340s.
- Murphy O.J., and Bockris J.O'M., (1984) Photovoltaic Electrolysis: Hydrogen and Electricity from Water and Light, *International Journal of Hydrogen Energy*, 9 (7): 557-561.
- NASA, (2008) Global Temperature Anomalies in 0.01 C, *Goddard Institute for Space Studies*, [http:// data.giss.nasa.gov/gistemp/tabledata/GLB.Ts.txt](http://data.giss.nasa.gov/gistemp/tabledata/GLB.Ts.txt).
- NEXA, (2003) NexaTM Power Module User's Manual, Ballard Power Systems, June 2003.
- Norbeck J.M., Heffel J.W., Durbin T.D. Tabbara B., Bowden J.M., and Montano M.C., (1996) Hydrogen Fuel for Surface Transportation, SAE, *Warrendale, PA*, 12-19s
- Nowotny J., Sorrell C.C., Bak T., and Sheppard L.R., (2005) Solar-Hydrogen: Unresolved Problems in Solid-State Science, *Solar Energy*, 78: 593–602s.
- Nozik A. J., (1976) P-n Photoelectrolysis Cells, *Applied Physics Letters*, 29(3): 150-153s.
- Nozik A. J., (1977) Electrode Materials for Photoelectrochemical Devices, *Journal of Crystal Growth*, 39(1): 200-209.
- O'Regan B., and Grätzel M., (1991) A Low-Cost, High Efficiency Solar Cell based on Dye-sensitized Colloidal TiO₂ Films, *Nature*, 353(6346): 737-745s.
- Ohya H., Yatabe M., Aihara M., Negishi Y., and Takeuchi T., (2002) Feasibility of Hydrogen Production Above 2500 K by Direct Thermal Decomposition Reaction in Membrane Reactor Using Solar Energy, *International Journal of Hydrogen Energy*, 27: 369–376s.
- Ottesen H.H., (2004) Dynamic Performance of the Nexa Fuel Cell PoWer Module, University of Minnesota Rochester, Report 1, US, 40s.
- Poggi, P., Muselli, M., and Cristofari, C. (2006) Modelling and Simulating of an Energetical Complex System Constituted by a Photovoltaic Array, a Wind Turbine, an Electrolyzer, and Fuel Cells, *Proceedings of the Sixth IASTED International Conference on Modelling, Simulation, and Optimization*, s. 279-284.
- Radecka M., (2004) TiO₂ for Photoelectrolytic Decomposition of Water, *Thin Solid Films*, 451–452, 98–104s.
- Rowe A., and Li X., (2001) Mathematical modeling of proton exchange membrane fuel cells, *J. Power Sources*, 102: 82–96.
- Rzayeva M.P., Salamov O.M., and Kerimov M.K., (2001) Modeling to Get Hydrogen and Oxygen by Solar Water Electrolysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, 26: 195-201s.
- Santarelli M., Cal M., and Macagno S., (2004) Design and Analysis of Stand-Alone Hydrogen Energy Systems with Different Renewable Sources, *International Journal of Hydrogen Energy*, 29: 1571 – 1586.
- Sepulveda, J. A., Souder, W. E. and Gottfried, B. S., (1984) Theory and Problems of Engineering Economy, Mc Grow Hill Inc.

- Schucan T., (1999) Case Studies of Integrated Hydrogen Systems, *International Energy Agency Hydrogen Implementing Agreement Final Report for Subtask A of Task 11 – Integrated Systems*, s. 69.
- Schucan T., (2000) International Energy Agency Hydrogen Implementing Agreement Task 11: Integrated Systems Final Report of Subtask A: Case Studies of Integrated Hydrogen Energy Systems Chapter 4, *IEA/H2/T11/FR1-2000*, s. 75.
- Schucan T., (2001) Case studies of Integrated Hydrogen Energy Systems, IEA, *International Energy Agency Hydrogen Implementing Agreement Final Report*, s. 231.
- Sherif S.A., Barbir F., and Veziroglu T.N., (2005) Wind Energy and the Hydrogen Economy -Review of the Technology, *Solar Energy*, 78: 647–660s.
- Sims R.E.H., Rogner H.H., and Gregory K., (2003) Carbon Emission and Mitigation Cost Comparisons between Fossil Fuel, Nuclear and Renewable Energy Resources for Electricity Generation, *Energy Policy*, 31: 1315–1326.
- Spiegel C.S., (2007) Designing&Building Fuel Cells, McGraw-Hill, 500s.
- Steeb H., Seeger W., and Oud H.A., (1994) HYSOLAR: An Overview on the German-Saudi Arabian Programme on Solar Hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy*, 19 (8): 683-686.
- Steinfeld A., (2002) Solar Hydrogen Production via a Two-Step Water-Splitting Thermochemical Cycle Based on Zn /ZnO Redox Reactions, *International Journal of Hydrogen Energy*, 27: 611 – 619s.
- Steinfeld A., (2005) Solar Thermochemical Production of Hydrogen—A Review, *Solar Energy*, 78: 603–615s.
- SWB, (2000) Review of Neunburg vorm Wald Solar Hydrogen Demonstration Project, *SWB Group*, www.solarhydrogen.com/pdfs/eng/press_e_01.pdf.
- Szyszk A., (1997) Ten Years of Solar Hydrogen Demonstration Project at Neunberg vorm Wald, Germany. *International Journal of Hydrogen Energy*, 23(10): 849-860.
- Torres L.A., Rodriguez F.J., and Sebastian P.J. (1998) Simulation of a Solar-Hydrogen-Fuel Cell System: Results for Different Locations in Mexico, *International Journal of Hydrogen Energy*, 23(4): 295-301.
- Voss K., Goetzberger A., Bopp G., Haberle A., Heinzl A., and Lehmborg H., (1996) The Self-Sufficient Solar House in Freiburg- Results of 3 Years of Operation, *Solar Energy*, 58 (1-3): 17-23.
- Waki I., Cohen D., Lal R., Mishra U., DenBaars S.P., and Nakamura S. (2007) Direct Water Photoelectrolysis with Patterned n-GaN, *Japanese Journal of Applied Physics, Letters*, 91: 493-519.
- WEB_1, (2008) Natural Gas Wellhead Prices, New York State Energy Research and Development Authority, http://www.nyserda.org/Energy_Information/Constant2005Prices.xls (20.05.2008)
- WEB_2, (2008) Energy in Brief — What everyone should know about energy, Energy Information Administration, http://tonto.eia.doe.gov/energy_in_brief/greenhouse_gas.cfm (12.05.2008)

- WEB_3, (2008) TRNSYS, A Transient Systems Simulation Program, The University of Wisconsin, <http://sel.me.wisc.edu/trnsys> (15.01.2008)
- WEB_4, (2008) MATLAB Simulink, <http://www.mathworks.com/products/simulink> (15.01.2008)
- WEB_5, (2008) Hybrid2, National Renewable Energy Laboratory and Renewable Energy Research Laboratory – University of Massachusetts, <http://www.ceere.org/rerl/projects/software/hybrid2> (15.01.2008)
- WEB_6, (2008) HOMER, National Renewable Energy Laboratory (NREL), United States Department of Energy, <https://analysis.nrel.gov/homer> (10.02.2008)
- WEB_7, (2006) Kyocera KC125GHT-2 Data Sheet, Kyocera Inc, <http://www.kyocerasolar.de/products/pdf1/KC125GHT-2.pdf>, (19.03.2006).
- WEB_8, (2006) Zomeworks Passive Energy Products, <http://www.zomeworks.com> (19.03.2006).
- WEB_9, (2006) Easypure II LF Data Sheet, Barnstead, <http://www.clarksonlab.com/bart/Deionization/346.pdf>, (19.03.2006).
- WEB_10, (2006) Ovonic Hydrogen Solution, <http://www.ovonichydrogen.com/products/portable.htm>, (20.03.2006).
- WEB_11, (2008) NASA Surface Meteorology and Solar Energy, <http://eosWeb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=> (01.04.2008).
- Würfel P., (2005) Physics of Solar Cells, Wiley and Sons, ISBN 3-527-40428-7, 480s.
- Yamada Y., Matsuki N., Ohmori T., Mametsuka H., Kondo M., Matsuda A., and Suzuki E., (2003) One Chip Photovoltaic Water Electrolysis Device, *International Journal of Hydrogen Energy*, 28: 1167 – 1169s.
- Zoulias E.I., and Lymberopoulos N., (2007) Techno-economic Analysis of the Integration of Hydrogen Energy Technologies in Renewable Energy-Based Stand-Alone PoWer Systems, *Renewable Energy*, 32:680–696.

ÖZGEÇMİŞ

Adı, Soyadı : Ahmet YILANCI
Doğum Yeri ve Tarihi : Çal/Denizli, 03.10.1978
Lisans Eğitimi ve Mezuniyet Tarihi : Dokuz Eylül Üniversitesi, Makina
Mühendisliği Bölümü, 2000.
Y.Lisans Eğitimi ve Mezuniyet Tarihi : Pamukkale Üniversitesi, FBE, 2004.
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce