

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**HİBRİD YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ İLE ELEKTRİK VE  
HİDROJEN ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

**DOKTORA TEZİ**

**Ersin AKYÜZ**

**Balıkesir, Ekim-2010**

T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HİBRİD YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ İLE ELEKTRİK VE  
HİDROJEN ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ

Ersin AKYÜZ

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Zuhal OKTAY  
Prof. Dr. İbrahim DİNÇER

Sınav Tarihi: 22.10.2010

Jüri Üyeleri: Prof. Dr. İbrahim DİNÇER (Eş Danışman-UOİT) *I. Simel*  
Prof. Dr. Murat AYDIN (İTÜ) *M. Aydın*  
Prof. Dr. Recep YAMANKARADENİZ (ÜÜ) *R. Yamankaradeniz*  
Doç. Dr. Zuhal OKTAY (Danışman-BAÜ) *Z. Oktay*  
Yrd. Doç. Dr. Hüseyin GÜNERHAN (EÜ) *H. Günerhan*  
Yrd. Doç. Dr. M. Kubilay EKER (BAÜ) *M. Kubilay Eker*  
Yrd. Doç. Dr. Nadir İLTEN (BAÜ) *N. İlten*

Enstitü Yönetim Kurulu.....tarih .....sayılı oturumunun.....nolu  
kararı ile.....mezun olmuştur.

Balıkesir, Ekim-2010

## ÖZET

### HİBRİD YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ İLE ELEKTRİK VE HİDROJEN ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI

Ersin AKYÜZ

Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

(Doktora Tezi / Tez Danışmanları: Doç. Dr. Zuhul OKTAY, Prof. Dr. İbrahim DİNÇER)

Balıkesir, Türkiye, 2010

Günümüzde sürdürülebilir yaşam alanları oluşturmak için sürdürülebilir enerji stratejilerini uygulamak, iklim değişimi ve küresel ısınma ile mücadelede önemli hale gelmiştir. Hidrojen enerjisi ve yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen elde edilmesi bu problemlerin çözümünde önemlidir. Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş ve rüzgar enerjisi yoluyla elektrik enerjisi ve hidrojen üretilmesi incelenmiştir. Öncelikle, HOMER yazılımıyla boyutlandırma yapılarak, Balıkesir Bigadiç'te Kınalı Keklik üretim tesisinde 1 kWp fotovoltaik ve 10 kW rüzgar hibrid enerji sistemi, 48 kW aküler ve 5 kW evirici ile birlikte kurulmuştur. Yenilenebilir enerji sisteminde tesisin yıllık enerji ihtiyacı ve bölgenin meteorolojik verileri kullanılarak sistemde kullanılan tüm elemanlar boyut optimizasyonu yolu ile belirlenmiştir. Hidrojen üretiminde ise; 150 ml/dak hidrojen üretim kapasitesine sahip proton zar geçişli elektroliz ünitesi kullanılmıştır. Fotovoltaik-Elektroliz, Rüzgar-Elektroliz ve Fotovoltaik-Rüzgar hibrid sistemlerin enerji ve ekserji analizlerinin yanı sıra yaşam döngüsü maliyet analizi ile ekonomik değerlendirmeleri yapılmıştır. Elektroliz ünitesinin performansını, değişken çalışma koşullarında inceleyebilmek için değişken akım yoğunluğu ve sıcaklığın enerji verimi ve ekserji verimine olan etkisi incelenmiştir. Tüm sistem elemanları Matlab-Simulink modeli ile analiz edilerek deneysel verilerle karşılaştırma yapılmıştır. Fotovoltaik sistemin enerji verimi % 10.7–14 aralığında, ekserji verimi ise % 9.5–12 aralığında değiştiği bulunmuştur. Sistemde kullanılan 1 m<sup>2</sup> yüzey alanına sahip % 14 verimli fotovoltaik panelin 150 ml/dak elektroliz ünitesi ile, yıllık hidrojen üretim miktarı 2.97 kg ve yıllık hidrojen üretim maliyeti ise 46 \$/kg olarak bulunmuştur. Ayrıca hidrojen üretim miktarı, maliyeti ve panel sıcaklığı denklemler ile ifade edilmiştir. Elektroliz sisteminin 25°C'de ve 10–40 A akım aralığında enerji verimi % 69–65, ekserji verimi ise % 68–63 aralığında hesaplanmıştır. Rüzgar türbininin enerji verimi % 34.6 ve ekserji verimi ise % 28.5 olarak bulunmuştur. Ayrıca Balıkesir bölgesinde rüzgar türbini elektroliz sisteminin hidrojen üretiminin ekonomikliği araştırılmıştır. 1 kW rüzgar ve 0.56 kW elektroliz ünitesinden yıllık 20.3 kg hidrojen üretilebileceği ve hidrojen eldesinin maliyetinin ise 30.8 \$/kg olduğu bulunmuştur. Bigadiç'te kurulan tesisin enerji eldesiyle ilgili olarak yapılan ölçümlerde ise Mart-Temmuz ayları arasında kapasite kullanım değerleri rüzgar türbini için % 4.7–14.2 ve fotovoltaik sistem için ise % 1.7–2.3 olarak bulunmuştur. Akülerin şarj durumu ise % 56.6–84.2 aralığında gerçekleştiği bulunmuştur.

**ANAHTAR SÖZCÜKLER:** Yenilenebilir enerji, hidrojen, ekserji, enerji, hibrid enerji.

## ABSTRACT

### INVESTIGATION OF HYBRID RENEWABLE ENERGY SYSTEMS FOR ELECTRICITY AND HYROGEN PRODUCTION

Ersin AKYÜZ

Balıkesir University, Institute of Science,  
Department of Mechanical Engineering

(Ph. D. Thesis / Supervisors: Doc. Dr. Zuhai OKTAY, Prof. Dr. İbrahim DİNCER)

Balıkesir-Turkey, 2010

Today, implementing sustainable energy strategies for creating a sustainable living space is important for combating against climate change and global warming. Hydrogen energy and production of hydrogen from renewable energy sources is important for the solution of these problems. In this study, production of electrical energy and hydrogen using photovoltaic and wind energy was studied. Firstly the size of the system was determined by HOMER software program and a hybrid energy system of 1 kWp photovoltaic and 10 kW wind turbine with 48 kW batteries and 5 kW inverter was set up in Balıkesir Bigadic Partridge Facility. The size of the elements of the renewable energy system was determined by size optimization using annual energy need of the facility and regional meteorological data. Proton exchange membrane (PEM) electrolysis unit with 150 ml/min hydrogen production capacity was used for hydrogen production. In addition, energy and exergy analysis of photovoltaic-electrolysis, wind-electrolysis and photovoltaic-wind hybrid systems, their life cycle cost analysis and economical analysis were also carried out. To evaluate the performance of electrolysis unit in varying work conditions, the effect of varying current density and heat temperature on energy and exergy efficiencies were investigated. All system elements were modeled by using MATLAB-Simulink and the results were compared with the results of experimental analysis. Energy efficiency of photovoltaic system was calculated between 10.7–14 % and exergy efficiency was found between 9.5–12 % . Using 150 ml/min electrolysis unit, the annual hydrogen production of photovoltaic panel with 1m<sup>2</sup> surface area and 14 % efficiency was found as 2.97 kg and annual hydrogen production cost was calculated as 46 \$/kg. Also hydrogen production quantity, cost and panel temperature were stated with equations. At 25°C and 10–40 A current interval, electrolysis system has an energy efficiency of 69-65 % and exergy efficiency of 68-63 %. Energy efficiency of wind turbine was calculated as 34.6 % and its exergy efficiency was found as 28.5 %. Also hydrogen production cost of wind turbine-electrolysis system in Balıkesir region was calculated. It was found that annually 20.3 kg hydrogen could be produced from 1 kW wind and 0.56 kW electrolysis unit and hydrogen production cost was found as 30.8 \$/kg. With the measurements related with energy production of the facility, set up in Bigadic, capacity use values between March and July was calculated as 4.7–14.2 % for wind turbine and 1.7–2.3 % for photovoltaic system. The charge of the batteries was found in the interval of 56.6–84.2 %.

**KEYWORDS:** Renewable energy, hydrogen, exergy, energy, hybrid energy.

## İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET, ANAHTAR SÖZCÜKLER .....	ii
ABSTRACT, KEYWORD .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
SEMBOL ve KISALTMA LİSTESİ .....	vi
TABLO LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ .....	ix
ÖNSÖZ.....	xii
1. GİRİŞ .....	1
1.1 Enerji ve Çevre .....	4
1.2 Dünyada ve Türkiye’de Enerji Görünümü.....	6
1.3 Küresel Isınma Sorunu ve Uluslararası Alanda Çözümler .....	11
1.4 Tezin Önemi .....	12
1.5 Tezin Motivasyon ve Amaçları .....	14
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	15
2.1 Hibrid Yenilenebilir Enerji Sistemlerinin Boyutlandırılması ve Enerji Maliyetiyle İlgili Çalışmalar .....	15
2.2 Hibrid Yenilenebilir Enerji Sisteminden Elektroliz Yolu ile Hidrojen Eldesi Araştırmaları .....	21
2.3 Hidrojen Eldesinin Maliyeti ile Yapılan Çalışmalar.....	24
2.4 Hibrid Yenilenebilir Enerji Sistemlerinin Performans ve Boyutlandırmasında Kullanılan Yazılımlar .....	27
2.5 Güneş ve Rüzgar Enerjisinin ve PEM Elektrolizin Ekserji Analizi Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	29
2.6 Yenilenebilir Enerji Destekli Hidrojen Üretim Sistemleri Pilot Projeler.....	33
2.6.1 Nemo Projesi .....	33
2.6.2 Freiburg Güneş Evi Projesi .....	34
2.6.3 Saphys Projesi .....	34
2.6.4 Trois Rivières Projesi .....	35
2.6.5 Inta Projesi.....	35
2.6.6 Schatz Projesi .....	36
3. HİBRİD SİSTEM ELEMANLARI.....	37
3.1 Hidrojen .....	37
3.1.1 Hidrojenin Yakıt Olarak Özellikleri Üretim ve Kullanım Alanları .....	38
3.1.2 Hidrojenin Depolanması .....	40
3.2 Elektroliz .....	40
3.2.1 Alkalın Elektrolizör.....	43
3.2.2 Proton Değişimli Zarlı Elektroliz (PEM).....	43
3.3 Rüzgar Türbinleri .....	45
3.3.1 Rüzgar Türbinlerinde Hız Kontrolü .....	46
3.3.2 Rüzgar Türbinlerinde Güç Kontrol Yöntemleri .....	48
3.4 Fotovoltaik Malzemeler ve Çalışma Prensipleri .....	49
3.5 Fotovoltaik Sistemler.....	53
3.6 Piller-Enerji Depolama Teknolojileri.....	57
4. SİSTEM TANITIMI.....	60

4.1 Bigadiç Kınalı Keklik Tesisinde Kurulan Yenilenebilir Rüzgar-Güneş Hibrid Enerji Sistemi.....	60
4.1.1 Elektriksel ve Meteorolojik Ölçüm Sistemi .....	66
4.2 PEM Elektroliz Sistemi.....	70
5. MODELLEME ve ANALİZ.....	73
5.1 Ekserji Analizi .....	73
5.2 Fotovoltaik Sistemin Analizi .....	75
5.2.1 Fotovoltaik Sistemlerin Modellenmesi .....	75
5.2.2 Fotovoltaik Sistemlerde Enerji ve Ekserji Analizi .....	79
5.3 Rüzgar Türbininin Analizi .....	82
5.3.1 Rüzgar Türbininin Modellenmesi .....	82
5.3.2 Rüzgar Türbininin Enerji ve Ekserji Analizi .....	85
5.4 PEM Elektroliz Sisteminin Analizi.....	89
5.4.1 PEM Elektroliz Sisteminin Modellenmesi.....	89
5.4.2 PEM Elektroliz Enerji ve Ekserji Analizi.....	94
5.5 Yenilenebilir Enerji Sistemi Boyutlandırma Optimizasyonu.....	96
5.6 Ekonomik Analiz .....	99
5.7 Belirsizlik Analizi .....	101
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	103
6.1 Hibrid Yenilenebilir Enerji Sisteminin Boyutlandırma Sonuçları .....	103
6.2 Fotovoltaik-Elektroliz Hidrojen Eldesi Sonuçları .....	106
6.2.1 Fotovoltaik-Elektroliz Sisteminin Ekonomik Analiz Sonuçları.....	111
6.3 Rüzgar Türbini Elektroliz Sistemi Analiz Sonuçları .....	114
6.3.1 Rüzgar Elektroliz Hidrojen Maliyeti.....	118
6.4 PEM Elektroliz Enerji ve Ekserji Analizi Sonuçları .....	120
6.5 Yenilenebilir Hibrid Sistemin Analiz Sonuçları .....	124
6.6 Belirsizlik Analizi Sonuçları .....	134
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	135
EK A Tezde Kullanılan Yazılımlar.....	139
8. KAYNAKLAR.....	146

## SEMBOL ve KISALTMA LİSTESİ

<u>Sembol</u>	<u>Açıklama</u>	<u>Birimi</u>
A	Diyot kalite parametresi	-
A	Yüzey alanı	m <sup>2</sup>
C <sub>p,a</sub>	Havanın ısı kapasitesi	kJ/kg K
C <sub>p,v</sub>	Buharın ısı kapasitesi	kJ/kg K
E	Elektroliz açık devre gerlimi	V
E <sub>G</sub>	Yarı iletken band boşluk gerilimi	eV
$\dot{e}x$	Spesifik ekserji	kJ/kg
$\dot{E}x$	Ekserji	W
F	Faraday sabiti	-
H	Entalpi	kJ/kg
H	Yükseklik	m
h <sub>c</sub>	Isı taşıma katsayısı	W/m <sup>2</sup> K
I	Akım	A
I <sub>0</sub>	Diyot doyma akımı	A
i	Faiz oranı	%
K	Boltzman sabiti	J/K
K	Yüzey pürüzlülük sabiti	-
K <sub>v</sub>	Açık devre gerlimi sıcaklığa bağlı sabiti	-
$\dot{m}$	Kütleli debi	kg/s
N	Diyot kalite faktörü	-
N	Proje ömrü	Yıl
n <sub>H2</sub>	Hidrojen akış miktarı	mol/s
P	Basınç	kPa
P	Güç	W
Q	Elektrik yükü	C
$\dot{Q}$	Isı transferi	W
R	Gaz sabiti	J/mol K
R	Direnç	$\Omega$
r	Kanat yarıçapı	m
S <sub>t</sub>	Yüzeye gelen güneş ışınım miktarı	W/m <sup>2</sup>
S	Entropi	kJ/ K
u <sub>F</sub>	Belirsizlik	%
T	Sıcaklık	°C
T <sub>G</sub>	Güneşin sıcaklığı	K
V	Gerilim	V
V	Rüzgar hızı	m/s
v <sub><math>\pi</math></sub>	Türbin kanat ucu hızı	m/s
w <sub>t</sub>	Rüzgar türbini shaft açılma hızı	rad/s
Z	Elektron sayısı	-
$\Gamma$	Tersinmezlik	W
$\lambda$	Uç hız oranı	-

$\alpha$	Transfer sabiti	-
$\lambda_{mem}$	Membranın su içeriği	-
$\eta$	Enerji verimi	%
$\eta_a$	Anot aktivasyon aşırı gerilimi	V
$\eta_k$	Katot aktivasyon aşırı gerilimi	V
$\psi$	Ekserji verimi	%
$\varphi$	Membranın kalınlığı	mm
$\rho$	Havanın özgül ağırlığı	kg/m <sup>3</sup>
$\Lambda$	Uç hız oranı	-
$\Sigma$	Yığının iletkenliği	Siemens/cm
$\varrho$	Kanat eğim açısı	Rad

### Alt indisler

### Açıklama

a	Anot
ad	Açık devre
akt	Aktivasyon
C	Katot
Ç	Çıkan
D	Eşdeğer diyot
elek	Elektroliz
F	Yakıt
fiz	Fiziksel
g	Giren
gen	Jeneratör
hüc	Hücre
k	Kayıp
kd	Kısa devre
kim	Kimyasal
kin	Kinetik
L	Foton
m	Maksimum
N	Normalize
ohm	Omik
pot	Potansiyel
pv	Fotovoltaik
rüz	Rüzgar
s	Seri
sh	Şönt
t	Toplam



## TABLO LİSTESİ

<u>Tablo Adı</u>	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1 Fosil Kaynakların ortalama ömrü büyük rezerv sahibi ülkeler .....	2
Tablo 1.2 Dünyada ve Türkiye’de birincil enerji kaynakları dağılımı. ....	7
Tablo 1.3 Türkiye’de işletmede olan rüzgar enerji santralleri .....	9
Tablo 3.1 Farklı yakıtların özelliklerinin hidrojen ile karşılaştırılması .....	38
Tablo 3.2 Suyun elektrolizinde kimyasalların termodinamik özellikleri .....	41
Tablo 3.3 Farklı ticari üreticilere ait farklı tipte elektroliz cihazları .....	42
Tablo 3.4 Farklı modelde rüzgar türbinlerinin özelliklerinin karşılaştırılması. ....	48
Tablo 3.5 2008–2010 yıllarında kurulan fotovoltaik enerji santralleri .....	56
Tablo 4.1 Tesisin elektrik enerji ihtiyacı ve kullanılan cihazlar. ....	66
Tablo 4.2 Deneysel ölçümlerde kullanılan cihazların özellikleri. ....	72
Tablo 5.1 Enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması .....	74
Tablo 5.2 Teknik ve ekonomik hesaplamalarda kullanılan değerler. ....	101
Tablo 5.3 Meteorolojik ölçüm istasyonuna ait özellikler .....	102
Tablo 6.1 Boyutlandırma sonucunda farklı konfigürasyonla için hesaplanan enerji maliyetleri. ....	104
Tablo 6.2 Hibrid sistemden jeneratör kaynaklı emisyonlar. ....	105
Tablo 6.3 Radyasyonun değişimiyle hidrojen üretim miktarı ve maliyetinin değişimi. ....	113
Tablo 6.4 Rüzgar elektroliz sisteminden hidrojen üretim miktarı ve maliyeti. ....	119
Tablo 6.6 Yenilenebilir hibrid enerji sisteminin aylık kapasite kullanım oranları. ....	127
Tablo 6.7 Hibrid sistemin tüm elemanlarının enerji ve ekserji değerleri. ....	134
Tablo 6.8 Deneysel hesaplanan değerlerin belirsizlikleri. ....	134

## ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil Adı</u>	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 Yeryüzündeki hava sıcaklığının ve atmosferdeki karbondioksit miktarının 1880–2007 yılları arasında değişimi .....	3
Şekil 1.2 Elektrik üretiminde yakıtların kWh başına CO <sub>2</sub> emisyonları .....	6
Şekil 1.3 Dünya elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında yaşanan artış .....	10
Şekil 1.4 Yenilenebilir kaynaklarından elde edilen enerjin bir kilovattı için gereken yatırım maliyeti .....	11
Şekil 3.1 PEM Elektrolizör çalışma prensibi .....	45
Şekil 3.2 Rüzgar türbinin çıkış gücünün rüzgar hızına göre incelenmesi .....	47
Şekil 3.3 Fotovoltaik sistemlerin çalışmasının bağ teorisiyle açıklanması .....	51
Şekil 3.4 Fotovoltaik sistemin hücre içyapısı .....	51
Şekil 3.5 PV sistemin radyasyon değerlerinde akım-gerilim eğrisi.....	53
Şekil 3.6 Fotovoltaik panelin sıcaklığa bağlı I-V eğrisi değişimi.....	54
Şekil 3.7 Fotovoltaik sistemlerin farklı kullanım şekillerine göre sınıflandırılması.....	55
Şekil 4.1 Bigadiç'te kurulan yenilenebilir enerji sisteminin genel görüntüsü.....	61
Şekil 4.2 Şebekeden uzak bölgeler için enerji alternatifleri.....	62
Şekil 4.3 Rüzgar türbini için hazırlanan beton kaide ve temelin yerleşimi.....	63
Şekil 4.4 Rüzgar türbini, ekipmanları ve direğinin montajı.....	64
Şekil 4.5 Evirici, aküler ve kontrol sistemlerinin yerleşimi.....	65
Şekil 4.6 Rüzgar türbinin montaj görüntüsü.....	65
Şekil 4.7 Tesisin yıllık bazda yük profilinin değişimi.....	67
Şekil 4.8 Rüzgar-Güneş-Akü ölçüm sistemi.....	67
Şekil 4.9 Rüzgar türbininin akü ve ölçüm sistemine bağlantısı.....	68
Şekil 4.10 Rüzgar hız ölçüm sisteminin montajı.....	68
Şekil 4.11 Yenilenebilir enerji sisteminin ölçüm şeması.....	69

Şekil 4.12 QL–150 PEM Elektroliz cihazının prensip şeması. ....	70
Şekil 4.13 PEM sisteminin performans ölçümüne yönelik mikrokontrolör denetimli ölçüm sistemi.....	71
Şekil 4.14 Ölçüm sistemiyle birlikte PEM elektroliz cihazı. ....	71
Şekil 5.1 Fotovoltaik hücrenin tek diyotlu modeli.....	75
Şekil 5.2 Fotovoltaik panellerin hücre sıcaklığının ortam sıcaklığı ile değişimi. ....	77
Şekil 5.3 Fotovoltaik panel için Matlab-Simulink blokları. ....	78
Şekil 5.4 Fotovoltaik panelin maksimum çalışma noktası .....	80
Şekil 5.5 10 kW gücünde dikey eksenli bir rüzgar türbinin çıkış gücünün.....	83
Şekil 5.6 Güç katsayısının kanat eğim açısına ve uç hız oranıyla değişimi. ....	84
Şekil 5.7 Rüzgar türbinin Matlab-Simulink modeli. ....	85
Şekil 5.8 Pervanenin önünde ve arkasında rüzgar hızı ve dönüşü bağlı olarak basınç ve sıcaklık ve hava akışındaki değişimler .....	86
Şekil 5.9 PEM elektroliz için hazırlanan Matlab Simulink Modeli. ....	93
Şekil 5.10 Elektroliz prensip şeması.....	95
Şekil 5.11 Aylık ortalama rüzgar hızı ve güneş radyasyon değerleri.....	97
Şekil 5.12 10 kW gücünde Rüzgar türbini rüzgar hızı-çıkış gücü eğrisi. ....	98
Şekil 6.1 Yıllık bazda aylara göre günlük ortalama güç üretim miktarları.....	104
Şekil 6.2 Yenilenebilir enerji kullanımı ile engellenen zararlı gaz emisyonları.....	105
Şekil 6.3 Analizde kullanılan rüzgar, sıcaklık ve radyasyon değerlerinin değişimi. ....	106
Şekil 6.4 Günlük ortalama radyasyonla enerji ve ekserji veriminin değişimi. ....	107
Şekil 6.5 Fotovoltaik panel için sıcaklık değerlerinin değişimi.....	108
Şekil 6.6 Fotovoltaik panel veriminin saatlik olarak değişimi. ....	108
Şekil 6.8 Fotovoltaik-Elektroliz aylık hidrojen üretim miktarı. ....	109
Şekil 6.9 Hidrojen üretim dağılım olasılığının yıllık güneş radyasyonu ile değişimi. ....	110
Şekil 6.10 Enerji verim hesaplamalarında aylık ve günlük ortalama değerlerin kullanılması sonucunda ortaya çıkan hata oranları. ....	111
Şekil 6.11 Yıllık hidrojen üretim miktarı ve maliyetinin güneş radyasyonu ile değişimi. ....	114

Şekil 6.12 Buhar spesifik ısı kapasitesinin sıcaklıkla değişimi. ....	115
Şekil 6.13 Havanın özgül ağırlığının % 10 artışına bağlı enerji ve ekserji veriminin değişimi. ....	116
Şekil 6.14 Rüzgarın değişimine bağlı olarak ekserji veriminin değişimi. ....	116
Şekil 6.15 Farklı rüzgar değerlerinde rüzgar türbininin enerji veriminin değişimi. ..	117
Şekil 6.16 Rüzgar hidrojen sisteminde değişken yıllık ortalama rüzgar hızları için hidrojen maliyetinin değişimi. ....	119
Şekil 6.17 Hücre geriliminin akım yoğunluğu ve sıcaklıkla değişiminin deneysel olarak belirlenmesi. ....	121
Şekil 6.18 Hidrojen üretim miktarının akım yoğunluğuna ve sıcaklıkla değişimi deneysel olarak incelenmesi. ....	122
Şekil 6.19 Enerji veriminin akım yoğunluğuna ve sıcaklığa bağlı değişimi. ....	123
Şekil 6.20 Matlab Simulink modeli ile hücre geriliminin ve hidrojen miktarının akım yoğunluğuyla değişimi (T=35°C). ....	123
Şekil 6.21 Enerji ve ekserji veriminin akım yoğunluğu ile değişiminin Matlab-Simulinkte belirlenmesi(T=35 °C). ....	124
Şekil 6.22 Ocak-Temmuz ayları arasında tesis'te ölçülen rüzgar hızı ve güneş radyasyonu. ....	125
Şekil 6.23 Nisan-Temmuz ayları arasında üretilen ve tüketilen enerji değerleri. ....	126
Şekil 6.24 Tesiste akü şarj durumu, toplam üretim ve yükün Nisan-Temmuz aylarında değişimi. ....	128
Şekil 6.25 Şarj kontrolü yapılmaksızın sistemden elde edilecek fazla enerji ile üretilebilecek hidrojen miktarı. ....	129
Şekil 6.26 İncelenen rüzgar–elektroliz enerji yolları. ....	129
Şekil 6.27 Rüzgar ile hidrojen eldesinin toplam enerji verimi. ....	130
Şekil 6.28 Rüzgar ile hidrojen eldesinin toplam ekserji verimi. ....	131
Şekil 6.29 Fotovoltaik hidrojen eldesinin enerji yolları. ....	131
Şekil 6.30 Fotovoltaik-elektrolizden hidrojen eldesinin enerji verimi. ....	132
Şekil 6.31 Fotovoltaik-elektrolizden hidrojen eldesinin toplam ekserji verimi. ....	133
Şekil 6.32 Hibrid sistem için tüm enerji yollarının detaylı olarak incelenmesi. ....	133

## ÖNSÖZ

Uzun, yorucu ve emek isteyen doktora çalışmam esnasında ve özellikle de deneysel aşamasında yardımlarını, zamanlarını aldığım ve adını burada yazmayı unuttuğum tüm arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Beraber çalışma fırsatını yakaladığım danışmanım sayın Doç. Dr. Zuhâl OKTAY doktora çalışmam esnasında desteklerini ve yardımlarını benden esirgemeyerek her aşamada bana destek olmuştur. İniş ve çıkışları olan bu süreçte beni çalışmaya motive ederek ve çok değerli bilim insanlarıyla tanışmama vesile olan danışmanıma teşekkür ederim. Ayrıca tez sürecimin her aşamasında yoğunluğuna rağmen bana zaman ayırıp yol gösteren ve desteğini esirgemeyen eş danışmanım Prof. Dr. İbrahim Dinçer'e teşekkür ederim.

Deneysel çalışmamın gerçekleşmesinde maddi destek sağlayan GEF-SGP, Balıkesir Üniversitesi araştırma fonuna, yurtdışından ekipman getirmeme imkan sağlayan KAREN mühendisliğe ve arkadaşlarım Hakan Karadoğan ile Arş. Gör. Can Coşkun'a teşekkür ederim.

Çalışmam süresince yokluğumu olgunlukla karşılayan ve bana destek olan başta eşim Gözde AKYÜZ'e, varlıklarıyla bana güç veren güzel kızlarım İpek, Deniz'e ve tüm aileme desteklerinden ötürü teşekkürü bir borç bilirim.

Ersin AKYÜZ

Balıkesir, 2010

## 1. GİRİŞ

Enerji insanoğlunun temel girdilerinin karşılanmasında, ülkelerin ekonomik ve sosyal kalkınmasında en önemli gereksinimlerin başında gelmektedir. Ayrıca enerji, ülkelerin ve toplumların küresel anlamda rekabet sağlamalarında ve rekabetçi piyasa koşullarında varlıklarını sürdürebilmeleri için oldukça önemlidir. Enerji bu yönleriyle, toplum ve doğa arasındaki etkileşimde vazgeçilemez bir unsurdur.

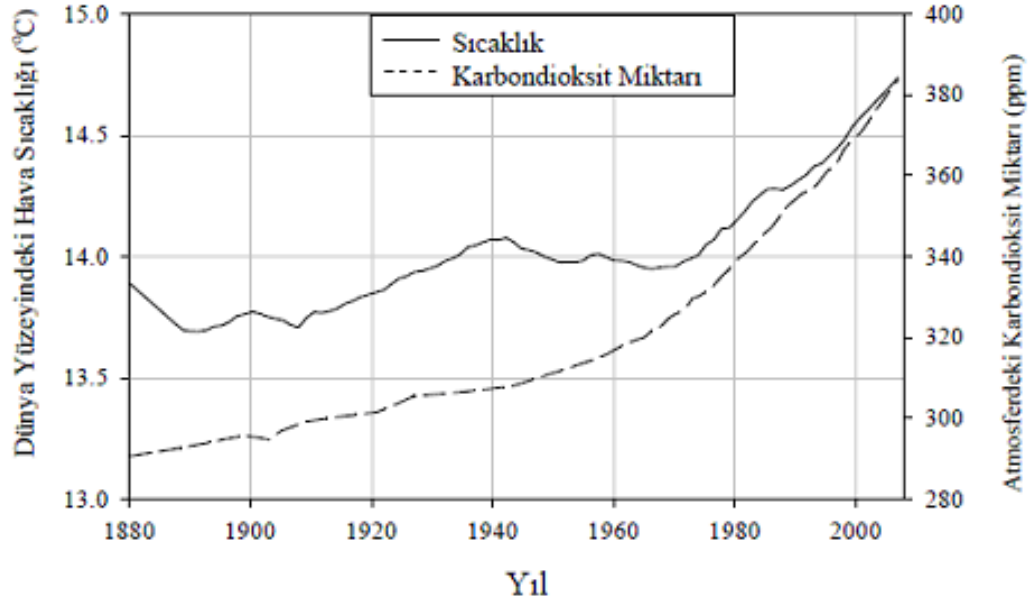
Dünya nüfusu ve endüstriyel gelişmelere paralel olarak enerji gereksinimi giderek artmakta ve buna karşın fosil enerji kaynaklarının rezervleri hızla tükenmektedir. Günümüzde enerji üretiminde kömür, petrol, doğalgaz gibi fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Enerji üretiminde fosil kaynaklı yakıtlar kullanıldığı düşünüldüğünde ve Tablo1.1'de fosil yakıtların rezerv ömürleri incelendiğinde yakın gelecekte fosil yakıtların tükenme riskiyle karşı karşıya olduğu görülmektedir. Önümüzdeki 50 yıl içerisinde fosil yakıtların yerini alacak güvenilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır.

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

Tablo 1.1 Fosil Kaynakların ortalama ömrü büyük rezerv sahibi ülkeler [1].

Kaynaklar	İspatlanmış rezerv	Yıllık Üretim	Rezerv Ömrü (Yıl)	Rezerv Sahibi Ülke	Ülkeler İçindeki Pay (%)
Petrol (Milyar Ton)	164.50	3.914	42	Suudi Arabistan	22
Doğal Gaz (Trilyon Ton)	181.46	2865	63	Rusya	26.3
Kömür (Milyar Ton)	909.06	6.195	147	Amerika Birleşik Devletleri	27.1

Küresel ısınmaya neden olan gazların başında karbondioksit gazı gelmektedir. 1973 yılında atmosfere bırakılan karbondioksit miktarı 15.66 milyar ton iken, 2006 yılı başında bu rakam 27.13 milyar tona yükselmiştir. Şekil 1.1’de görüldüğü gibi 1980–2007 yıl aralığında karbondioksit gazı salınımı çok hızlı oranda artmaktadır ve buna bağlı olarak yeryüzü sıcaklığı da artmaktadır. Yeryüzü sıcaklığı bu gazlar sebebiyle her 10 yılda 0.3 °C artmaktadır [2]. Atmosferdeki CO<sub>2</sub> miktarının artmasında doğal süreçlerin etkisinin yanı sıra, bu miktarın yarısının insan kaynaklı (toprak kullanımı, ormanların tahribi, enerji üretimi ve tüketimi vs.) olduğu tahmin edilmektedir. İnsan kaynaklı CO<sub>2</sub> emisyonunun yaklaşık % 40’lık kısmı fosil kaynaklı yakıtların yanması sonucu oluşturmaktadır. Elektrik üretimi ile atmosfere 7.7 milyar ton CO<sub>2</sub> salınır ve toplam fosil kaynaklı CO<sub>2</sub> emisyonu içindeki payı % 35 civarındadır. Bu anlamda fosil yakıtlarıyla enerji üretiminin çevreye verdiği olumsuz etkileri olmayan enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulduğu açıktır. Bu kapsamda ekonominin tüm sektörlerinde enerjinin etkin kullanımının artırılması ile temiz ve sürdürülebilir enerji olarak ve teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir [3].



Şekil 1.1 Yeryüzündeki hava sıcaklığının ve atmosferdeki karbondioksit miktarının 1880–2007 yılları arasında değişimi [4].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretiminde kullanımının önemini kısaca aşağıdaki gibi maddeler halinde özetleyebiliriz:

- Fosil yakıtların çevre üzerindeki olumsuz etkileri ve küresel ısınma olgusu,
- Birincil enerji kaynaklarına ait rezervlerin kısıtlı olması ve buna bağlı fiyat dengesizlikleri yaşanması,
- Nüfus artışı,
- Endüstrileşme,
- 21. yüzyılda sürdürülebilir kalkınma ve artan çevre anlayışı,
- Ülkelerin enerji sorununda dışa bağımlılıklarını azaltma ihtiyacı ve arz güvenliği.



## 1.1 Enerji ve Çevre

Yanma reaksiyonu ile ortaya çıkan fosil yakıt emisyonları, birincil ve ikincil kirleticiler diye ayrılmaktadır. Birincil kirleticiler  $CO_x$ ,  $NO_x$ ,  $SO_x$ ,  $PbO_x$ , PM ve hidrokarbonlar iken, yanma dışı reaksiyonlar ve güneşin Uv ışınları ile ikincil kirleticilere dönüşmektedirler. Sera etkisi oluşturan gazların başında karbondioksit gazı gelir ve bu etki küresel karakterdedir. Bazı kirletici gazların etkileri ise kükürtdioksit emisyonunun neden olduğu asit yağmurları gibi yerel karakterlidir [5].

Enerji tüketimine paralel biçimde dünya küresel sıcaklığındaki artış, iki ayrı nedene dayanmaktadır. Birinci neden, enerji tüketiminin direkt etkisidir. İkinci neden, enerji tüketiminin fosil hidrokarbon türü yakıtlara dayalı olması ve fosil yakıt yanma ürünü  $CO_2$  gazının atmosferdeki konsantrasyonunun, şimdilik normale göre 1.3 kat artmasından kaynaklanan sera etkisidir. İnsanlığın önündeki en büyük çevre sorunu, atmosferdeki sera gazı  $CO_2$ 'in ısı tuzağı oluşturmamasından ve artan konsantrasyonu ile etkisinin giderek artmasından kaynaklanmaktadır.  $CO_2$  dışında, yüksek yanma sıcaklıklarında ortaya çıkan  $NO_x$  emisyonları ve ozon da sera gazıdır. Ancak, atmosferdeki konsantrasyonları az olduğundan, etkileri  $CO_2$  kadar fazla değildir.  $NO_x$ 'in % 3'ü, ozonu oluşturan gazların da % 14'ü enerji aktivitelerinden kaynaklanmaktadır [5].

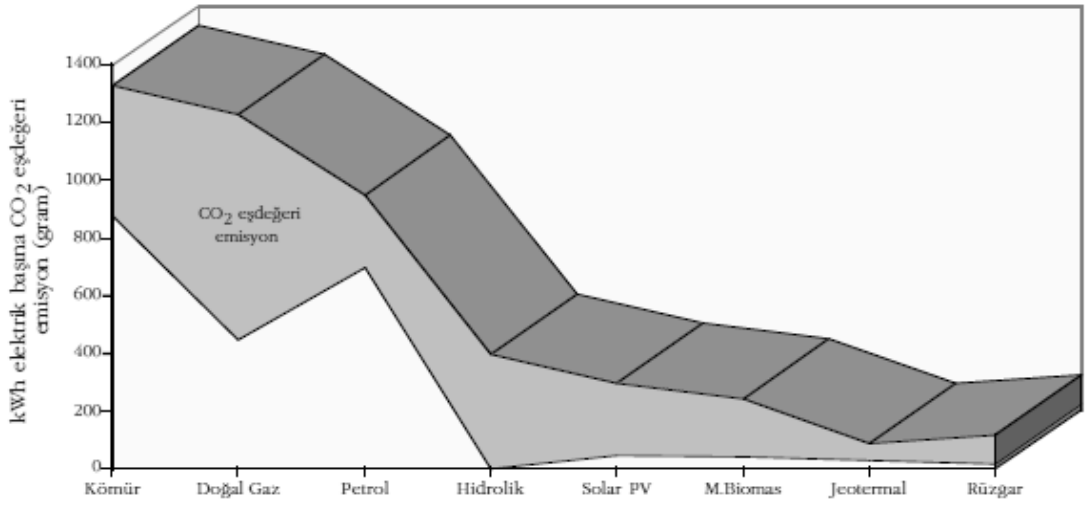
Yirminci yüzyılın başlarında, daha yoğun olarak İkinci Dünya savaşı sonrası geçirilerek kazanan "Sürekli Kalkınma" anlayışı, çevrenin hızla ve amansızca tüketilmesi gerçeği karşısında, bugün yerini, çevre duyarlılığına bırakmıştır. Geline nokta gereklilik ulusal gerek uluslararası otoritelerin olumlu ve katkı sağlayıcı yaklaşımları neticesinde sürdürülebilir kalkınma noktasında işbirliklerine gitmeleri zorunlu hal almıştır.

1980'li yılların ardından "Sürdürülebilir Büyüme" ilkesi çevre politikasının merkezine yerleşmiştir.

Sanayi devriminin başlangıcından beri giderek artan ve aşırı boyutlara ulaşan, tükenme pahasına sürdürülen fosil yakıt kullanımı, enerji-çevre sorunlarının oluşmasının en önemli nedenidir. Sürdürülebilir büyüme ve kalkınma için en önemli unsur sürdürülebilir çevre olarak görülmektedir. Sürdürülebilir enerji, sürdürülebilir çevre ve ekonomi ile birlikte sürdürülebilir kalkınmanın önemli unsuru olarak belirlenmektedir. Sürdürülebilir enerji yaklaşımı, enerjinin en az finansmanla, en az çevresel ve sosyal maliyetle ve sürekli olarak teminine olanak sağlayan politika, teknoloji ve uygulamaları kapsamaktadır. Sürdürülebilir enerji kavramı üç ana ilkeyle düşünülmelidir:

- Enerjinin etkin, verimli kullanımı ve enerji tasarrufu
- Enerji üretimi ve kullanımının çevrede meydana getirdiği olumsuz etkilerin ve kirlenmenin en aza indirilmesi için çevre dostu enerji stratejilerinin geliştirilmesi.
- Yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının artırılması ve bu alandaki teknoloji yeteneğinin yükseltilmesi.

Bu noktada, Şekil 1.2 incelendiğinde yakıtın çıkarılması, taşınması, işlenmesi ve kullanılmasını kapsayan elektrik üretimi zincirinde ortaya çıkan karbondioksit miktarı, yenilenebilir enerji kaynaklarında oldukça düşük gerçekleşirken, fosil kaynaklardan enerji elde edilmesi durumunda bu değerler oldukça yüksek seyretmektedir.



Şekil 1.2 Elektrik üretiminde yakıtların kWh başına CO<sub>2</sub> emisyonları [6].

## 1.2 Dünyada ve Türkiye’de Enerji Görünümü

Son yıllarda, araştırmacıların ve politikaların merkezinde enerji gelmektedir. Genel enerji dengesi içinde dünyada ve ülkemizde kullanılan birincil enerji kaynaklarında kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar ağırlıklarını korumaktadırlar. Tüketilen birincil enerji kaynaklarının dağılımına bakıldığında bu durum Tablo 1.2’ de açık şekilde görülmektedir.

Dünyadaki genel enerji ve nüfus durumuna bakıldığında, 1900 yılında nüfusu 1.6 milyar, birincil enerji tüketimi yaklaşık 1000 Mtep olan dünya’nın, 2000 yılında nüfusu yaklaşık 6.6 milyara ve birincil enerji tüketimi ise 8534 Mtep düzeyine ulaşmıştır. Buna göre 100 yıllık süreçte dünya nüfusunun yaklaşık 4.1 katı, birincil enerji tüketiminin ise 8.5 katına arttığı görülmektedir. 2003 yılı itibariyle, dünyada kişi başına düşen elektrik enerjisi tüketimi incelendiğinde, 16.968 kWh/kişi ile Kanada ilk sırada yer almaktadır. Kalkınmanın göstergesi olarak tanımlanan kişi başına düşen elektrik enerjisi tüketiminde, 2000 yılı itibariyle dünya ortalamasının 2.343 kWh/kişi olduğu görülmektedir. Buna karşılık ülkemizde kişi başına düşen elektrik enerjisi üretimi 1.564 kW/kişi değeriyle dünya ortalamasının oldukça altındadır [7].

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

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

Fosil yakıtların rezerv sorunu, arz güvenliği ve çevresel etkiler sebebiyle yenilenebilir enerji konusunda en ciddi yatırımlar Avrupa Birliğinde yapılmaktadır ve 2009 yılında yıllık rüzgar güç kapasitesinin 10163 MW artarak 74767 MW olduğu görülmektedir. Bu oran bir önceki yıla göre % 23 artışa karşılık gelmektedir. Ayrıca yine 2009 yılı boyunca yenilenebilir enerji güç kapasitesindeki artış 26363 MW büyüklüğünde gerçekleşmiştir. Bu dönemde AB ülkeleri kömür doğal gaz ve nükleer enerji seçeneklerinden uzaklaşmıştır. İspanya, Almanya ve İtalya’nın bu dönemde en fazla rüzgar güç kapasitesini artırdığı görülmüştür. Yenilenebilir enerjinin bu dönemde toplam yeni güç kapasitesi 26363 MW ‘a ulaşmıştır. Bunun 10163 MW (% 39) rüzgar, 6630 MW (% 25) doğal gaz, 4600 MW (% 17) fotovoltaik, 581 MW (% 2.2) biomas olmuştur [8].

Türkiye’nin 1990–2008 yılları arası nüfus artışı hızı % 1.6 oranında iken üretilen enerjideki artış miktarı % 7 oranında olup 198.6 milyar kWh değerine ulaşmıştır. 2007 yılında yenilenebilir enerji kaynakları üretim ve tüketimi, 36 milyar kWh ve toplam birincil enerji kaynakları arzının da % 23’ü olarak gerçekleşmiştir [9]. Yenilenebilir enerji kaynakları üretimi, toplam kömür üretiminden sonra ikinci en yüksek üretime sahip kaynaklardır. Yenilenebilir enerji kaynakları arzının yaklaşık üçte ikisini biomas (odun, hayvan ve bitki artıkları) oluşturmaktadır. Geri kalan üçte birlik kısmında ise hidrolik enerji yer almaktadır. Türkiye’de bugün yenilenebilir kaynaklardan en çok hidrolik enerji ve klasik biomas enerji kullanılmaktadır. Türkiye’nin brüt hidrolik potansiyeli 430 milyar kWh/yıl, teknik potansiyeli 215 milyar kWh/yıl

ve kullanılabilir hidrolik potansiyeli de 125 kWh/yıl olarak verilmektedir. 2007 yılı yıllık ortalama enerji üretimi 35.85 milyar kWh'dir. TEAŞ tarafından hazırlanan "Enerji Üretim Planlaması" çalışmalarına göre, ülkemizdeki kurulu güç kapasitesinin, 2010 yılında 60000 MW'a, 2020 yılında ise 104000 MW'a çıkartılması öngörülmüştür [10].

Ülkemiz coğrafi konumu açısından güneş kuşağı içerisinde bir ülke olarak tanımlanmaktadır. Yıllık ortalama güneş alma süresi 2609 saat olup, yılın yaklaşık % 30'unu güneş olarak geçirmektedir. Türkiye'de şimdilik kurulu 3 milyon m<sup>2</sup> güneşli su ısıtıcı kolektörlerle kullanılan güneş enerjisi 120 Btep/yıl düzeyinde olup, ekonomik potansiyelin % 0.5'ine karşılıktır. Kurulu kolektör alanı ile en az 500 MW'lık ısıtma güce karşılıktır. Ortalama güneş enerjisi yoğunluğu günlük metrekare başına 3.6 kWh'dir. Türkiye'nin güney ve batı bölgelerinde güneş kolektörleri su ısıtmak amacıyla yaygın olarak kullanılmakta ve gün geçtikçe de artmaktadır [11].

Rüzgar enerjisi sırasıyla; Marmara, Ege, Akdeniz ve Karadeniz kıyı alanlarında bulunmaktadır. Ayrıca Güneydoğu Anadolu, İç Anadolu'nun belli kesimlerinde rüzgar açısından zengin yönlerin var olduğu bilinmektedir. Türkiye'nin ekonomik rüzgar potansiyelinin 50 milyar kWh/yıl olduğu tahmin edilmektedir. Bu potansiyelin değerlendirilmesi için gereken kurulu rüzgar gücü ise 20000 MW'dır. Otoprodüktör kapsamında, Çeşme'de kurulan 580 kW'lık üç türbinden oluşan ilk rüzgar santrali, 1988'de işletmeye açılmıştır. Daha sonra Çeşme-Alaçatı'da bir özel kuruluş tarafından kurulan 1.8 MW kurulu gücündeki santral 1988'de üretime başlamıştır. Tablo 1.3'te Türkiye'de 2010 yılı itibarıyla kurulu güç kapasitesi detaylı olarak verilmiştir. Buna göre toplam güç kapasitesi 1030 MW'a ulaşmış olup, bu değer ekonomik potansiyelin % 2.5'nin kullanılabildiğini göstermektedir [12].

Küresel elektrik enerjisi üretim miktarı 2006 yılında 18 921 TWh, 2015 yılında 24 975 TWh, 2030 yılında 33 265 TWh olması beklenmektedir. Kömür fosil yakıtlar içinde en büyük rezerve sahip kaynak olarak toplam üretimdeki payını % 41'den % 44 değerine artarak elektrik enerji üretiminde

ana yakıt kaynağı olarak yer almaktadır. Petrol ise yüksek maliyetler ve kısıtlı rezervler nedeniyle % 2 oranında payını düşürmüştür. Nükleer enerji ise hükümetlerin bu konudaki tavrının değişmediği düşünülerek 2006'da % 15'i 2015'te % 13 ve 2030'da % 10 oranında azalacaktır [13].

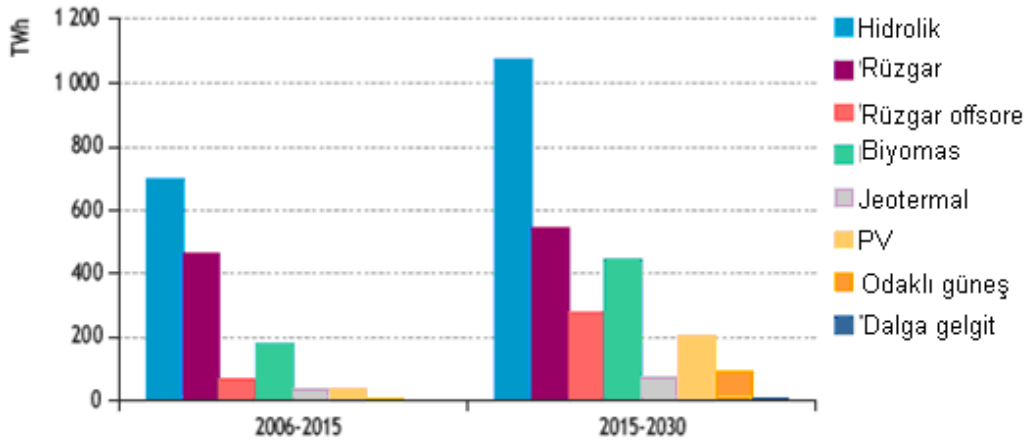
Tablo 1.3 Türkiye'de işletmede olan rüzgar enerji santralleri [12].

Rüzgar Santrali Yeri	İşleten Firma	Kurulu Güç (MW)	Yıl
İzmir-Çeşme	Alize Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	1.50	1998
İzmir-Çeşme	Ares Alaçatı Rüzgar Enerjisi	7.20	1998
İstanbul-Hadımköy	Sunjüt Sun'i Jüt San. ve Tic. A.Ş.	1.20	2003
Balıkesir-Bandırma	Yapısan Elektrik Üretim A.Ş.	30.00	2006
İzmir-Çeşme	Mare Manastır Rüzgar Enerjisi	39.20	2006
İstanbul-Silivri	Teperes Elektrik Üretim A.Ş.	0.85	2007
Çanakkale-İntepe	Anemon Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	30.40	2007
Manisa-Akhisar	Deniz Elektrik Üretim Ltd. Şti.	10.80	2007
Çanakkale-Gelibolu	Doğal Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	14.90	2007
Manisa-Sayalar	Doğal Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	34.20	2008
İstanbul-Çatalca	Ertürk Elektrik Üretim A.Ş.	60.00	2008
İzmir-İliç	Innores Elektrik Üretim A.Ş.	57.50	2008
İstanbul	Lodos Elektrik Üretim A.Ş.	24.00	2008
Muğla-Datça	Dare Datça Rüzgar Enerji Santrali	29.60	2008
Hatay-Samandağ	Deniz Elektrik Üretim Ltd. Şti.	30.00	2008
Aydın-Didim	Ayen Enerji A.Ş.	31.50	2009
Balıkesir-Şamlı	Baki Elektrik Üretim Ltd. Şti.	90.00	2009
Hatay-Belen	Belen Elektrik Üretim A.Ş.	30.00	2009
Tekirdağ-Şarköy	Alize Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	28.80	2009
İzmir-Urla	Kores Kocadağ Rüzgar Enerji	15.00	2009
Çanakkale-Ezine	Alize Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	20.80	2009
Balıkesir-Susurluk	Alize Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	20.70	2009
İzmir-Bergama	Ütopya Elektrik Üretim Sanayi A.Ş.	15.00	2009
İzmir-Çeşme	Mazı-3 Rüzgar Enerjisi Santrali	30.00	2009
Balıkesir-Bandırma	Akenerji Elektrik Üretim A.Ş.	15.00	2009
Balıkesir-Bandırma	Borascos Enerji ve Kimya Sanayi A.Ş.	45.00	2009
Osmaniye-Bahçe	Rotor Elektrik Üretim A.Ş.	95.00	2010
Manisa-Soma	Soma Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	49.50	2010
Balıkesir-Bandırma	As Makinsan Temiz Enerji Elektrik	24.00	2010
Mersin-Mut	Akdeniz Elektrik Üretim A.Ş.	33.00	2010
Bozcaada	Bores Bozcaada Rüzgar Sant. A.Ş.	10.20	2000
İzmir-İliç	Bergama RES Enerji Üretim A.Ş.	90.00	2010
Edirne-Enez	Boreas Enerji Üretim A.Ş.	15.00	2010

Şekil 1.3 incelendiğinde yenilenebilir enerji seçenekleri için hidroelektrikten sonra en hızlı büyüyen enerji kaynağı rüzgar enerjisidir.

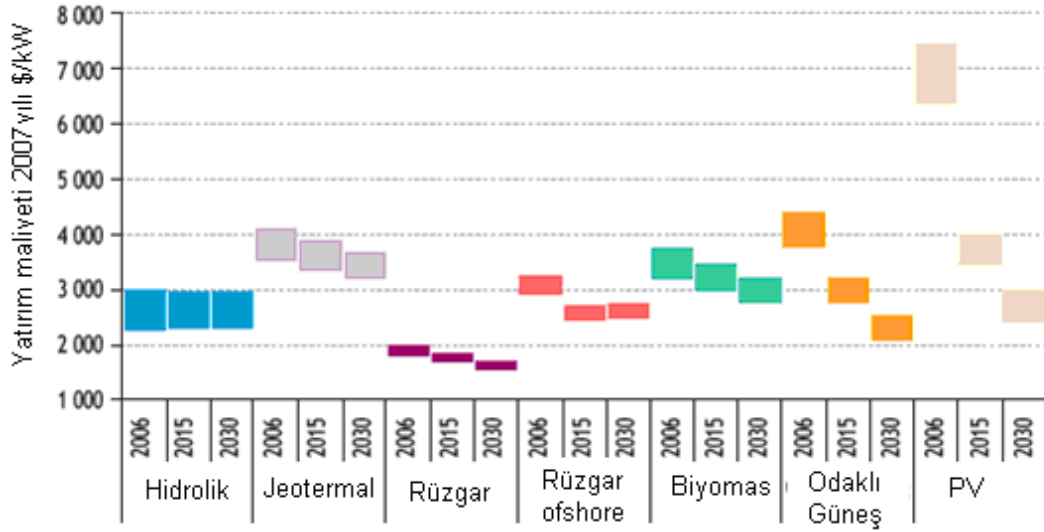
Özellikle Avrupa birliğinde 2030 yılında enerji üretiminin % 14'üne tekabül edeceği hesaplanmaktadır. 2006 ve 2030 yılları arasında AB ülkelerinde rüzgardan elektrik üretimindeki artış % 60'a tekabül etmektedir [13].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasının artması önündeki en önemli engel ilk yatırım maliyetlerinin konvansiyonel sistemlere göre yüksek oluşudur. İlk yatırım maliyetlerinin düşmesi teknolojik gelişme ile ilişkilidir. Teknolojik araştırma ve geliştirme çalışmalarının başarısı, ilk yatırım maliyetlerini etkileyecektir.



Şekil 1.3 Dünya elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında yaşanan artış [13].

2006–2015–2030 yılları arasındaki periyotta farklı yenilenebilir enerji kaynaklarının 1 kW için ilk yatırım maliyetlerinin değişimi değerlendirilmiştir. Şekil 1.4 incelendiğinde, jeotermal enerji gibi daha eski teknolojiye sahip sistemler için küçük bir azalma beklenirken, hidrolik enerji sistemlerinin maliyeti neredeyse değişmemiştir. Bu dönem için en hızlı düşüş fotovoltaik sistemlerdeki. Ayrıca deniz üzerinde kurulan rüzgar türbinlerinde (offshore) yaşanacak azalmanın da diğerine oranla daha fazla olacağı beklenmektedir.



Şekil 1.4 Yenilenebilir kaynaklarından elde edilen enerjinin bir kilovattı için gereken yatırım maliyeti [13].

### 1.3 Küresel Isınma Sorunu ve Uluslararası Alanda Çözümler

Bugün yaşadığımız süreçte karşılaştığımız felaket düzeyindeki olaylar, kuraklık, sel baskınları gibi afetler küresel ısınmaya bağlanmaktadır ve ister gelişmiş olsun ister gelişmekte olsun bütün ülkelerin acil önlemler alması gerekmektedir. 1992 yılında somut politikalar geliştirilmesi amacıyla, Brezilya'nın Rio kentinde düzenlenen Çevre ve Kalkınma Konferansı'nda İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi imzalanmıştır. Sözleşme, 154 ülkenin devlet başkanları ve üst düzey temsilcileri tarafından imzalanarak 1994'te yürürlüğe girmiştir. Sözleşmenin Yükümlülükler kısmında yer alan 2. maddesi ise, imza sahibi ülkelere, 2000 yılı başında sera gazı salınımlarını 1990 yılı seviyelerine indirilmesi yükümlülüğünü getirmiştir. Ancak bu metnin taraflar açısından bağlayıcı bir özelliği olmayışı sebebiyle 1997 yılında, Taraflar Konferansı Kyoto'da yapılmış ve "Kyoto Protokolü" olarak bilinen metnin 3. maddesi de imza sahibi ülkelere, 2008–2012 döneminde sera gazı salınımlarını 1990 yılındaki değerlerinin en az % 5 altına çekmeleri yükümlülüğü getirilmiştir. Bunun amacı; atmosferdeki sera gazı birikimlerini, iklim sistemi üzerindeki tehlikeli insan kaynaklı etkiyi önleyecek bir seviyede tutmaktır [14].



İklim değişikliği çerçevec sözleşmesi (İDÇS) ile başlayan ve Kyoto protokolü ile devam eden süreçte ortaya konan enerjinin sağlanması alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesi, çevre dostu yakıtların ve yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji ihtiyacının karşılanmasındaki payının artması beklenmektedir [15].

Dünyada hidrojen üretim, depolama ve iletim teknolojileri, güvenlik ve çevresel etkiler, özellikle bir "enerji taşıyıcı ortam" olarak hidrojenin rolü, birçok farklı sektörde incelenmektedir. Birçok gelişmiş ülkede kabul gören hidrojen ekonomisine geçiş doğrultusunda, hidrojenle ilgili teknoloji alanları için ulusal planlar, yol haritası oluşturabilmek için projeler ve ulusal programlar hazırlanmakta, ilgili teknolojilerin geliştirilmesi ve uyarlanması için geniş kapsamlı yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Sürdürülebilir hidrojen ekonomisinin dikkat çeken unsurlardan biri hidrojenin kaynağı olacaktır. Hidrojen retiminde çevre ve enerji arz güvenliği konuları açısından en uygun seçenek, yenilenebilir kaynaklardan hidrojen üretimidir.

#### **1.4 Tezin nemi**

Yapılan tez çalışmasıyla, hidrojen üretiminin yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar ve güneş enerjisi ile eldesi amaçlanmıştır. Hidrojen karbon içermeyen bir yakıt olduğundan, fosil yakıtların neden olduğu türden bir kirliliğe yol amayacaktır. retiminde yenilenebilir kaynakların kullanılması durumunda, bu kaynakların doğasında bulunan kesintili olma sorununa da çözüm getirmektedir. 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.

Çalışmayı deneysel olarak gerçekleştirmek üzere, güneş ve rüzgar enerjilerinin bir araya getirildiği hibrid sistem, Balıkesir Bigadiç'te kurulmuştur. Proton geçişli zarlı (PEM) elektroliz nitesi, hidrojen elde edebilmesi için

kullanılmıştır. Sistemin kurulduğu çiftlik, türü yok olmakta olan kınalı keklik üretimi yapmakta, kuluçka makinelerinin yanı sıra yaşam üniteleri ve aydınlatma ihtiyacı gibi yükler de mevcuttur.

Tez çalışmasının ilk aşamasında, tesisin yük ihtiyacı belirlenerek, sisteme uygun enerji ihtiyacı sağlayacak hibrid enerji sisteminin boyutlandırılması yapılmıştır. Bu yapılırken bölgenin rüzgar ve güneş enerji verileri kullanılmış ve ayrıca yükün durumu da dikkate alınmıştır. Boyut optimizasyonunda HOMER yazılımından yararlanılmıştır. Boyutlandırma neticesinde sistem elemanları 10 kW rüzgar, 1 kWp güneş enerjisi ve 5 kW evirici, 48 kWh akü olarak belirlenmiştir. Sistem kurulumu gerçekleştirilerek sistemin doğru konumlanarak verimli olarak birlikte çalışabilmesi sağlanmıştır. Bu noktada sistemin elektriksel ölçümlerinin haricinde meteorolojik ölçümler yapılarak kayıt edilmiştir.

150 ml/dk hidrojen üreten PEM elektroliz cihazı, değişken çalışma koşullarında incelenmiştir. PEM elektroliz cihazının deneysel olarak değerlendirilmesinde akım, gerilim ve sıcaklık gibi fiziksel büyüklükleri kayıt altına alacak veri kayıt edici tasarlanmıştır. Tez çalışmasında ayrıca sistem modellemesinde enerji ve ekserji hesaplamalarında MATLAB-Simulink programı kullanılmıştır. Rüzgar ve güneş enerjisinin birlikte kullanımı ile oluşturulan hibrid sistemlere dair yurtdışında uygulama örnekleri bulunmaktadır. Ancak ülkemizde ise sadece farklı kaynaklar üzerine model ve uygulama çalışmaları bulunmaktadır. Bu çalışma, *hibrid* olarak gerçekleştirilen ve enerji, ekserji analizlerini içeren ilk çalışma olarak önem taşımaktadır.

## 1.5 Tezin Motivasyon ve Amaçları

Dünya nüfusunun özellikle kırsal alanda yaşayan nüfusun % 30'unun elektriksiz yaşadığı düşünüldüğünde şebeke bağımsız 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 gibi çeşitli cihazların elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanmasında kesintisiz güç üretebileceği belirlenmiştir.

Termodinamiğin ikinci yasasına ve yaşam döngüsü maliyet analizine dayalı bu tür bir analizin literatürde eksikliği hissedilmektedir. Bu tez çalışmasının amaçları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Bir rüzgar-güneş hibrid enerji sisteminin kurularak enerji ve hidrojen üreten sistemin kurulması
- Kurulacak bu sistemin şebeken bağımsız çalışacak çiftlikler ve konutlar için elektrik ihtiyacının karşılanması,
- Hibrid enerji sisteminin kurulmasında optimizasyon yolu ile kullanılacak elemanların boyutlandırılması
- Sistemin elektrik ihtiyacının belirlenmesi
- Sistem bileşenlerinin karakteristiklerinin bulunması ve farklı parametrelerin etkilerinin incelenmesi,
- Güneş panellerinin enerji ve ekserji verimlerinin belirlenmesi,
- Rüzgar türbini sisteminin enerji ve ekserji verimlerinin bulunması,
- Hidrojen üretim sisteminin enerji ve ekserji veriminin hesaplanması,
- Hibrid sistem için enerji ve ekserji verimlerinin belirlenmesi,
- Hidrojen eldesi için yaşam döngüsü maliyet analizi ile ekonomikliğin belirlenmesidir.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Hibrid enerji sistemleri, genel olarak iki ya da daha fazla farklı enerji üretim sisteminin bir arada çalışarak, elektrik ya da termal yükü beslediği sistemlerdir. Mobil yapılarının yanı sıra birlikte daha uzun ömürlü ve güvenilir olarak kullanılmaktadırlar [16]. Şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız olarak çalışabilen hibrid yenilenebilir enerji sistemleri mevcuttur. Şebekeden bağımsız olarak çalışan sistemler enerji iletim hatlarına uzak ve kırsal bölgelerde enerji elde edilebilmesi için dizel jeneratörlerle birlikte kullanılmaktadır. Dizel jeneratörler hibrid sistemlerin ilk yatırım maliyet avantajı sebebiyle en yoğun tercih edilen parçasını oluşturmaktadır. Özellikle uzak ve ulaşım güçlüğü yaşanan bölgelerde ulaşım maliyeti ve yakıt fiyatı artışı sebebiyle fiyat avantajını yitirmektedir [17,18]. Önümüzdeki yıllarda, dizel jeneratörlerin, yakıt fiyatlarındaki yükselişe bağlı olarak işletme ve bakım maliyetlerindeki artışın yanı sıra çevre açısından artan hassasiyetler sebebiyle de kullanımı azalacaktır. Artan çevre bilinci, küresel ısınma ve fosil yakıtlarının hızlı bir şekilde tükenmesi yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi arttıracaktır. Bu doğrultuda ilk yatırım maliyeti açısından pahalı olan bu sistemlerin kullanımı daha da yaygınlaşması beklenmektedir. Pahalı olmaları sebebiyle bu sistemlerin daha etkin ve verimli kullanılabilmesi için yatırım esnasında seçilecek sistemlerin tüm elemanlarını doğru bir biçimde boyutlandırılması oldukça önemlidir. Boyutlandırma alanında yapılan çalışmalar aşağıda incelenmiştir.

### 2.1 Hibrid Yenilenebilir Enerji Sistemlerinin Boyutlandırılması ve Enerji Maliyetiyle İlgili Çalışmalar

Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar ve güneş enerjisini birlikte kullanarak çalışan hibrid sistemler oldukça yaygın olarak araştırılmaktadır.

Hibrid yenilenebilir enerji sistemlerinin performansı rüzgar hızı, güneş radyasyonu, ortam sıcaklığı gibi giriş parametreleriyle ve coğrafi konum ile bölgeden bölgeye değişmektedir. Şebekeden bağımsız çalışan sistemlerin beslediği yükün enerjisiz kalmadan çalışabilmesi için sistem elemanlarının doğru biçimde boyutlandırılması gerekmektedir. Boyut optimizasyonu coğrafi konuma, kaynaklara ve yük ihtiyacına bağlı olarak değişmektedir [18,19]. Literatürde hibrid sistemlerin boyutlandırılması konusunda yapılmış çalışmalar şu şekilde özetlenebilir:

Markvart [20] yaptığı çalışmada, fotovoltaik-rüzgar hibrid enerji sistemi için doğrusal programlama kullanılarak, grafik optimizasyon modeli uygulamıştır. Sistemin yatırım maliyetini minimum yapan hedef fonksiyon için belirlenen kısıtlar, toplam aylık rüzgar ve güneş enerjisi üretiminin yükün aylık değerlerine eşit ya da büyük olmasıdır.

Browy ve Salameh [21] tarafından yapılan çalışmada, 30 yıllık rüzgar hızı ve güneş ışınım şiddeti verisini ve yükün enerjisiz kalma olasılığı kavramı ilk olarak kullanılarak rüzgar-güneş hibrid sistemleri için yeni bir boyutlandırma yöntemi geliştirmiştir.

Muselli ve arkadaşları [22], fotovoltaik-akü-dizel jeneratörden oluşan hibrid enerji sisteminin boyut optimizasyonu enerji yönetimi de dikkate alarak yapmıştır. Yükün enerjisiz kalmaması için jeneratör yedek ünite olarak kullanılmıştır. Ayrıca sistemde akü grubunun şarj % 70 ve deşarj % 30 değeri optimum değer olarak belirlenmiştir. Çalışmada yükün yaz ve kış olmak üzere mevsimsel olarak enerji verimleri dikkate alınmıştır.

Diaf ve arkadaşları [23] tarafından güneş panelleri, rüzgar türbinleri ve akülerin modellemelerini içeren boyutlandırma algoritması uygulanmıştır. Diaf ve arkadaşları tarafından önerilen bu çalışmada, sistem tarafından enerjinin karşılanamama olasılığı ve enerji maliyeti değerlerini minimum yapan ve her ikisini de dikkate alan yeni bir sistem boyutlandırma algoritmasını kullanmışlardır.

Chedid ve Saliba [24] lineer programlama ile yaptığı optimizasyon çalışmasında şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız çalışan yenilenebilir enerji sistemi için maliyet optimizasyonu, yükü besleme oranı ve çevresel etkileri de dikkate alan bir çalışma yapmışlardır.

Wies ve arkadaşları [25], farklı hibrid enerji sistemlerinin enerji maliyeti açısından değerlendirmesini yapmak için Matlab yazılımını kullanarak simülasyon modeli oluşturmuşlardır. Modellediği tüm sistemlerin performansını HOMER yazılımında karşılaştırarak, yaşam döngüsü enerji maliyeti ve çevresel etkileri değerlendirmiştir. Simülasyonda, 35 kW dizel jeneratör, 100 kWh akü, 12 kWp PV, 30 kVA evirici kullanılmıştır. Dizel, dizel-akü, fotovoltaik-dizel-akü sistemi birbiriyle enerji maliyeti, geri ödeme zamanı ve zararlı gaz salınım miktarı açısından karşılaştırılması yapılmıştır. Fotovoltaik-dizel-akü sistemi, akü kullanılarak enerjinin depolanması sebebiyle, 3 sistem içerisinde en avantajlı olarak belirlenmiştir.

Aydoğan ve arkadaşları [26], 1995–1998 yıllarına ait rüzgar ve güneş ışınımı verileri ile rüzgar ve güneşten elde edilebilecek enerji miktarlarını hesaplamışlardır. Diğer çalışmalardan farklı olarak, rüzgar türbininin taradığı alan ve güneş panel alanı cinsinden parametrik fonksiyon olarak elde edilmiştir.

Borowy ve Salameh [27] yaptıkları çalışmada, farklı olarak, saatlik meteorolojik veriler yerine aylık veriler kullanılarak optimizasyon çalışması yapılmıştır. Buna bağlı olarak sistemde kullanılması gereken akü sayısı, fotovoltaik boyutu, rüzgar türbininin kanat tarama alanları belirlenmiştir.

Senjyu ve arkadaşları [28], tarafından hibrid sistemlerin boyutlandırılması Japonya'da bulunan Okinawa bölgesindeki şebekeden uzak adalar için yapılmıştır, rüzgar türbini-güneş panelleri-dizel jeneratör sayılarının belirlenmesi için genetik algoritma kullanılmıştır. Çalışmada 50

kW tepe yük kullanıldığı durum için, kurulacak sistemin 600 kW rüzgar türbini, 3000 kWh akü ve 750 kVA evirici olacağı belirlenmiştir.

Ashok [29] tarafından gerçekleştirilen modelleme çalışmasında, Hindistan için modelleme yapılmış, hibrid enerji sistemleri için sayısal tabanlı bir model kullanılmıştır.

Başka bir çalışmada, Hindistan'da bir köyün yük talebi enerjiyi, minimum maliyetle karşılayabilecek sistem araştırılmıştır. Çalışma sonucunda modellemede kullanılacak elemanlar belirlenirken ekipmanlara ait özelliklerin çok önemli olduğu belirlenmiştir. Sonuçta kullanılacak sistem elemanlarının bölgeye uygun seçilmesinin ve sistem boyutlandırmasının doğru yapılmasının maliyet ve verim açısından oldukça önemli olacağı belirlenmiştir [30].

Kaldellis ve arkadaşları [31] tarafından yapılan çalışmada ise Yunanistan'da bulunan şebekeden uzak tüketiciler için güneş modüllerinin ve rüzgar türbinlerinin sistem boyutlandırılması yapılmıştır. Çalışmada, benzer sistemlere ilişkin akü gruplarının boşalma süreleri de dikkate alınarak saatlik enerji dengesi analizleri yapılmıştır.

Barton ve Infield [32], farklı yük durumu için enerji talebi mevcutken rüzgar türbininden ve güneş modüllerinden üretilen enerjiyle depolanan enerjiyi karşılaştıran yeni bir olasılıksal modelleme yöntemi geliştirilmişlerdir. Geliştirilen model 1 MW rüzgar gücü kapasitesine, 2 MW güneş gücüne, % 75 verimli bir enerji depolama ünitesine ve 0–3 MW arasında değişken bir yük talebine sahip bir sistem için yapılmıştır.

Parasad ve Natarajan [33] tarafından yapılan çalışmada rüzgar-güneş hibrid enerji sisteminin optimizasyonu için yine sayısal yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem ile gücün sağlanamama olasılığı, kullanılmayan enerjinin olasılığı, enerji maliyeti ve akü grupları dikkate alınmıştır. Ayrıca,

çalışmada geliştirilen yöntemle tespit edilen optimum çözüm Hindistan'da uygulanmıştır.

Yang ve arkadaşları [34] tarafından gerçekleştirilen çalışmada genetik algoritma kullanılarak şebekeden bağımsız olarak çalışan rüzgar-güneş enerji üretim sistemleri için yeni boyutlandırma algoritması geliştirilmiştir.

Kaviani ve arkadaşları [35] tarafından şebeke bağımsız rüzgar-fotovoltaik -yakıt pili hibrid enerji sisteminin yük ihtiyacını karşılayan sistem tasarlanarak 20 yıl ömür süresi için maliyeti minimum yapacak şekilde boyutlandırılmıştır. Sistem maliyeti; yatırım maliyeti, yerine koyma ve işletme ve bakım maliyetlerinden oluşmaktadır ve ayrıca farklı olarak yüksüz kalma durumundaki maliyet de hesaba katılmıştır. Optimizasyon probleminin çözümünde parçacık sürü optimizasyon (Particle Swarm) yöntemi kullanılmıştır.

Erken ve arkadaşları [36] İzmir'de mevcut GSM istasyonunu besleyen fotovoltaik-rüzgar-akü sistem için farklı bir optimizasyon modeli kullanmıştır. Tepki yüzeyi (Responce surface) modeli kullanılarak yapılan model deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır. Net bugünkü değer metodu kullanılarak maliyet fonksiyonu minimize edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca sistemin şebekeye uzaklığının maliyet açısından değerlendirilmesi ve karşılaştırılması yapılarak şebekeye 4 km mesafenin hibrid yenilenebilir enerji sistemi kurmak için başa baş uzaklık olduğu hesaplanmıştır.

Dufo-Lopez ve Bernal-Agustin [37], tek boyutlu klasik optimizasyon probleminden farklı olarak çok amaçlı optimizasyon ve genetik optimizasyonu şebeke bağımsız çalışan hibrid fotovoltaik-rüzgar-dizel-akü sistemi için kullanılmıştır. Klasik optimizasyon yaklaşımının ötesinde Pareto optimizasyon yöntemi ile birden fazla değişkeni dikkate alan yaklaşım kullanılmıştır. Bu noktada minimizasyon için maliyet, yükün enerjisiz olması ve CO<sub>2</sub> değerlerini minimum yapan tasarım kriterleri belirlenmiştir. Sistem optimize edilirken tüm elemanların matematiksel modelleri ve yaşam ömrü



dikkate alınmıştır. Maliyet hesaplamasında net bugünkü değer metodu kullanılmıştır.

Çelik [38] yaptığı çalışmada optimizasyon ve teknoekonomik analiz yapılarak yaşam döngüsü maliyeti değeri hesaplanmıştır. Ayrıca yük, güneş radyasyonu, rüzgar hızı değerleri aynı kalacak şekilde farklı konfigürasyonların maliyetleri için bir karşılaştırılma yapılmıştır.

Protogeropoulos ve arkadaşları [39] tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise, bu tür sistemlerin boyutlandırılmasında yıllık otonom çalışma süresi kavramı farklı bir tasarım parametresi olarak ele alınmıştır.

Boyutlandırma probleminin yanı sıra hibrid enerji sistemlerinin enerji maliyetleri ve ekonomikliği diğer önemli problemlerin başında yer almaktadır. Enerji maliyetlerinin, yaşam döngüsü maliyet analiziyle değerlendirildiği ve sistemin ekonomik ömür, enflasyon, amortisman ve yük tarafından tüketilen yenilenebilir enerjiyi içermesi sebebiyle ön plana çıkmaktadır. Farklı hibrid konfigürasyonlarının maliyet açısından karşılaştırıldığı çalışmalarda yakıt fiyatlarındaki artış ve yenilenebilir enerji teknolojilerinde azalan maliyetler ile proje ömrü içerisinde enerji maliyetleri açısından hızla rekabet edebilir konuma ulaşması beklenmektedir. Bu doğrultuda fotovoltaik sistemlerin watt başına maliyetlerinin 30 yıl öncesine göre 25 US\$ değerinden 4 US\$ değerine düşmüştür [40].

Ayrıca bu çalışmalar farklı coğrafi konumlarda bulunan ülkeler için enerji maliyetleri açısından uzun dönemli olarak yapılmıştır. Birim enerji maliyet hesaplamasında fotovoltaik (2 kWp) akü sistemi için, 1998 ve 2005 yılları için ayrı ayrı yapılan hesaplamada güneş radyasyonundaki değişimlere bağlı olarak birim enerji maliyetinin (\$/kW) sırasıyla, Ankara için 2.71-2.1 \$/kW, Atina için 2.6-2.11\$/kW, İsrail için 1.29-1.03 \$/kW, Paris içinse 5.6-4.52 \$/kW aralığında değişeceği hesaplanmıştır [41].

## 2.2 Hibrid Yenilenebilir Enerji Sisteminden Elektroliz Yolu ile Hidrojen Eldesi Araştırmaları

Agbossou ve arkadaşları [42] tarafından yapılan çalışmada, fotovoltaik-rüzgar türbininden elde edilen enerji yükü beslerken, fazla enerjinin hidrojen eldesi için elektroliz ünitesinde hidrojene dönüştürülerek depolaması sağlanmıştır. Yükü besleyecek enerji hibrid sistem tarafından sağlanamazsa, depolanan hidrojenin yakıt pili ile sistemi beslemesi planlanmıştır. 1 kW fotovoltaik, 10 kW rüzgar türbini, 3.5 kW PEM yakıt pili, 5 kW elektrolizör, 1 kW yük, 150 psig basınçta, 3.5 m<sup>3</sup> hacimde depolama tankı kullanılan sistemin deneysel olarak incelenmesi yapılarak sistem enerji performansları incelenmiştir. 3.5 kW PEM yakıt pili için kalıcı ve geçici durumlarda tepki süreleri belirlenmiştir. Yakıt pili için, optimum çalışma noktası 72–74 °C olarak belirlenmiş ve sıcaklık kontrollü ısı dönüştürücüsü önerilmiştir.

Deneysel çalışmaların dışında sistem performansının simülasyon ile hesaplandığı çalışmada, 500 W güce sahip rüzgar türbini, PEM yakıt pili, elektrolizörden oluşan hibrid enerji sisteminin performansı Matlab-Simulink programında incelemiştir. Tüm sistem şebekeden bağımsız lokal yükü beslerken geçici hal cevabı yük akımındaki değişim, rüzgar hızındaki değişime göre incelenmiştir. Sistemin kontrolü H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> akış oranları ile yakıt hücresinin çıkış gerilimini kontrol edecek PID kontrolörle sağlanmıştır [43].

Onar ve arkadaşları [44] çalışmalarında, Khan ve Iqbal'in çalışmasına ek olarak ultra kapasitör, rüzgar türbini yakıt hücresi hibrid sistemin simülasyonunu incelemişlerdir. Asenkron jeneratörü süren rüzgar türbini, PEM yakıt hücresi, ultra kapasitör, elektrolizör ve tüm elemanların matematik modelleri çıkartılarak Matlab Simulink ile modellenmiştir. Sistemin dinamik performansı farklı rüzgar hızları için incelenmiştir. Sistemde yeterli rüzgar olduğu durumda yükü rüzgar türbini besler ve eğer fazla miktarda güç mevcutsa kalan güç elektroliz ünitesinde hidrojene dönüştürölür. Rüzgarın

yetmediği durumda kalan güç yakıt pili tarafından sağlanır. Ultra kapasitör geçici dalgalanmalar ve maksimum güç ihtiyacı söz konusu olduğu durumlarda etkin bir şekilde kullanılmıştır. Sistem şebekeden bağımsız değişken yükler için tasarlanmıştır.

Khan ve Iqbal [45], simülasyonla yapılan rüzgar- elektroliz-yakıt pili sistemi, yükün beslenmesi için yakıt pili ve rüzgar türbini birlikte kullanılarak rüzgarın kararsızlığından dolayı oluşan sorunları gidermiştir. Ultra kapasitör ve güç kontrol birimleri ile elde edilecek A.A gerilimde dalgalanmaların önlenmesi amaçlanmıştır. PID kontrolör sistemin kontrolünde kullanılmıştır. Gerilimdeki dalgalanmalar belirlenen aralıkta olduğu için önerilen sistemde aküye ihtiyaç duyulmamıştır.

Thanaa ve arkadaşları [46], fotovoltaik panel, rüzgar türbini, yakıt hücresinden oluşan hibrid enerji üretim sistemini incelemişlerdir. Sistemde üç farklı enerji üretim sisteminin güç akışı kontrol edilerek, en iyi verim noktasında çalışması bulanık kontrolör ile denetlenerek sağlanmıştır. Bulanık kontrolör fotovoltaik panellerin maksimum güç noktasında çalışması ve rüzgardan elde edilecek gücü maksimum noktada çalıştırmak için kullanılmıştır. Sistemde 1 kWp fotovoltaik paneller ve 1 kW gücünde rüzgar türbini kullanılmıştır. Hidrojen eldesi için ise 1 kW PEM elektroliz ünitesi kullanılmıştır. Hibrid rüzgar, güneş enerjili hidrojen depolayan sistemin performansı ile ilgili deneysel çalışmada fotovoltaik-rüzgar hibrid sistemine entegre edilmiş PEM elektroliz ünitesinden hidrojen üretilmesi incelenmiştir. Rüzgar hızı 2–5 m/s arasında güneş radyasyon değeri ise 200–800 W/m<sup>2</sup> arasında değişirken, sistem 130–140 ml/dak değerinde hidrojen üretmektedir.

Bechrakis ve arkadaşları [47] yaptığı çalışmada çevresel açıdan sürdürülebilir ve sıfır gaz emisyonuna sahip şebeke bağımsız otonom bir hibrid yenilenebilir enerji sisteminin turizm sektöründe bir otelin enerji ihtiyacını karşılayabilecek şekilde boyutlandırılması yapılmıştır. Yunanistan 'daki bir adada rüzgar-hidrojen-yakıt pili sisteminin simülasyonu, ekonomikliğini de içerecek şekilde yapılmıştır. Özellikle turizmde yaşanan

pik sezon için kullanılması planlanan hidrojen ve yakıt pili yedek bir enerji kaynağı olarak düşünülmüştür. Yük profili yüksek sezonda 1–4.5 kW arasında düşük sezonda ise 1–2.8 kW arasında değişen yük ihtiyacı belirlenmiştir. Sıcaklığın çok yüksek olmadığı adada klima gibi aşırı enerji ihtiyacı dikkate alınmamıştır. Belirlenen güç stratejisi soğutma dolaplarının da dahil olduğu tüketim araçlarının eşzamanlı devreye girip çıkması bir kontrol sistemi ile sağlanmıştır. Çalışma stratejisine göre, rüzgardan elde edilen enerjinin, yükün ihtiyacının % 5'inden fazla olduğu durum için elektrolizör devreye girerek hidrojen üretmektedir.

Yunanistan'da Xanthi bölgesinde yapılan bir çalışmada [48], rüzgar, fotovoltaik hibrid yenilenebilir enerji sisteminden elektroliz yoluyla hidrojen elde edilerek yakıt pillerinde kullanılan sistemin çalışma stratejisi araştırılmıştır. 5 kWp Fotovoltaik, 9 kW rüzgar, 1 kW yük, 2600 Ah akü, 5.2 kW elektrolizör, 4 kW yakıt pili, 6 m<sup>3</sup> depolama ve otonom çalışma süresi 8 gündür. Rüzgar ve güneşten elde edilen fazla enerjinin hidrojen eldesinde kullanılması çalışma stratejisi olarak belirlenmiştir. Değişken durumda üretilen enerji için seçilen elektrolizör ve yakıt pilinin yükün enerji ihtiyacını tam olarak karşılaması amaçlanmıştır. Bu açıdan karar fonksiyonu olarak şarj durumu kontrolü (State of Charge-SOC) kullanılmıştır. Üç farklı güç yönetim stratejisi uygulanarak performansları değerlendirilmiştir. Akülerin aşırı şarj ve aşırı deşarj olma durumlarında oluşabilecek hasarın önlenmesi için SOC durumu güç kontrol stratejinin önemli bir noktasını oluşturmaktadır.

Hidrojenin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretilip farklı depolama yollarının kullanıldığı çalışmada, güneş enerji destekli şebeke bağımsız çalışan sistem için hibrid enerji depolanmasında, kaynağın ve yükün enerji ihtiyacının günlük ve sezonluk olarak iyi eşleşmediği durumlarda incelenip zamana bağlı bir model geliştirilmiştir. Hibrid depolama sistemi için iki algoritma geliştirilmiştir. Sistemin kontrolü için konvansiyonel yöntem şarj durumu (SOC) kontrolü kullanılmıştır. Kontrol yöntemi olarak, gelecek yük tahmini kullanılmıştır. Şebekeden bağımsız çalışan yenilenebilir hibrid enerji sistemlerinde, yükün enerjisiz kalmaması için depolanması oldukça dikkatli

hesaplanmalıdır. Akülerde enerji depolamanın yenilenebilir enerji gibi kesikli meteorolojik kaynaklardan beslenen ve çok uzun süreli enerji depolamanın gerektiği durumlarda kullanılması sistemin maliyetini artırır. Birden fazla enerji depolama sisteminin kullanıldığı hibrid sistemler, sistem maliyetlerini tekil depolama yöntemine göre düşürebilmektedir. Hidrojen enerji depolama sistemi bu açıdan elektroliz, hidrojen depolama tankı ve bir yakıt pilini kapsar. Sistemin kontrol algoritmasının ve boyutlandırılmasının iyi bir şekilde tasarlanmış olması gerekmektedir [49].

Başka bir çalışmada [50] ise 1.5 kW rüzgar türbinine bağlı 1 kW elektroliz ünitesinden elde edilen hidrojen ile 1 kW gücünde PEM yakıt pili ile 40–125 W aralığında değişen elektriksel yükün beslenmesi sağlanmıştır. Çalışmada tüm sistem Matlab-Simulink programında modellenerek, matematiksel modelleri oluşturulmuştur. Modelde rüzgar türbininde kullanılan sabit mıknatıslı alternatörün matematiksel modeli indirgeme yapılarak kullanılmıştır. Sistemin eşdeğer elektriksel modeli basit seri indirgeme devresi olarak elde edilmiştir.

Rüzgar türbinleri ve sıfır emisyon termal güç santralleri gibi tesisler için büyük güçte elektroliz ile hidrojen eldesinin incelendiği bir diğer çalışmada [51] ise 3 farklı çalışma stratejisi önerilmiştir. Rüzgar türbinin kapasitesinin % 20–100 ve termal enerji güç santrali için % 10–35 olduğunda elektroliz kapasitesi araştırılmıştır. Her bir strateji için atmosfere salınan CO<sub>2</sub> gazındaki azalma miktarı hesaplanmıştır. Bu doğrultuda büyük miktarda salınan karbondioksit gazında azalma olacağı hesaplanmıştır.

### **2.3 Hidrojen Eldesinin Maliyeti ile Yapılan Çalışmalar**

Hidrojenin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektroliz yoluyla elde edilmesi performansı ile hidrojenin kg maliyetinin belirlenmesi de gelecek dönemler için oldukça önemlidir. Literatürde yapılan çalışmalarda hidrojenin maliyetinin uzun dönemli tahmini ve farklı coğrafik bölgelerde

değerlendirilmesinin önemli olduğu belirtilmiştir. Ayrıca maliyetlerin gelecek dönemler ve bugün için projeksiyonla karşılaştırılması yapılmıştır. Yenilenebilir enerji ile hidrojen eldesinin önündeki en büyük engel olarak maliyet problemi tartışılmıştır. Bu çalışmalardan önemli olanlarına aşağıda yer verilmiştir.

Levene ve arkadaşları [52] tarafından yapılan çalışmada, üç farklı bakış açısıyla elektroliz sistemi ele alınmıştır. Rüzgar ve güneş enerji kaynaklarının mevcudiyeti, fiyat analizi ve yıllık enerji ihtiyacı incelenmiştir. Her verinin ışığında yapılan analizler ile yenilenebilir enerji ile hidrojen üretimi ABD hidrojen ekonomisi boyutunda ele alınmıştır. 1 kg hidrojen üretimi için 53 kWh enerji gerektiği düşünülerek farklı üreticilere ait elektroliz cihazlarından elde edilecek hidrojenin kg'nın 3 \$'ın biraz altında olduğu belirlenmiştir.

Norveçte bir adaya bağlantı sağlayan feribotun enerji ihtiyacını hidrojenle sağlamak için yapılan çalışmada [53], rüzgardan elektroliz ile hidrojen sağlanacak ve adada kurulacak H<sub>2</sub> dolum istasyonunun simülasyon modeli hazırlanmıştır. Sistemin boyut optimizasyonu yapılarak şebeke bağımsız ve şebeke bağımlı modeller için ekonomik açıdan karşılaştırma yapılmıştır. Şebekeye bağlı modelde hidrojen üretim maliyeti 2.8 €/kg şebeke bağımsız modelde ise 6.2 €/kg olarak hesaplanmıştır.

Avustralya Cooma da şebekeden bağımsız çalışan rüzgar-fotovoltaik sisteminin basınçlı hidrojen depolamasının ekonomik analizini yapmışlardır [54]. 69 kWh/gün enerji ihtiyacı belirlenen sistem için 483 kWh enerji değerinde hidrojen depolanmıştır. Hidrojen eldesi için fazla enerjinin kullanılması öngörülmüştür. En düşük maliyet 2.52 AU\$/kWh olarak, % 100 fotovoltaik sistem için hesaplanmıştır. 1 kg hidrojenin maliyeti 5.24 AU\$ bulunmuştur. TRNSYS yazılımı ile yapılan analizde fotovoltaik sistemin % 100, % 60, % 12 olarak toplam hibrid sistem içerisindeki büyüklüğü değiştirilmiş ve maliyetin AU \$ 2.52–3.29 arasında değiştiği hesaplanmıştır.

Cezayir’de rüzgar enerjisinden hidrojen elde edilmesinin ekonomik uygulanabilirliğinin araştırıldığı çalışmada [55], 10 kW rüzgar türbini, 5 kW alkalin elektroliz ünitesi, 1 kW fotovoltaik panel, 5 kW yakıt hücresi, 5 kW DC-DC dönüştürücü, 5 kW inverter, 10 bar basınçta ve 3.8 m<sup>3</sup> hacimde bir depolama sistemi kullanılmıştır. Çalışmada yıllık olarak elde edilen hidrojen miktarının rüzgar türbinin kule yüksekliğinin 10–90 m değişmesi durumunda ne olacağı belirlenmiştir. Hidrojen miktarı yıllık olarak 10–90 m türbin yüksekliği için 1600–4800 Nm<sup>3</sup> olarak değişmektedir. 10 m yükseklikteki hidrojen üretiminin, kule yüksekliği 30 m’ye çıktığında yaklaşık 2 kat arttığı hesaplanmıştır. En yüksek üretim hidrojen miktarı ise Eylül ayında 30 m kule yüksekliğinde 400 Nm<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır.

Bilgen [56], Amerika birleşik devletlerinde 12 farklı noktadan seçilen ve dört farklı iklim durumunu karakterize eden bölgelerdeki ve yatay düzlemde ölçülen güneş radyasyon değerlerini kullanarak fotovoltaik-elektroliz yolu ile elde edilebilecek hidrojen miktarını hesaplamıştır. Ayrıca elde edilen hidrojenin kg maliyeti belirlenmiştir. Sabit ve güneş takip eden sistemler için türetilen denklemler ile yıllık güneş radyasyon değerlerine bağlı hidrojen miktarını hesaplayan denklem türetilmiştir. Buna göre 1 kWp fotovoltaik sistemden yıllık olarak üretilecek hidrojenin maliyeti 26–42 \$ olarak hesaplanmıştır.

Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından hazırlanan bir çalışmada [57] ise güneş enerjisinden hidrojen eldesi ve bu alanda kullanılacak teknolojiyle ilgili çalışmalar, günümüz ve gelecek dönemler açısından ekonomik olarak değerlendirilmiştir. Hidrojen maliyeti, güneş radyasyonuna ve kullanılan sistemlerin laboratuvar aşamasında olması sebebiyle 7–25 \$/kg aralığında değişim göstermektedir. Ayrıca 2010 yılı için yapılan öngörüyle hidrojenin kg maliyetinin 4 \$’a kadar düşeceği tahmin edilmiştir.

Günümüzde kullanılan farklı enerji sistemleri ile uzun dönemli senaryoların ve hidrojenin Almanya’nın enerji sistemindeki yeri ve durumu ile

ilgili sürdürülebilir enerji sisteminin gelişimini ortaya koymuşlardır [58]. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeden bağımsız çalıştırılmasına ilginin artacağı ve rüzgardan elde edilecek fazla enerjinin hidrojen eldesinde kullanılacağına vurgu yapılmıştır. 2020 yılı için fotovoltaik-hidrojen eldesi ile ilgili maliyetlerin teknolojik gelişmelere ve maliyetlerdeki düşüşe bağlı olarak 22 €cent/kWh olacağı tahmin edilmiştir.

#### **2.4 Hibrid Yenilenebilir Enerji Sistemlerinin Performans ve Boyutlandırmasında Kullanılan Yazılımlar**

Günümüzde hibrid yenilenebilir enerji sistemlerinin performansını ve ekonomikliğini değerlendirmek için yazılım programları oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu programlar içinde en çok kullanılanları HOMER, SIRENE, RAPSIM, SEU-ARES'dir. Bu yazılımlarda kullanıcı tarafından her bir elemanın maliyet tanımlanması, yükün belirlenmesi ve meteorolojik değişkenlerin yazılımda tanımlanmasını gerektirmektedir. Seçilen konfigürasyona bağlı olarak programda tanımlanan sisteme ait matematiksel modeller ile elde edilebilecek enerji ve hibrid enerji sistemleri için uygun sistem seçenekleri belirlenebilmektedir.

HOMER [59], Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (National Renewable Energy Laboratory) tarafından geliştirilen, yenilenebilir hibrid enerji sistemleri için yaygın olarak boyut optimizasyonu için kullanılmaktadır. HYBRID2, 1993 yılında NREL tarafından geliştirilmiştir. Hibrid sistemlerin teknik ve ekonomik performansının değerlendirilmesinde kullanılan bir yazılımdır. SIRENE 1991 yılında Bezerra ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş bir yazılımdır [60,61].

Mills ve Al-Hallaj [62] yaptıkları çalışmada, 5 kW gücünde fotovoltaik paneller, 12 kW gücünde rüzgar türbini, 8 kW elektrolizör, 3 kW kompresör ve 2 kW yakıt pilinden oluşan sistem ABD Chicago da kurulduğunda 1 yıllık süre zarfında elde edilecek enerji değerleri ve hidrojen miktarı HYBRID2



programı yoluyla hesaplanmıştır. 22 m<sup>3</sup> hacimde basınçlı olarak depo edilmesi planlanan hidrojen gerektiğinde, yakıt pillerinden elektrik elde edilmesi ile pik değeri 1 kW olan yükü karşılamaya çalışmaktadır. Çalışmada HYBRID2 programının modüler olması sebebi ile TRNSYS'e nazaran farklı eleman modelleri eklenebildiği için, farklı sistem modellerinde daha başarılı sonuçlar alındığı belirtilmiştir.

HOMER yazılımı ile yapılan bir çalışmada Newfoundland bölgesinde yakıt pili, rüzgar, güneş ve dizel şebekeden bağımsız çalışan sisteminin maliyet analizi yapılmıştır [63]. Seçilen bölge için en uygun durum rüzgar–dizel hibrid sistemi olmuştur. Fakat yakıt pillerinde % 15'lik maliyet azalması durumunda rüzgar ve yakıt pili sistemin en uygun seçenek olduğu belirlenmiştir.

Benzer bir çalışmada Arabistan gibi sıcak iklimlerde 10 kW rüzgar ve 6.5 kWp güneş hibrid sistemin 5 kW sabit yükü beslemesi için HOMER simülasyonu yardımıyla enerji maliyeti 0.187 \$/kW olarak hesaplanmıştır [64]. Bilindiği gibi yenilenebilir enerji sistemlerine ait enerji maliyetleri bölgeden bölgeye değişmektedir.

Maliyet üzerine etki eden meteorolojik değişkenlerin yanında değişen vergi oranları sebebiyle yatırım maliyetleri ve dizel jeneratörü kullanıldığı durumlarda yakıt maliyetlerinde rol oynamaktadır. Akyüz ve arkadaşlarının [65], Türkiye koşullarında HOMER yazılımı ile yaptıkları çalışmada bu değer in Balıkesir bölgesi için 1.25 \$/kW olarak bulmuşlardır.

## 2.5 Güneş ve Rüzgar Enerjisinin ve PEM Elektrolizin Ekserji Analizi Üzerine Yapılan Çalışmalar

Ekserji analizleri, farklı termodinamik faktörlerin öneminin karşılaştırılması, sistem üzerine termodinamik şartların etkilerinin iyi anlaşılması ve değerlendirilen sistemin geliştirilmesinin en etkili yollarının tanımlanması için yol gösterir. Ekserjiyi doğru anlamak ve verimle sağlanabilecek bilgiler çevresel etki ve sürdürülebilir enerji sistemleri alanında çalışanlar için önemli bir araçtır. Fotovoltaik, rüzgar, elektroliz sistemlerinin ekserjileri ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda sıralanmıştır.

Fotovoltaik sistemde yasak enerji aralığından daha büyük enerjiye sahip foton, yarı iletken tarafından soğurulduğu zaman, fotonun sahip olduğu fazla enerji kullanılmaz ve bu enerji ısı olarak açığa çıkar. Ross ve Hsiao [66] yaptıkları çalışma ile fotokimyasal güneş enerji dönüşüm sistem veriminin teorik termodinamik limitlerini incelemişlerdir.

Landsberg ve Markvart [67] tarafından yapılan çalışmada ise fotovoltaik hücrelerin karnot faktörünü araştırmıştır. Açık devre gerilimi karnot veriminin bant-boşluğu (band gap) ile çarpımı ile elde edilmektedir. Ayrıca Bisquert ve arkadaşları [68] ise fotovoltaik dönüşümün fiziksel ve kimyasal parametrelerini inceleyerek kimyasal, potansiyel ve açık devre gerilimi arasındaki ilişkinin karnot ve istatistiksel faktörlere bağlı olduğunu belirlemişlerdir.

Şahin ve arkadaşlarının [69] yaptığı çalışmada fotovoltaik panellerin termokimyasal analizi kimyasal potansiyeli temel alarak yapmıştır. Elde edilen denklem ile ekserji verimini hesaplamıştır. Verilen iklim koşullarında enerji ve ekserji verimleri karşılaştırılmıştır. Enerji verimi % 7–12 aralığında değiştiği ekserji veriminin ise % 2–8 aralığında değiştiği bulunmuştur.

Skoplaki ve arkadaşları [70] fotovoltaik panellerin hücre sıcaklıklarının ortalama sıcaklığı, rüzgar hızı, güneş ışınım değeri gibi parametrelerle

değişimlerini incelemiştir. Birçok modelin incelendiği çalışmada Ross katsayısının 0.02–0.058 aralığında değiştiği ayrıca hücre sıcaklığının çevresel değişkenler ve panelin montaj biçimi gibi parametrelerle değiştiği belirtilmiştir.

Joshi ve arkadaşları [71] fotovoltaik ve PV/T sistemlerinin performansını enerji ve ekserji verimleri ile hesaplamıştır. Enerji ve ekserji verimi için denklem önermişlerdir. Yapılan hesaplamalar deneysel veriler doğrultusunda hesaplanarak enerji ve ekserji performansı sunulmuştur.

Joshi ve arkadaşları [72] bir başka çalışma ile PV/T panellerin termal modelini oluşturmuştur. Fotovoltaik sistemin sıcaklığı azaltılarak kontrol edilerek, hava kütle akışının değişimi sonucunda fotovoltaik panellerinin veriminin artırılacağı öne sürülmüştür.

Sarhaddi ve arkadaşları [73] güneş kolektörlerin ekserjetik optimizasyonunu incelemiştir. Detaylı enerji ve ekserji analizinin yapıldığı bu çalışmada elektriksel performansını, ekserji tüketimi değerini ekserji verimini hesaplamıştır. Fotovoltaik panellerin ekserji verimi ekserji tüketiminden elde edilmiştir. Ekserji optimizasyonu yapılarak iklim tasarım ve işletme parametrelerinin ekserji verimine etkisi incelenmiştir. Fotovoltaik panellerin ekserji analizi parametrik olarak enerji analizine bağlıdır bu sebeple enerji analizi öncelikli olarak yapılmalıdır.

Yılcı ve arkadaşları [74] güneş-hidrojen, 1.2 kW PEM yakıt hücresinin performansını farklı çalışma koşullarında incelemiştir. Sıcaklık ve basınç değişkenlerinin değişiminin sistemin enerji ve ekserji verimine etkisi incelenmiştir. Denizli-Pamukkale üniversitesinde kurulan sistem temiz enerji binasının enerji ihtiyacının güneş takipli fotovoltaik paneller ve elektroliz ile hidrojen eldesi ve hidrojen depolama ünitelerinden oluşmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının rüzgar enerjisini içerecek şekilde ekserji analizinin yapıldığı ilk çalışma Koroneos ve arkadaşları [75] tarafından

yapılmıştır. Ancak çalışmada rüzgar türbinin elektrik enerjisi ürettiği dikkate alınmış ve 9 m/s rüzgar hız değerinin üzerinde ekserji verimi sıfır olarak kabul edilmiştir. Yalnızca elektrik üretimi düşünülen çalışmada entropi üretimi dikkate alınmamıştır. Bu çalışmanın benzeri bir çalışma da Jia ve arkadaşları [76], hava kompresörünü dikkate alarak basınç farklarını da hesaba katarak ekserji verimini bulmuşlardır.

Rüzgar hızının termodinamik karakteristikleri Goff ve arkadaşları [77] tarafından yapılmıştır. Diğerlerinden farklı olarak çalışmada rüzgar hızının soğutma kapasitesi etkisi bu çalışmada dikkate alınmıştır.

Sahin ve arkadaşları [78] termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarını dikkate alan rüzgar basıncı ve soğutma etkisini hesaba alan ve diğerlerine göre daha kapsamlı yeni bir formül geliştirmiştir, çalışmalarında rüzgar ekserji verimliği haritasını Kanada'nın bir bölgesi için gerçekleştirmişler.

Başka bir çalışmada [79] ise 1.5 kW gücünde bir rüzgar türbininin 15 ay süresince ölçümleri yapılarak enerji ve ekserji incelemesi yapılmıştır. Basınç farklarının ve sıcaklık değişimlerinin etkilerinin ekserji verimine etkisinin incelendiği çalışmada farklı rüzgar hız değerlerinde ekserji veriminin % 0–40 arasında değiştiği bulunmuştur.

Ahmadi ve Ehyaei [80] kimyasal, fiziksel ve kinetik ekserjileri dikkate alarak Tahran'da rüzgar türbinin ekserji analizini yapmıştır. Yıllık entropi üretimi modellendikten sonra İran'da iki ayrı rüzgar karakteristiğine sahip bölge için (yüksek ve düşük rüzgar hızı) optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyonda daha düşük rüzgar karakteristiğine sahip bölge için daha etkin bir yaklaşım elde edilmiştir.

Sudan hidrojen üretilmesinde yaygın olarak kullanılan PEM elektrolizörlerinin termodinamik–elektrokimyasal modellerinin kullanılması sistemin çalışmasının iyi anlaşılmasını ve sistemde yapılacak optimizasyon çalışmalarını kolaylaştıracaktır. Bu konuda Rosen [81] tarafından yapılmış

çalışma ile düşük sıcaklıkta hidrojen üretimi için suyun elektrolizinin enerji ve ekserji verimlerinin araştırılmıştır. Yapılan bu çalışmada kayıpların kaynağı ve miktarı ile ilgili önemli bilgiler elde edilmiştir. Enerji ve ekserji verimleri arasında oldukça büyük oranda fark bulunmuştur. Bunun sebebi ise sistemin modellenmesinde elektrik ihtiyacının termal bir kaynaktan elde edildiği düşünülmüştür. Elektrokimyasal modelin incelenmesinde enerji ve ekserji verimleri, zar kalınlığı, sıcaklık ve akım yoğunluğu parametreleri dikkate alınmıştır.

Meng ve arkadaşları [82] tarafından yapılan çalışmada PEM elektrolizörüyle hidrojen elde eden sistem incelenmiştir. Enerji verimlerinin ve ekserji verimlerinin ayrı ayrı hesaplandığı çalışmada enerji verimi yaklaşık olarak aynı çıkmıştır. Enerji veriminin artırılması için yapılan öneri daha ince elektrot kullanılması ve daha yüksek çalışma sıcaklığı sayesinde sistemin enerji verimini arttıracacağı belirtilmiştir. Ayrıca yüksek aktivitede katalizörlerin geliştirilmesinin verimin artırılmasına önemli katkı sağlayacağı belirlenmiştir.

Kazım [83] yaptığı çalışmasında ise PEM ekserji analizi ve ekserji maliyetini dikkate alınmıştır. Bu amaçla 12900 kW gücünde gerçekleştirilen PEM elektroliz sistemi 7.2 m<sup>3</sup>/h su tüketerek 3000 Nm<sup>3</sup>/h hidrojen ve 1500 Nm<sup>3</sup>/h oksijen üretmektedir. Ortalama güç tüketimi 1Nm<sup>3</sup> hidrojen için 4.3 kWh olarak hesaplanmıştır. Yapılan analizde reaksiyona giren tüm ürünlerin ve reaksiyondan çıkan tüm reaktantların fiziksel ve kimyasal ekserjileri dikkate alınarak farklı çalışma koşulları için ekserji verimleri hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar ile elde edilen sonuçlar çalışma basıncının ve sıcaklığın elektrolizörün ekserjik verimine anlamlı bir etkisi olduğunu göstermiştir.

Diğer çalışmalarda [84, 85] ise 12900 kW PEM elektrolizin eksergo-ekonomik analizi değişken sıcaklık ve basınç için yapılmıştır. Yapılan analizler değişken sıcaklık ve basınçta çalışma koşulları için  $(T/T_0)$  1–1.4 ve  $(P/P_0)$  1–10 aralığında yapılmıştır. Düşük sıcaklıklarda çalışan PEM elektrolizör için ekserji maliyeti % 40 civarında iyileştirilmiştir.

## **2.6 Yenilenebilir Enerji Destekli Hidrojen Üretim Sistemleri Pilot Projeler**

Bu bölümde yenilenebilir hibrid enerji sisteminin yardımıyla hidrojen elde eden ve farklı ülkelerde kurularak araştırmaya yönelik altı önemli proje incelenmiştir. İncelenen projelerin ortak noktası, sistemlerin tekil ve toplam performansı, enerji verimlilikleri, rüzgar, elektrolizör ve fotovoltaik arasındaki etkileşimin araştırılmasıdır. Bugüne kadar çok az sayıda yenilenebilir enerji destekli hidrojen eldesi sistemi projesinde rüzgar enerjisi kullanılmıştır. Hidrojenin depolanması basınçlı veya metal hidrat tanklarla sınırlanmıştır. Genellikle yakıt pilleri, proton dönüşümlü zar teknolojisine dayanmaktadır. Farklı projelerin karşılaştırılmasında gözlenen en genel sonuç yardımcı ekipmanların sistemin işletilmesinin aksamasına ve düşük enerji verimliliklerinin ana sebebi olduğudur. Projelerin çoğu devlet destekli araştırma kurumları veya akademik kurumlar tarafından yürütülmüştür [86-95].

### **2.6.1 Nemo Projesi**

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

Fotovoltaik sistem (1.3 kWp), Alkalin elektroliz (0.8 kW) ünitesi, aküler (12 kW) ve yakıt pilinin kullanıldığı sistemde elektrolizör'ün ve yakıt pilinin kontrolü batarya şarj-durumuna dayandırılmaktadır. Şarj-durumu, şarj/deşarj akımının belirlenmesiyle hesaplanır. Sistem kontrolünün amacı, elektrolizör sürekli olarak fotovoltaik ile elektrik üreterek elektrolizöre doğrudan enerji akışını maksimize etmektir. Aküler sadece gece fotovoltaik sistemden enerji

sağlanamaması durumunda kullanılır. Farklı bileşenlerin dikkatli eşleşmesi gerektirmektedir. Küçük-ölçekli sistemler için, sistem yardımcılarının optimizasyonu bileşenlerin optimizasyonu kadar önemlidir. Helsinki'de yapılacak sistem için % 100 kendine-yeter çalışma için, PV sistemin çıkış gücünün yükün üç katı kadar büyük boyutlandırmasını zorunlu kılmıştır. Yakıt pili % 60 verimliliğine ulaşmıştır. NEMO projesi [87], depolama sistemlerindeki en önemli kayıp mekanizmalarının elektro-kimyasal bileşenlerdeki dönüştürme kayıpları olduğunu göstermektedir. Bu yüzden faraday akım ve gerilim verimleri için hidrojen depolama sistemini optimize etmek için oldukça önemlidir. Uzun süre çalıştırıldıklarında yakıt pili yaklaşık % 38, elektroliz sistemi % 71 verimle çalışmıştır.

### **2.6.2 Freiburg Güneş Evi Projesi**

Kendi kendine-yeten güneş enerjili bir ev Freiburg, Almanya'da Fraunhofer Enstitüsü Güneş Enerji Sistemleri tarafından inşa edilmiştir [88]. Evin tüm enerji gereksinimi güneş enerjisi tarafından elde edilmektedir. Sistem kontrolü akü şarj durumuna göre yapılmıştır. Fotovoltaik sistem (4.2 kWp), Alkalın elektroliz (3.5 kW) ünitesi, aküler ve yakıt pilinin (3.5 kW) kullanıldığı sistemde, sistemin valflar, sensörler ve gaz analizi gibi tüm çevresel parçaları yaklaşık % 75 verime sahiptir. Üç yıllık çalışma boyunca batarya kapasitesindeki kayıp, gelişmiş bir şarj-durum kontrol algoritmasına duyulan gereksinim belirlenmiştir.

### **2.6.3 Saphys Projesi**

Fotovoltaik (5.6 kWp), elektrolizör (5 kWp), aküler (51 kWh), yakıt pili (3 kW) sistemi yükü beslemek için ortak DC barasına bağlanarak kendi başına hidrojen üreten ve depolayan sistem İtalya'da kurulmuştur [89]. Elektrolizör ve yakıt pili, sırasıyla bir düşürücü ve yükseltici ile D.C barasına bağlanmıştır. Akü gerilimi kontrol parametresi olarak kullanılmıştır. Akülerin dinamik davranışlarının kontrol için oldukça önemli olduğu belirtilmiş ve akü

şarj ve deşarj sırasında dinamik dalgalanmasından dolayı akü voltajını doğru belirlemek için enerji yönetim sistemi içinde batarya düzeltmesi gerektiği belirtilmiştir.

#### **2.6.4 Trois Rivières Projesi**

Rüzgar ve güneş enerjisinden hidrojen üretilmesine dayanan bir enerji sistemi Kanada'daki Hidrojen Araştırma Enstitüsü'nde (HRI) geliştirilerek ve kurulmuştur [90]. Rüzgar türbini (10 kW), fotovoltaik (1 kWp), elektrolizör (5 kWp), aküler (42 kWh) ve yakıt pili (5 kW) sistemi A.A yükleri beslemek için kullanılmıştır. Hidrojenin uzun-sürelili enerji depolanması ile otonom bir enerji sisteminin gerçekleştirilebileceğini ve böyle bir sistemin çalıştırılmasının güvenli ve güvenilir olduğunu göstermekti. Bir A.A yükünü beslemek için sistem DA/AA çeviricileri ile bir DA barasına bağlanmıştır. Performans analizi, kontrol algoritmasındaki yük profilini, programlanabilir güç kaynağı ile enerji seviyesi değiştirerek gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, PEM yakıt pili sistemi için oksidant olarak O<sub>2</sub>'nin depolanması, saflaştırılması, kurulanması ve yeniden-kullanılması da sağlanmıştır.

#### **2.6.5 Inta Projesi**

1989'da INTA hidrojen teknolojisi güneşten elektrik elde edilmesi ve hidrojenin bir depolama aracı olarak kullanılması ile insanlı uzay çalışmalarına entegre edilebilecek sistemlerinin elde edilmesi amaçlanmıştır [90]. Fotovoltaik (8.5 kWp), elektrolizör (5.2 kWp), aküler (30 kWh) ve yakıt pili (10 kW) sistemi A.A yükleri beslemek için kullanılmıştır. 1994'ten beri çalışmalar hidrojenin ulaşımda temiz yakıt olarak kullanılması yanında yakıt pillerinde kullanılması üzerine yoğunlaştırılmıştır. Sistem bileşenleri bir D.A şebeke üzerine entegre edilmiştir. Elektrolizöre enerji sağlayan fotovoltaik sistem doğrudan bağlantıyla veya değişken sayıdaki pillerle ve bir maksimum güç nokta takipçisi ile birlikte sisteme bağlanmıştır. Yakıt pilleri ve elektrolizörler gibi elektro-kimyasal bileşenlerin çalıştırılması, takılacak pillerin



sayısı açısından bileşenlerin dikkatli dizayn edilmesini gerektiği sonucuna varılmıştır.

### **2.6.6 Schatz Projesi**

Projenin amacı, hidrojenin güneş enerjisini depolamak için pratik bir araç olarak çalıŐabileceęini ve bir yakıt pili vasıtasıyla kimyasal enerjiyi tekrar elektrik enerjisine dönüŐtürmektir. Fotovoltaik (9.2 kWp), elektrolizör (6 kWp), aküler (42 kWh) ve yakıt pili (1.5 kW) sistem, bir hava kompresörünü (600 W) alıŐtırılmıŐtır [90]. Fotovoltaik enerji sistemi bir dönüştürücü kullanılmadan doğrudan elektrolizöre bağlanmıştır. Nominal alıŐma koşullarında, fotovoltaik sistem ve elektrolizör gerilimi iyi bir eŐleŐme sağlanmıştır. Bir Şarj göstergesi bataryanın Şarj ve deşarj edilip edilmediğini belirlemek için kullanılmıştır. 1990'lı yılların başlarında yapılan çalışmada hidrojen eldesin toplam veriminin % 6.2 olduğu belirtilmiştir.

### **3. HİBRİD SİSTEM ELEMANLARI**

#### **3.1 Hidrojen**

Hidrojen evrendeki en bol bulunan elementlerden biridir. Dünyadaki görünür maddelerin % 90'ından fazlası hidrojenden oluşmuştur. Güneş ise tamamıyla hidrojenden oluşmuş bir yıldızdır. Dünyamızın güneşten aldığı enerji, hidrojenin füzyon tepkimesi sonucunda helyuma dönüşmesiyle ortaya çıkan enerjidir. Bu gaz, havanın ondörtte biri yoğunluğa sahip olduğundan, havada hızla dağılmaktadır. Hidrojenin sıvı hale getirilmesi, enerji yoğun bir süreçtir ve hidrojenin -253 °C'ye kadar soğutulmasını gerektirmektedir. Evrendeki en bol bulunan element olmasına karşın, hidrojen gezegenimizde saf halde bulunmamaktadır. Hidrojen, suda oksijenle birleşik olarak ve fosil yakıtlarda ve sayısız hidrokarbon bileşiklerde, karbon ve diğer elementlerle birleşik halde bulunmaktadır [96].

Yalnızca bir proton ve bir elektrondan oluşan ve periyodik tablonun başında yer alan, kokusuz, renksiz, tatsız ve saydam bir yapıya sahip olan hidrojen, doğadaki en hafif kimyasal elementtir. Hidrojen doğal bir yakıt olmayıp, birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak su, fosil yakıtlar ve biokütle gibi değişik hammaddelerden üretilen sentetik bir yakıttır. Üretilmesi aşamasında buhar iyileştirme, elektroliz, fotosüreçler, termokimyasal süreçler, radyoliz gibi alternatif birçok hidrojen üretim teknolojileri mevcuttur.

### 3.1.1 Hidrojenin Yakıt Olarak Özellikleri Üretim ve Kullanım Alanları

Hidrojen birincil enerji kaynağı değil, bir enerji taşıyıcısıdır. Elektriğe benzemektedir, fakat daha verimli bir şekilde enerjiyi taşıyabilir. Hidrojen geleceğin ideal yakıtı görülmektedir. İdeal bir yakıtta bulunması istenen özellikler ise şöyle sıralanabilir [97];

- Kolayca ve güvenli olarak her yere taşınabilmeli, taşınırken enerji kaybı hiç veya çok az olmalı,
- Her yerde, kullanılabilmesi ve depolanabilmesi,
- Tükenmez ve temiz olmalı,
- Kütle başına yüksek kalori değerine sahip olmalı,
- Değişik şekillerde, örneğin, doğrudan yakarak veya kimyasal yolla kullanılmalı, güvenli olmalı, ısı, elektrik veya mekanik enerjiye kolaylıkla dönüşebilmeli,
- Çevre üzerinde hiç olumsuz etkisi olmamalı, çok yüksek verimle enerji üretebilmeli, karbon içermemeli,
- Ekonomik ve çok hafif olmalıdır.

Tablo 3.1 Farklı yakıtların özelliklerinin hidrojen ile karşılaştırılması [100].

Özellikleri	Benzin	Metan	Hidrojen
Yoğunluk, kg/m <sup>3</sup>	4.40	0.65	0.084
Hava içindeki difüzyonu, cm <sup>2</sup> /s	0.05	0.16	0.61
Sabit basınçta özgül ısı, kJ/kg K	1.20	2.22	14.89
Havada ateşleme sınırı, % hacim	1.0–7.6	5.3–15.0	4.0–75.0
Havada ateşleme enerjisi, MJ	0.24	0.29	0.02
Ateşleme sıcaklığı, °C	228–471	540	585
Havada alev sıcaklığı, °C	2197	1875	2045
Alev yayılması, %	34–42	25–33	17–25

1 kg sıvı hale getirilmiş hidrojenin ısı değeri 120 milyon Joule'dür. Hidrojenin ısı değeri tüm yakıtlardan fazladır. Hidrojenin bu özelliğinden dolayı, uzay araçlarında sıvı hidrojen kullanılmaktadır. Hidrojenin diğer yakıtlara göre Tablo 3.1 ile belirlenen avantajlarının yanında hidridleşme çevrimi önemli bir özelliği olup, pek çok uygulamada bu özelliğinden yararlanılmaktadır. Bu uygulamalar; H<sub>2</sub> depolama, H<sub>2</sub> zenginleştirme-ayırma, kompresyon, pompaj, ısı pompası, soğutma, iklimlendirme, elektrik üretimi biçiminde sıralanabilir [98].

Hidrojen üretiminde kullanılan çeşitli kaynaklar ve teknolojiler vardır; doğal gaz, kömür, benzin, metanol veya biokütleden ısıyla; bakteriler ve alglerden fotosentezle; elektrik veya güneş ışığıyla suyu parçalayarak hidrojen üretilebilir. Bugün hidrojen üretiminin çoğu fosil hammaddelerden yapılmaktadır. Dünya hidrojen üretiminin % 48'i doğal gazdan, % 30'u rafineri ürünlerinden, % 18'i kömürden ve kalan % 4'ü de suyun elektroliziyle elde edilmektedir.

Hidrojen üretim metotları hammaddeye, elde edilmek istenen hidrojen miktarına ve saflık derecesine göre değişir. Yeni geliştirilmekte olan yöntemler de dikkate alındığında hidrojen üretim teknolojileri üç grup altında toplanabilir [99]:

- *Fosil Hammaddelerden:* Kömürün Gazlaştırılması, Buhar Reforming, Ototermal Reforming, Termal Disosiyasyon.
- *Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından:* Suyun Elektrolizi, Fotoelektroliz, Suyun Termal Parçalanması, Biokütle Gazlaşması
- *Atık Gaz Akımlarından Hidrojen Kazanma:* Rafineriler (buhar veya metanol reforming fabrikaları proses gazı gibi) ve kimyasal madde fabrikaları (amonyak veya metanol sentezi gibi) gibi işletmelerde hidrojen zengin atık gazlardaki hidrojeni arıtma.

Hidrojen Carnot çevriminin sınırlayıcı etkisi altında kalmadan, yakıt hücreleri yardımıyla ve elektrokimyasal çevrimle direkt elektrik üretiminde

kullanılabilen bir yakıttır. Bu işlemde hidrojen alkali, fosforik asit, katı polimer, ergimiş karbonat, katı oksit tip elektrolitli yakıt hücrelerinde % 50–80 verim aralığında kullanılabilmektedir. Genel olarak hidrojen; ulaştırma için en uygun, en iyi dönüşebilirliği olan, kullanım verimi en yüksek, çevre ile en uyumlu, emniyetli bir yakıttır [100].

### **3.1.2 Hidrojenin Depolanması**

Üretilen hidrojen depolanabilmekte, boru hatları ve/veya tankerlerle taşınabilmektedir. Hidrojenin depolama yöntemleri; tüplenmiş alçak basınçlı gaz (12 bar) ve yüksek basınçlı gaz (150 bar) dışında sıvılaştırılmış biçimde, kriyojenik (dondurulmuş) tanklarda (220 kPa) ve metalik hidrid biçiminde olabilmektedir. Gaz hidrojenin zeolit ortamlarda depolanması çalışmaları da vardır. Ancak, enerji içeriğinin yüksekliği açısından gaz yerine sıvı hidrojen depolama teknikleri üzerinde durulmaktadır [100].

Hidrojenin eşsiz bir özelliği, ekzotermik kimyasal reaksiyon kapsamında, bazı metal ve alaşımlarla kolayca büyük miktarlarda hidrid biçimine dönüşebilmesidir. Hidridler, bir tank içinde gaz hidrojenin metal alaşım parçacıkları ile bileşik oluşturmuş biçimde depolanmasıdır. Depolamada hafif kütleli metal hidridler tercih edilmektedir. Hidridlere ısı verildiğinde hidrojen serbest kalmaktadır. Hidridlerin düşük sıcaklık ve yüksek sıcaklık hidridleri olmak üzere iki çeşidi vardır. Demir titanyum alaşımı düşük sıcaklık hidridi iken, magnezyum-nikel alaşımı yüksek sıcaklık hidrididir. Uygulamada bazen düşük ve yüksek sıcaklık hidridlerinin birleşimi kullanılmaktadır.

### **3.2 Elektroliz**

Bir elektrolit içine iki elektrot daldırılıp, bu hücreye dışarıdan akım uygulayarak elektrotlarda kimyasal reaksiyonlar meydana getirilmesi olayına elektroliz denir.

Tablo 3.2 Suyun elektrolizinde kimyasalların termodinamik özellikleri [101].

$h_{H_2(g)}$	$h_{O_2(g)}$	$h_{H_2O(s)}$
0	0	285826
$S_{H_2(g)}$	$S_{O_2(g)}$	$S_{H_2O(s)}$
130.68	205.14	69.92

Elektrolizin meydana gelmesi için, hücreye anot ve katot denge potansiyellerinin toplamından daha büyük potansiyelde bir dış akımın uygulanması gerekir. Suyun doğru akım kullanılarak hidrojen ve oksijenlerine ayrılması, hidrojen üretimi için en basit yöntem olarak bilinmektedir. Doğru akım kaynağı bu elektrotlara bağlandığında akım iletken sıvı içinde, pozitif elektrottan negatif elektroda doğru akacaktır. Bunun sonucu olarak da, elektrolit içindeki su, katottan çıkan hidrojen ve anottan çıkan oksijene ayrışacaktır. Burada yalnız suyun ayrışmasına karşılık, su iyi bir iletken olmadığı için elektrolit içine iletkenliği artıran potasyum hidroksit eklenir. Suyun elektrolizi için, uygulanması gereken en düşük gerilim, Tablo 3.2'deki termodinamik değerler kullanılarak Denklem 3.1 ile aşağıdaki gibi hesaplanır ve normal basınç ve sıcaklıkta, ideal olarak 1.229 V'tur. *Gibbs serbest enerjisi* olarak da bilinen serbest enerji, entalpi (H) ve entropinin (S) bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. T mutlak sıcaklık (K) olduğuna göre elektroliz reaksiyonunun gerçekleşmesi için oluşması gereken minimum enerji reaksiyonun Gibbs enerjisi olarak aşağıdaki şekilde hesaplanır [101].

$$\Delta G = \left[ (h_{H_2} + \frac{1}{2} h_{O_2}) - h_{H_2O(s)} \right] - T \cdot \left[ (S_{H_2} + \frac{1}{2} S_{O_2}) - S_{H_2O(s)} \right] \quad (3.1)$$

$$E_0 = \frac{\Delta G}{nF} = \frac{237177}{2.96487} = 1.229 \frac{J}{C} = 1.229 V$$

Ancak gerilim uygulanan bir elektroliz hücresinde elektroliz ile hidrojen ve oksijenin ayrışabilmesi için uygulanan gerilim suyun serbest enerjisi, aktivasyon ve omik kayıpların toplamından büyük olmalıdır. Bu durumda uygulanması gereken gerilim 2–2.1 Volt aralığında değişir. Yukarıda verilen

denklem ile 1 atm ve 25°C için hesaplanır ve artan sıcaklık ve basınç ile gerilim değeri düşer. Bu durumda elektroliz gerilimi yüksek sıcaklık ve basınç için değişmektedir.

Elektroliz, 1800 yılında W. Nicholson ve Carlisle tarafından suyun elektrik enerjisi kullanılarak parçalanması olayını açıklamış ve o tarihten 1902 yılına kadar 400 endüstriyel elektroliz cihazı üretilmiştir. İlk büyük ölçekli elektroliz ünitesi 1939'da 10 000 Nm<sup>3</sup> /h hidrojen üretim kapasitesine sahipti. İlk Katı Polimer Elektrolit (PEM) sistem General Elektrik tarafından 1966 yılında üretilmiştir [102].

Tablo 3.3 Farklı ticari üreticilere ait farklı tipte elektroliz cihazları [103].

Üretici	Teknoloji	Alt Kapasite (kg/gün)	Üst Kapasite (kg/gün)	Basınç (Psgi)
AccaGen SA	Alkalin ve PEM	0.043	215,7	2900
Avalance	Alkalin	0.75	300	6500
ELT	Alkalin	6.47	1639.4	435
Giner	PEM	11.8	11.8	300
Hamilton Sundstrand	PEM	129.3	1293.3	100
Hydrogenics	PEM ve Alkalin	10.8	129.4	363
Norsk Hydro	Alkalin	129.4	1046.2	217.5
Proton Energy System	PEM	1.1	12.9	218

Elektroliz cihazları saf hidrojen ve oksijen üreten cihazlardır. İdeal şartlarda 39 kWh elektrik enerjisi ve 8.9 litre su ile 1 kg hidrojen 25°C ve 1 atm basınçta oluşturulabilir. Ticari elektroliz ünitelerinin verimleri % 56–73 arasında değişir, buda 1 kg H<sub>2</sub> için 53.4–70.1 kWh/kg değerine karşılık gelir [103].

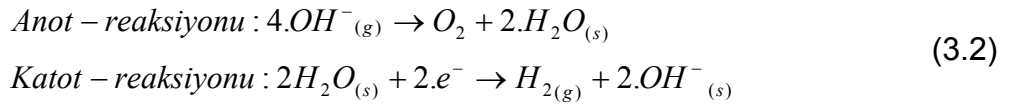
Tablo 3.3' de görüldüğü gibi elektroliz ile hidrojen eldesinde ticari olarak kullanılan elektroliz cihazları yaygın olarak PEM elektroliz ve Alkalin

elektroliz cihazlarıdır. Günlük hidrojen üretim kapasiteleri 0.043–129.4 kg/gün ve çalışma basınçları 15–200 bar aralıklarda değişmektedir.

### 3.2.1 Alkalın Elektrolizör

Alkalın elektroliz cihazları sanayide en sık kullanılan hidrojen üreteçleridir. Hidrojen üretimi % 99 saflıkta olmaktadır. Belli saflaşma süreçlerinin ardından hidrojenin yakıt pilleri için gereken yüksek saflık oranlarına ulaşması mümkündür. Hidrojen üretiminin verimi yaklaşık olarak % 80'dir. Elektroliz için elektrolit olarak % 25–30 oranda potasyum hidroksit kullanılmaktadır. Düşük akım yoğunluklarında çalıştırıldıklarında ( $0.3 \text{ A/cm}^2$ ) daha etkin olmaktadır. Dezavantajları ise yüksek ısı değerlerinde kullanılan sıvı elektrolitin yüksek orandaki korozyon etkisidir. Bu sebeple oldukça kısa kullanım ömürleri vardır [104].

Alkalın elektrolizörler, yapısı kostik su çözeltisi ve % 25–30 oranda potasyum hidroksit (KOH) içerir. Katalizör olarak sodyum hidroksit (NaOH) sodyum klorür (NaCl) kullanılmaktadır. Sıvı elektrolit elektrotlar arasında iyonların iletimine imkan tanır ve kimyasal reaksiyonda tüketilmez fakat sistemdeki kayıplara bağlı olarak periyodik olarak ikmal edilir. Ticari alkalın elektrolizörlerde akım yoğunluk aralığı  $100\text{--}400 \text{ mA cm}^{-2}$ 'dir. Anotta ve katotta gerçekleşen tepkime ise:



### 3.2.2 Proton Değişimli Zarlı Elektroliz (PEM)

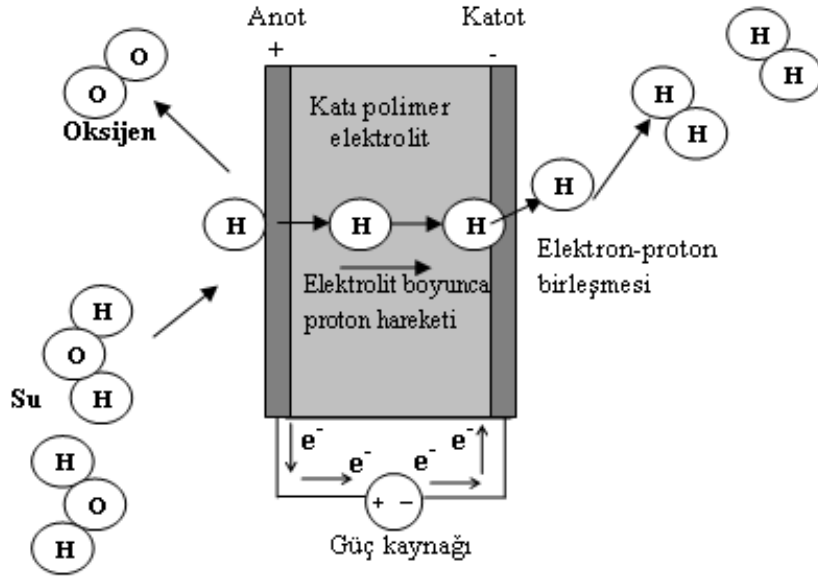
Ticari kullanımı mevcut olan diğer elektroliz teknolojisi katı polimer elektrolit zarlı elektrolizördür. Katı polimer elektrolit (SPE) ya da polimer elektrolit zarlı elektrolizör, her ne şekilde adlandırılırsa adlandırılınsın bir katı proton iletimli zardır ve elektriksel olarak iletken olmayan bir yapıdır. Zar, gaz



ayırıcı devre ve iyon iletici olarak görev yapar. PEM elektroliz için yüksek saflıkta iyonize edilmiş suya ihtiyaç duyulur ve minimum 1 Mohm-cm dirençte su ile yığının ömrünü uzatmak mümkündür.

PEM teknolojisi GEMINI uzay gemisi projesinin bir parçası olarak geliştirilmiştir. Alkali elektrolizörden farklı olarak kostik sıvı elektrolit yerine katı iyon iletimli ince bir zardan oluşur. Bu yapı sayesinde hidrojen  $H^+$  iyonları veya suyun hidrat molekülleri  $H_3O^+$  zarın anot tarafından katot tarafına hareket ederek, dış devrede anottan katoda hareket eden elektronlarla birleşir ve anotta oluşan oksijen gazını katotta oluşan hidrojen gazından ayırır (Şekil 3.1). Genellikle kullanılan zar yapısı nafiondur. PEM elektrolizörler bipolar yapıda kullanıldığı için membran boyunca yüksek diferansiyel basınçta kullanılabilir. Alkalın elektrolizlerden farklı olarak PEM elektrolizörler yüksek akım yoğunluklarında ( $>1600mA\ cm^{-2}$ ) tercih edilir.

Farklı modelleri arasında PEM elektrolizör basit ve kompakt yapıya sahiptir. Yüksek akım yoğunluk seviyesinde yüksek saflıkta ve verimde hidrojen üretebilir. Elektrolizördeki zar hidrojen ve oksijeni birbirinden ayırır. PEM elektrolizörler yüksek maliyetlerine rağmen oldukça yüksek saflıkta hidrojen ve oksijen üretmektedirler. Özellikle denizaltılar ve uzay gemileri için bu özelliklerin haricinde PEM elektrolizörler yüksek basınçta 300 bara kadar çalışabilirler. Ayrıca hidrojenin yüksek ısı değerlerinde % 95.1 verime ulaşabilmektedirler [105]. Alkali elektrolizörle karşılaştırıldığında yüksek basınç, sıcaklık ve yüksek akım yoğunluğunda çalışabilirler. Bu özellikleri nedeniyle PEM elektrolizörlerin, çıkış değerleri tahmini zor olan yenilenebilir enerji kaynaklarıyla birlikte kullanımı uygun olmaktadır [106].



Şekil 3.1 PEM Elektrolizör çalışma prensibi.

### 3.3 Rüzgar Türbinleri

Elektrik enerjisini rüzgar ile elde etmek, yani mekanik enerjinin, jeneratörler yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesi yıllardır yaygın olarak kullanılmaktadır. Rüzgar ile elektrik enerjisi üretilmesinde, elektrik makinesi olarak yaygın bir şekilde asenkron ve senkron jeneratörler kullanılmaktadır. Güç elektroniğinde yaşanan hızlı gelişim sayesinde, rüzgar enerjisiyle elektrik enerjisi elde edilmesinde kullanılan teknikler hızla artmış ve gelişim göstermiştir. Bunun sonucu olarak son yirmi yıl içerisinde 20 kW 'tan başlayan ve 2 MW 'a kadar büyük rüzgar türbinleri geliştirilmiştir. 1957 yılında Gedser'in 200 kW gücünde ürettiği rüzgar türbini, modern rüzgar türbini fikrinin öncülüğünü yapmıştır. 1973 yılında yaşanan petrol sıkıntısının hemen ardından 1980 yılında Riisager'in rüzgar türbini fikri Gedser'den büyük farklılıklara sahip olmasa da, daha ucuz imal edildiğinden ticari açıdan da başarı sağlamıştır. Rüzgar türbininin bu başarıyı sağlanmasında en önemli özelliklerinden birisi rüzgardan elde edilen giriş gücünü kontrol edebilecek şekilde tasarlanan eğim açısı rüzgara göre değiştirilebilen kanat yapısıydı. Kanat eğim açısı (pitch) kontrol edilebilen pervanelerin kullanımı son yirmi yıldır türbin tasarımında kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra son on

yıldır kanat eğim açısı kontrolüne benzer bir stratejiye sahip, durdurma denetimli (stall) kontrol tekniği de kullanılmaktadır. Bu teknik artan rüzgar hızlarında, fırtına gibi düzensiz rüzgar durumları için, giriş gücünü kontrol edilmesinde kullanılmaktadır [107,108].

1990'lı yıllarda başlayarak türbinin elektriksel sisteminde bir yenilik olarak kullanılmaya başlayan çift çıkışlı indüksiyon jeneratör ve birlikte kullanılan güç elektroniği dönüştürücüleridir. Verim ve kontrol üstünlüğü sebebiyle birçok avantajı olan sistem, değişken hızlı rüzgar türbini olarak bilinmektedir. Bu avantajların başında dişli kutularındaki mekanik stresin azalması, elektrik üretiminde artan verim, aktif ve reaktif gücün kontrol edilebilir olması gelmektedir [109].

Rüzgar enerjisinin tek başına kullanılması ile oluşan sistemin güvenilirliği düşük olmaktadır. Son yıllarda yapılan araştırmalar ile birbirini tamamlayıcı özellik gösteren iki veya daha fazla yenilenebilir enerji kaynağı birlikte kullanılarak sistem güvenilirliğinin artırılacağı düşüncesine varılmıştır [110].

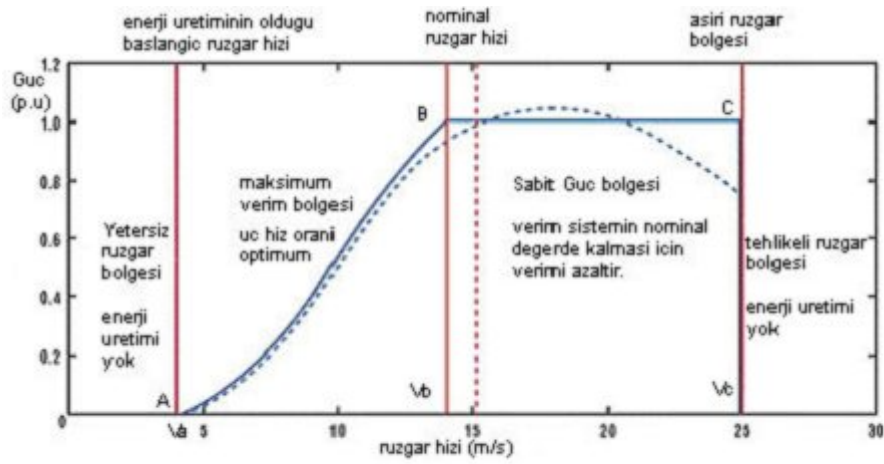
### **3.3.1 Rüzgar Türbinlerinde Hız Kontrolü**

Türbininin dönme hızını kontrol etme gereği temelde üç farklı nedene dayanır.

- Sistemin verimli çalışmasını sağlamak (maksimum verim bölgesi).
- Sistemin üretebileceği güç miktarını sınırlayabilmek (maksimum güç )
- Çok yüksek rüzgar hızlarında sistemin zarar görmesini engellemek üzere sistemi durdurmak (emniyetsiz bölge).

Şekil 3.2 incelendiğinde rüzgar türbinleri, belirli bir  $v_a$  rüzgar hızının altında gerekli döndürme torkunu oluşturamazlar, bunun sonucunda dönme

hareketi oluşmaz bu bölge yetersiz rüzgar bölgesi olarak adlandırılır. Rüzgar türbinleri, enerji üretimine başladıkları  $v_A$  rüzgar hızıyla sistemin en yüksek güç sınırına eriştiği  $v_B$  hızı arasında en yüksek verimle çalıştırılırlar. Bu bölgede rüzgardaki enerjinin rüzgar türbini tarafından yakalanabilecek miktarı, rüzgar türbininin güç sınırının altındadır. Bu yüzden bu bölgedeki kontrolün amacı verimin maksimum olmasını sağlamaktır. Bu durumda güç eğrisinin (A-B) noktaları arasındaki bölgede sistem maksimum verimle çalışmaktadır [109].



Şekil 3.2 Rüzgar türbininin çıkış gücünün rüzgar hızına göre incelenmesi [109].

Rüzgar türbinleri tasarlanırken sistemin üretebileceği belli bir güç sınırı göz önüne alınır. Kanat uzunlukları, jeneratör ve tüm sistem buna bağlı olarak tasarlanır. Artan rüzgar hızıyla, rüzgar türbininin güç üretimi bu sınıra yaklaştığında, sistemin verimli çalışması değil, bu sınırın üzerinde güç üretmemesi istenir. Bu durumda güç eğrisinin B-C noktaları arasında kalan bu bölgesi, maksimum güç bölgesi olarak adlandırılır. Bu bölgede rüzgardaki enerji rüzgar türbininin kapasitesinin üzerinde ve gereğinden fazla miktardadır. Sistem maksimum verim noktasının altında çalışmasına rağmen maksimum kapasitede güç üretimi yapar. Ancak bu şekilde güç sınırında üretim yapılabilir. Bu bölgedeki hız kontrolünün amacı, maksimum kapasitede sabit güç üretimi sağlamaktır. Genellikle rüzgar türbinlerinin üretim yapabileceği bölgeyi belli bir rüzgar hızıyla sınırlandırmak gerekir.

Rüzgar hızının yıllık frekans dağılımına bakıldığında yüksek rüzgar hızlarıyla yıl boyunca çok az karşılaşıldığı görülmektedir. Bu az karşılaşılan yüksek hızlardaki rüzgarlar karşısında sistemin yeterince dayanıklı yapılması, bu hızlarda sistemden yıl boyunca elde edilebilecek toplam enerji göz önüne alındığında oldukça pahalı olmaktadır. Bu yüzden rüzgar türbinlerinin çalışma alanı belli bir rüzgar hızıyla sınırlandırılır. Şekil 3.2'de yer alan güç eğrisinde,  $v_c$  rüzgar hızının üzerindeki emniyetsiz bölgede sistemden enerji üretmesi beklenmez. Böylece yüksek rüzgar hızlarında oluşabilecek aşırı yüklere engel olunarak sistemin hasara uğraması önlenir [108].

### 3.3.2 Rüzgar Türbinlerinde Güç Kontrol Yöntemleri

Rüzgar türbinlerinin çıkışında elde edilecek mekaniksel gücü sınırlandırarak, hem emniyetsiz bölgede çalışmayı engellemek, hem de maksimum güç bölgesinde çalıştırmak için kullanılan güç kontrol yöntemleri türbinlerin kontrolü açısından büyük önem taşır. Tablo 3.4 incelendiğinde, farklı üretici firmaların ürettiği, farklı tipteki rüzgar türbinlerinde güç kontrolünde farklı teknikler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerinden bir tanesi kanat eğim açısının kanadın kendi eksenine etrafında döndürülerek elde edilen gücün belli değer aralığında tutulmasıdır (pitch control). Kanat eğim açısının  $1^\circ$ - $25^\circ$  derece değişimiyle güç katsayısı  $C_p$ 'nin 0.5-0.1 aralığında değişmesi sağlanabilir.

Tablo 3.4 Farklı modelde rüzgar türbinlerinin özelliklerinin karşılaştırılması.

Rüzgar türbini	Çap D (m)	Güç P (kW)	Kule (m)	Jeneratör tipi	Devir sayısı	Güç kontrolü
DeWind 41	41	500	55	Asenkron	Değişken	Pitch
Enercon 40	44	500	63	Senkron	Değişken	Pitch
Tracke TW	46	600	46	Asenkron	Sabit	Active Stall

Güç kontrol yöntemlerinden bir diğeri olan, durdurma (stall) etkisi ise, yüksek rüzgar hızlarında sabit olarak mesnetlenmiş olan kanatların kanat profillerinde girdap oluşması sonucunda kaldırma kuvvetinin azalması ve buna bağlı olarak üretilen güç miktarının, rüzgarın hızının artmasıyla sabit kalmasıdır. Bu yöntem kanat eğim açısının (pitch) değiştirilmesinde yapılanın aksine herhangi bir mekanik kontrol yöntemi ile gerçekleşmez. Bu olay sistemin belirli bir rüzgar hızında doğal bir fiziksel olay olarak gerçekleşir. Sabit kanat eğim açısına sahip rüzgar türbinlerinde artan rüzgar hızlarında düşük güç katsayısı  $C_p$  elde edilmektedir. Bu da doğal olarak çıkış gücünü sınırlamaktadır. Aktif durdurma kontrolü (active stall) ise, kanat eğim açısına benzer bir şekilde kendi eksenini etrafında dönebilen kanatların, nominal güce ulaşması anında girdap oluşumu amacıyla uygun olarak kendi eksenini etrafında dönmeleriyle sağlanır [109-113].

### **3.4 Fotovoltaik Malzemeler ve Çalışma Prensipleri**

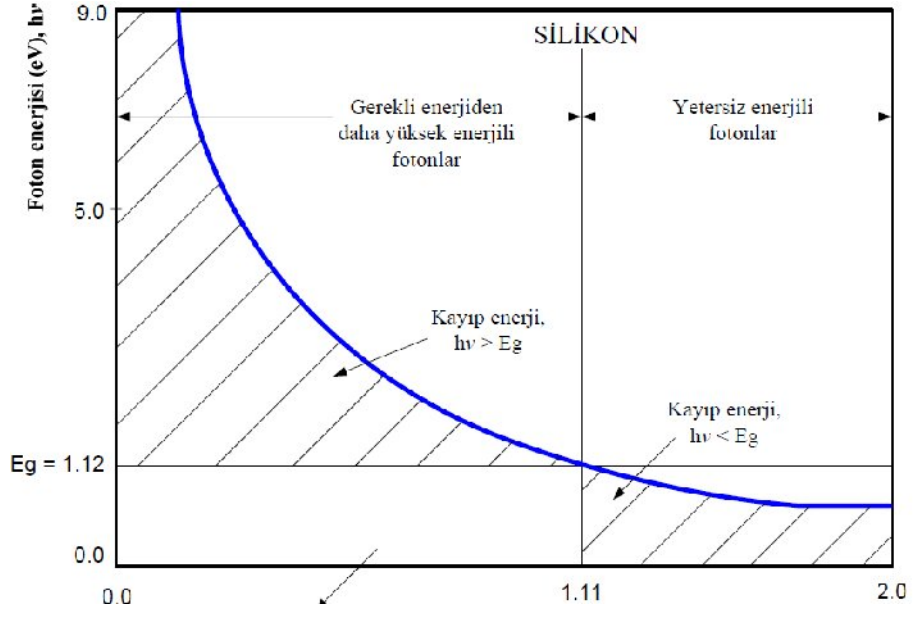
Fotovoltaik malzemeler, ışık (foton) enerjisini elektrik enerjisine dönüştürürler. Bu enerji dönüşümünü sağlamada yarı iletken malzemelerle ışık enerjisini alabilecek bir yüzeyden yararlanılır. Fotovoltaik olay, Edmond Becquerel tarafından 1839 da, bir elektrolit içine batırılan elektrotlardan biri üzerine ışık düşürüldüğünde bir potansiyel farkın meydana gelmesiyle ilk kez fark edilmiştir. Ticari kullanılacak anlamda ilk güneş pilini Schottky, Lange ve Grondahl tarafından gerçekleştirilmiştir İlk güneş pili Bakır oksit ( $Cu_2O$ ) ve selenyumdan (Se) yapılmıştır. Modern anlamda gerçekleştirilen fotovoltaik sistem 1954 yılında Bell Telephone laboratuvarında G.L. Pearson, C.S. Fuller ve D.M. Chapin tarafından gerçekleştirilmiş olup p-n katkılı silisyum güneş pildir, yapımı ancak 1954'de Amerika Birleşik Devletleri'nin Bell Laboratuvarı'nda % 6'lık verimle üretilmiştir [114,115].

Bir birinden farklı iki yarı iletken (p-n) maddenin ortak temas bölgesinin foton radyasyonu ile aydınlatılması durumunda bu iki malzeme arasında elektriksel bir potansiyel oluşmaktadır. Yeterli enerjiye sahip fotonlar yarı

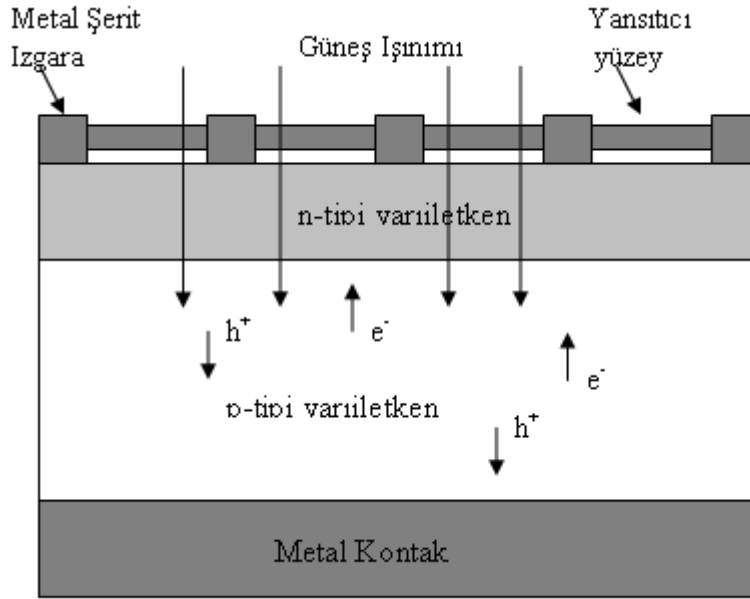
iletken malzemelerde delik-elektron çifti oluşturur. Delikler (+) yüklü, elektronlar (-) yüklüdür ve delik elektron hareketiyle dış devrede akım akıtılmaktadır. Ancak bu olay kendi kendine oluşmaz bunun için elektronların değerlik bandından iletim bandına taşınması için gerekli olan enerji fotonlar tarafından sağlanmalıdır. Fotonlar dalga boylarıyla, frekanslarıyla ve enerjileri ile karakterize edilebilirler. Dalga boyu  $\lambda$ , olan bir fotonun enerji  $h$  plank sabiti,  $c$  ışık hızı olmak üzere Denklem 3.3 ile hesaplanabilir [69].

$$E = h \cdot f = h \frac{c}{\lambda} \quad (3.3)$$

Fotonların % 24'ü silikonda elektronları değerlik bandından iletim bandına geçirecek enerjiye sahip değildir. % 20'si ise sızıntı akımı ve dirençlerde kayıp olur ve % 32'si ise gerekenden fazla enerjiye sahiptir. Gerekenden fazla olan veya iletim bandına geçirmek için yetersiz olan foton enerjisi panel tarafından absorbe edilerek ısı enerjisi olarak sistemde kalır [116]. Şekil 3.3'de görüleceği üzere dalga boyu  $1.11 \mu\text{m}$ 'den küçük olan fotonlar bir elektronu uyarmak için gerekli enerjiden daha fazla enerjiye sahiptir. Bu durumda fazla enerji fotovoltajik hücre üzerinde ısı olarak açığa çıkmaktadır. Bu durumda fotovoltajik enerji ve güneş ışınımından kaynaklı olarak ısınmaktadır. Bu durumda fotovoltajik sistemlerin ekserji analizinde elektrik enerjisi ve termal enerji dikkate alınmalıdır. Fotovoltajik panellerin yapımında en çok kullanılan yarı iletken malzemeler, silisyum ve silisyum alaşımlarıdır. Şekil 3.4' de güneş panelinde kullanılan hücrelerin içyapısı gösterilmiştir [117].



Şekil 3.3 Fotovoltaik sistemlerin çalışmasının bağ teorisiyle açıklanması [69].



Şekil 3.4 Fotovoltaik sistemin hücre içyapısı [117].



### 3.2.2. Güneş pillerinin yapımında kullanılan malzemeler

Güneş pilleri pek çok farklı maddeden yararlanarak üretilebilir. Günümüzde en çok kullanılan maddeler şunlardır [117]:

Kristal Silisyum: Önce büyütülüp daha sonra 200 mikron kalınlıkta ince tabakalar halinde dilimlenen tek kristal Silisyum bloklardan üretilen güneş pillerinde laboratuvar şartlarında % 24, ticari modüllerde ise %15'in üzerinde verim elde edilmektedir. Dilimlenerek üretilen çok kristal silisyum güneş pilleri maliyet açısından avantajlı ise de verim %14 civarında daha düşük olmaktadır.

Galyum Arsenik (GaAs): Silikona benzeyen yapıya sahip olan ancak daha yüksek ışık emiş katsayısına sahip yüksek sıcaklıklarda daha verimli çalışan bu malzemeyle laboratuvar şartlarında % 25 civarında verim elde edilmektedir. Diğer yarı iletkenlerle birlikte katkılama ile elde edilen GaAs pillerde % 30 verim elde edilebilmektedir.

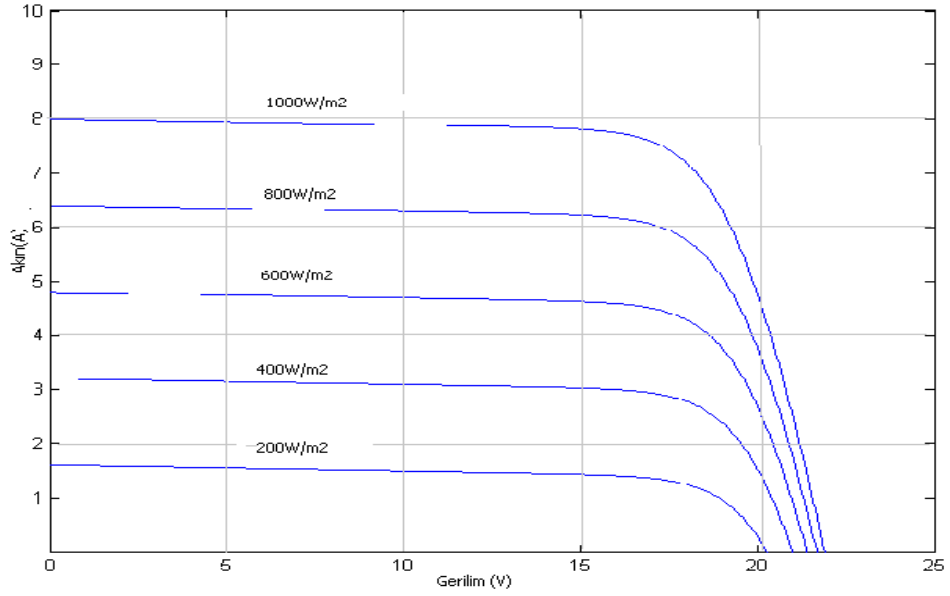
Amorf Silisyum: Kristal yapı özelliği göstermeyen bu Si pillerden elde edilen verim % 10 dolayında, ticari panellerde ise % 5–7 mertebesindedir. Günümüzde daha çok küçük elektronik cihazların güç kaynağı olarak kullanılır.

Kadmiyum Tellürid (CdTe): Çok kristal yapıda bir malzeme olan CdTe ile güneş pili maliyetinin çok aşağılara çekileceği tahmin edilmektedir. Laboratuvar tipi küçük hücrelerde % 16, ticari tip modüllerde ise % 7 civarında verim elde edilmektedir.

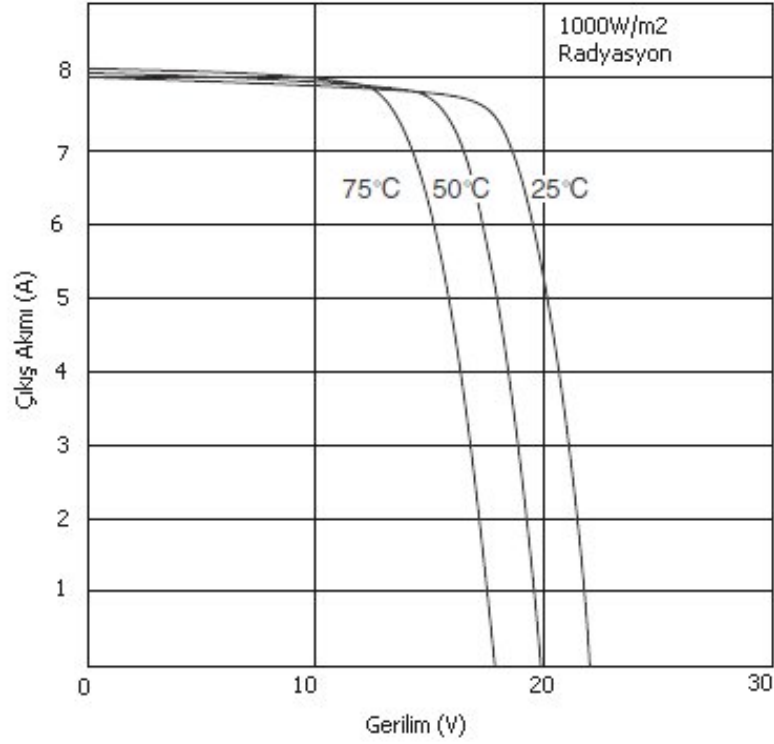
Optik Yoğunlaştırıcı Hücreler: Gelen ışığı 10–500 kat oranlarda yoğunlaştıran mercekli veya yansıtıcı araçlarla panell verimi % 17'nin, pil verimi ise % 30'un üzerine çıkılabilmektedir. Güneşi dik açıda görmelerinin gerekliliği bu tip hücrelerin kullanımını zorlaştırmaktadır.

### 3.5 Fotovoltaik Sistemler

Fotovoltaik sistemlerin çıkış gücü, güneşe bakış yönü, açısı, panel sıcaklığına ve güneş ışınımına bağlı olarak değişir. Artan güneş ışınım değerlerinde üretilen akım ve dolayısıyla çıkış gücü artmaktadır (Şekil 3.5). Şekil 3.6'da ise artan sıcaklığın çıkış performansına etkisi verilmiştir. Buna göre artan sıcaklık değerinde çıkış gücü azalmaktadır.



Şekil 3.5 PV sistemin radyasyon değerlerinde akım-gerilim eğrisi.



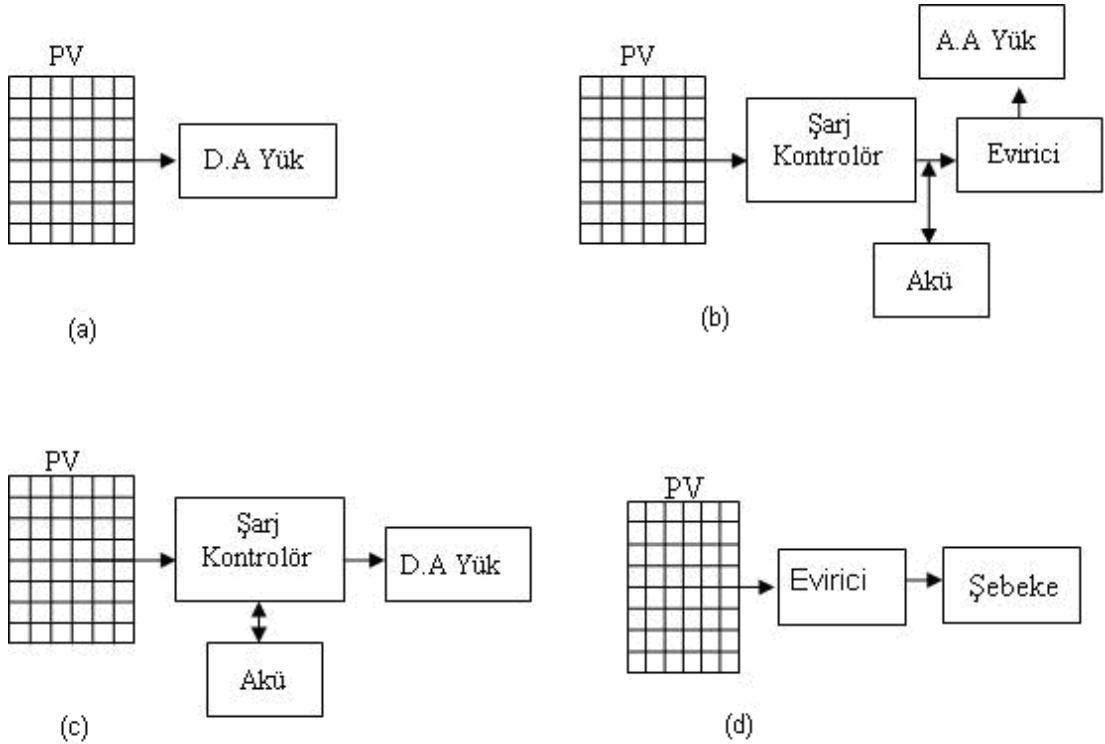
Şekil 3.6 Fotovoltaik panelin sıcaklığa bağlı I-V eğrisi değişimi.

Fotovoltaik sistemler, güneş enerjisinden etkin olarak yararlanmada genelde elektrik enerjisi üretiminde kullanılan ve fotovoltaik modül, akü, evirici, şarj denetim birimleri gibi bileşenlerden oluşan sistemlerdir ve şebekeyle birlikte veya şebekeden bağımsız çalışabilirler.

Fotovoltaik sistemler, kullanılan bileşenlerin ve kontrol sisteminin konumuna bağlı olarak üç farklı durum için incelemek mümkündür [118]. Birincisi Şekil 3.7a sistem yükünün hiçbir ara düzenleyicisi olmadan PV panellere bağlandığı durum, direkt bağlantılı PV sistemler, panellerden ışınım şiddetiyle değişen değerlerde çıkan gerilim ve akım, sisteme direkt olarak verilir. Herhangi bir depolama yapılmadığı için sadece D.A yükleri için ve güneş ışınımının olduğu durumlarda yükü beslemek mümkündür. Ayrıca bulutlanma gibi durumlarda da yükün beslenememe durumu söz konusudur.

İkincisi Şekil 3.7c, sistem yükü ile PV paneller arasında akülerin yerleştirildiği durumdur. Bu durumda aküler güneş ışınım şiddetindeki değişimleri direkt olarak sisteme yansıtmadan dalgalanmalardan etkilenmeksizin D.A yükleri beslemek için kullanılabilir. Akülerin depolama kapasitesine ve yükün durumuna bağlı olarak güneş ışınımının olmadığı durumda belli bir süre için aküler depolanan enerjiyi kullanabilir. Ayrıca kullanılan şarj regülatörleri ile akülerin aşırı şarj olmasının önüne geçilebilir. Üçüncü Şekil 3.7b durumda ise alternatif akımda çalışan yüklerin beslenebilmesi için eviriciler kullanılmaktadır.

Her üç sisteminde ortak özelliği şebekeden bağımsız çalışabilmesidir. Bunun yanı sıra Şekil 3.7d şebeke bağlantılı eviriciler ile fotovoltaik sistemlerden elde edilen enerjinin şebekeye aktarılması da mümkündür. Bu durum şebekenin yasal izni olmasıyla mümkündür. Bu durumda her hangi bir depolama söz konusu olmaz.



Şekil 3.7 Fotovoltaik sistemlerin farklı kullanım şekillerine göre sınıflandırılması.

Güneş enerjisinden termal ısı amaçlı kullanımının ötesinde özellikle elektrik üretimi güneş ışınımının daha yüksek olduğu bölgelerde ve sahra gibi çöl veya ekvatora yakın bölgelerde daha ekonomik olmaktadır. Fakat enerjinin tüketim alanlarından uzaklığı ve depolanma gücü nedeniyle elektroliz ile elde edilen hidrojenin taşınmasıyla yararlanılmasının yolları araştırılmaktadır. Özellikle İspanya, ABD ve Portekiz ve Almanya başta olmak üzere birçok ülkede güneş enerjisinden elektrik üretimi amaçlı olarak yararlanılmaktadır.

Günümüzde 30–60 MW'lık güneş elektrik santralleri dünyada işletme halinde bulunmaktadır. Tablo 3.5 ile Avrupa birliğinde 2008–2009 yıllarında 30–60 MW aralığında kurulan ve halen işletmede olan sabit montajlı veya güneş takipli enerji santralleri sıralanmıştır.

Tablo 3.5 2008–2010 yıllarında kurulan fotovoltaik enerji santralleri [119].

Kurulum Yeri	Güç	Kurulum Yılı
İspanya-Olmedilla	60 MW-Sabit yer montajlı	2008
Almanya Strasskirhen	54 MW- Sabit yer montajlı	2009
Almanya-Turrow	53 MW- Sabit yer montajlı	2009
İspanya-Puertollan	50 MW-Sabit yer montajlı	2008
Portekiz-Mouraa	46 MW-Güneş takibi	2008
Almanya-Finsterwalde	42MW- Sabit yer montajlı	2009
İspanya-Trujilo	34.5- Güneş takibi	2008
İspanya	34 MW- Sabit yer montajlı	2008

### 3.6 Piller-Enerji Depolama Teknolojileri

Piller kimyasal enerjinin elektrik enerjisine (ve bunun tersine) çevrildiği yığılı hücrelerden oluşur. Akım seviyeleri ve çıkış gerilimleri, hücreleri seri ve paralel olarak bağlayarak elde edilir. Piller, enerjileri ve güç kapasiteleri açısından derecelendirilir. Çoğu pil tipi için güç ve enerji kapasiteleri bağımsız değildir ve pil tasarımı sırasında belirlenmektedir. Pillerin diğer önemli özellikleri verimlilik, ömür (kullanım döngüsü sayısı), çalışma sıcaklığı, deşarj seviyesi, kendiliğinden boşalma ve enerji yoğunluğudur. Bir pilin işletme yaşam döngüsü boşalma (deşarj) derinliğine ve çalışma sıcaklığına bağlıdır. Genellikle pili tamamen deşarj etmek (% 100 deşarj derinliği) veya ortam sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda çalıştırmak pil ömrünü olumsuz etkiler. Derin deşarj ve yüksek sıcaklıklardan dolayı pil ömrünün ne dereceye kadar azaldığı pil tipine bağlıdır. Örneğin 70 °C üzeri sıcaklıktaki her 10 – 15 °C artışta kurşun-asit pillerinin ömrü yarı yarıya azalır.

Şebekeden bağımsız çalışan yenilenebilir enerji destekli hibrid sistemler için özellikle de güneş-rüzgar kurşun asit akülerin davranışlarının belirlenmesi ve performansı sistemlerin boyutlandırılması açısından oldukça önem taşımaktadır. Oldukça yaygın kullanılmalarına rağmen elektrokimyasal davranışları oldukça beklenmedik şekilde karmaşıktır [120–126]. Bu açıdan farklı tipte matematiksel modeller mevcuttur. Farklı yaklaşımlarla ulaşılan bu modeller farklı karmaşıklık derecesindedir. Tanımlanmış bu yaklaşımlarda karmaşıklık derecesi ve doğruluk arasında bir kolaylık mevcut görülmemektedir. Ayrıca hibrid sistem uygulamalarının çoğunda kurşun asit-aküler farklı çalışma koşullarında çalıştırılmaktadırlar. Deşarj durumu için bir tahmin yapılması mümkün olmadığı için deşarj durumu rüzgar hızı ve güneş radyasyonu gibi değişkenlere bağlıdır ve yüke aktarılması gereken güç miktarının tahmini oldukça güçtür. Bu sebeple oldukça basit ve sistemin şarj ve deşarj durumlarını doğrulukla modelleyen çalışmalar yapılmaktadır.

Özellikle yenilenebilir enerji sistemlerinden elde edilen enerjinin depolanmasında büyük ölçekli güç depolama üniteleri kullanılmaktadır. İlk uygulamalardan olan ve taşınabilir tasarlanmış olan depolama tesisi Phonix elektrik dağıtım sisteminde anlık frekans kontrolünde kullanılmıştır. 200 kW gücü 45 dakika besleyecek şekilde tasarlanmıştır. Güney Kaliforniya Edison Chino alt-istasyonunda (yük düzeltmede ani frekans kontrolü) 1998 yılında kurulan kurşun asit depolama ünitesi 10 MW gücünde, 40 MWh ve yaklaşık % 70–80 verimliliğe sahip deep cycle pillerden oluşmaktadır. Kullanım ömrü, % 70 deşarjda 1000–2000 tekrardır. Kendi kendine deşarj oranı aylık olarak % 2–5'tir [127,128].

Alaska güç kompanzasyon ünitesi, Nikel Kadmiyum (NiCd) 27 MW gücünde 6.75 MWh güç depo kapasitesinde kurulmuştur. Verimi % 72–78 olan sistemin ömrü % 100 deşarjda 3000 tekrardır. Kendi kendine deşarj oranı aylık % 5–20 dir. Çeşitli pil teknolojileri arasında bazıları güç sistemi uygulamaları için daha uygun gözükmemektedir ve bunlar aşağıda verilmiştir [129,130]:

**Kurşun asit:** Kurşun asit pilinin her bir hücresi mikro-gözenekli madde tarafından ayrılan ve sulu sülfürik asit elektrot içine batırılmış pozitif kurşun dioksit elektrotu ve negatif kurşun elektrotundan oluşur.

**Taşmalı tip:** Taşmalı tip pilde sulu sülfürik asit çözeltisi kullanılır. Boşalma sırasında, pozitif elektrottaki kurşun dioksit, kurşun sülfat oluşturmak için sülfürik asitle tepkiyen kurşun oksit'e indirgenir ve negatif elektrottaki sünger kurşun sülfat oluşturmak için sülfürik asitle tepkiyen kurşun iyonlarına oksitlenir. Bu şekilde elektrik üretilmiş olur ve şarj sırasında bu reaksiyon tersine döner.

**Lityum iyon:** bu pillerdeki katot lityumlaştırılmış metal oksittir ve anot tabaka yapılı grafitik karbondan yapılmıştır. Elektrolit organik karbonatlar içinde çözünen lityum tuzlarından oluşur. Pil şarj edildiğinde, katot içindeki lityum atomları iyon haline gelir ve harici elektronlarla birleştikleri karbon

anoda doğru elektrolit yoluyla taşınırlar ve lityum atomları olarak karbon tabakaları arasında biriktirilirlir (çökeltirilirlir). Boşalma (deşarj) sırasında bu işlem tersine döner.

**Akım pilleri:** bu tip piller bir katot, bir anot ve bir membran ayrıcı oluşturan elektrokimyasal hücre yoluyla (pompalarla) elektrotların dolaştırıldığı iki elektrolit rezervuarından oluşur. İki elektrolit akarken, elektrokimyasal hücrede kimyasal enerji elektriğe dönüştürülür. Her iki elektrolit elektrokimyasal hücrenin dışında büyük depolama tanklarında ayrı ayrı depolanır. Tankların büyüklüğü ve elektrolitlerin miktarı pillerin enerji yoğunluğunu belirler. Fakat akım-pillerindeki güç yoğunluğu anot ve katotta meydana gelen elektrot reaksiyon oranlarına bağlıdır. Akım-pillerine sistem içinde iki elektrolitin redoks (indirgenme-oksitleme) reaksiyonuna dayanarak çoğunlukla redoks akım pilleri denir.

Bu piller arasında kurşun-asit pili güç sistemi uygulamalarının çoğunda kullanılan en eski ve en olgun teknolojidir. Li-iyon, NaS ve NiCd pilleri yüksek yoğunluklu pil uygulamalarında önde gelen teknolojileri temsil etmektedir. Bunlar arasında Lityum-iyon gelecekte gelişim ve optimizasyon açısından en büyük potansiyele sahiptir. Küçük boyutu ve düşük ağırlığının yanında Li-iyon pilleri en yüksek enerji yoğunluğunu ve % 100'e yakın depolama verimliliğini sunduğundan taşınabilir cihazlarda uygulama için idealdir. Fakat Li-iyon teknolojisinin bazı olumsuzlukları (pili korumak için özel devreden kaynaklanan imalat zorluğundan dolayı) yüksek maliyeti ve ömrü boyunca derin boşalmanın yıpratıcı etkisidir [130].



## 4. SİSTEM TANITIMI

### 4.1 Bigadiç Kınalı Keklik Tesisinde Kurulan Yenilenebilir Rüzgar-Güneş Hibrid Enerji Sistemi

Projenin uygulandığı Kınalı Keklik Yetiştirme Tesisi Balıkesir Bigadiç'te kurulmuş olup GEF-SGP tarafından desteklenmiştir. Küresel Çevre Fonu (Global Environment Facility -GEF), BM Kalkınma Programı (UNDP), BM Çevre Programı (UNEP) ve Dünya Bankası tarafından yönetilen, ortak bir çevre programıdır. GEF'in misyonu küresel çevrenin korunmasıdır. Yerel ile küresel çevre sorunları, ulusal ile uluslararası kaynaklar arasındaki bağı kurmayı amaçlar. Görevi, 1992 yılında Rio de Janeiro'da düzenlenen Dünya Zirvesi çıktılarına dayanır. Dört odak alandaki biyolojik çeşitlilik, iklim değişikliği, uluslararası sular ve ozon tabakasının delinmesi gibi projelere fon sağlayarak küresel çevre faydalar sağlamak amacı ile kurulan ve bu çerçevede içerisinde projelere destek sağlamaktadır.

Tesis, "Alaçam Dağlarında Sürdürülebilir Yaban Yaşam" projesi kapsamında yaşama geçmiş çok amaçlı bir tesis konumundadır. Tesis ilk hedefi sürdürülebilir bir yaşam unsuru olarak kınalı keklik yetiştirme ve bölgedeki kınalı keklik popülasyonunu koruma amaçlıdır.

- Tesis, dokuz dönüm arazi içerisinde kurulu yaklaşık 180 m<sup>2</sup> kapalı alandan oluşur.
- Tesis, keklik alıştırma volyeri, damızlıkhane, kuluçka ve palaz büyütme, bakıcı odası gibi bölümlerden oluşmaktadır.
- Tesisin 2009 yılında ürettiği keklik sayısı yaklaşık 2000 adettir.
- Tesisin nihai hedefi toplam 9000 kekliğin yaşam alanına kazandırılmasıdır.

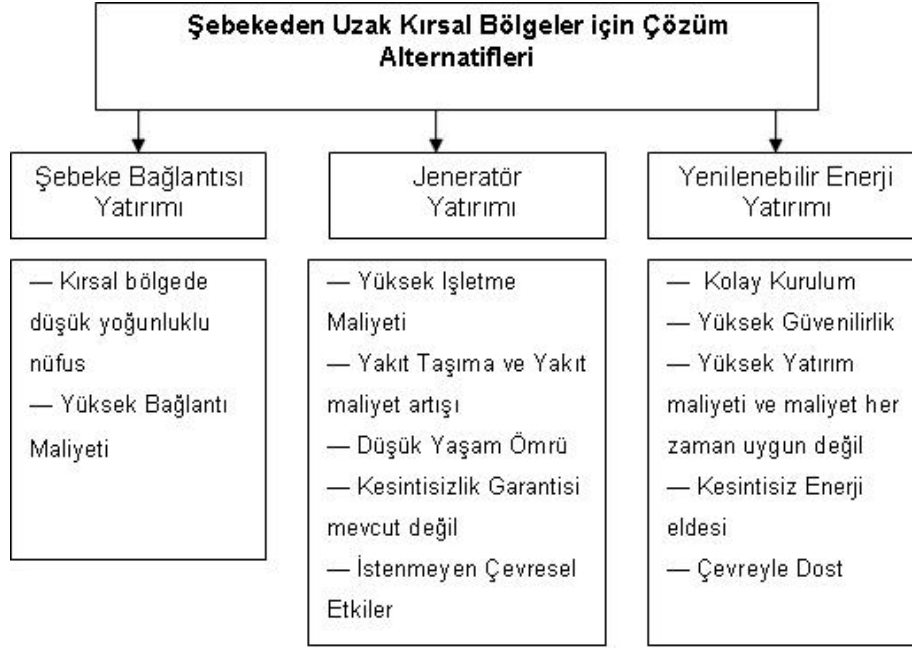
Şekil 4.1'de Bigadiç'te kurulan yenilenebilir enerji sisteminin genel görüntüsü ve kınalı keklik üretim tesisinin fotoğrafı yer almaktadır.



Şekil 4.1 Bigadiç'te kurulan yenilenebilir enerji sisteminin genel görüntüsü

Tarım ve hayvancılık açısından, enerji kullanımı ve enerji maliyetleri oldukça önemlidir. Son yıllarda çiftliklerde yenilenebilir enerji kaynaklı biyoyakıt, güneş ve rüzgar esaslı elektrik üretimi kullanımı başlamıştır. Fakat yine de toplam enerji gereksiniminin çok altındadır. Balıkesir ilinde hayvansal üretim potansiyeli oldukça yüksek olup, 75 000 000 civarında kümes hayvanı mevcuttur. İlin canlı hayvan varlığı içinde tavuk % 30'luk payla ikinci sırada yer almaktadır. Pazarlanan hayvansal ürün içinde ise beyaz et % 54'lük payla birinci sırada bulunmaktadır. Balıkesir ili, hayvansal ürünler üretim değeri sıralamasında Türkiye'de birinci sırada ve toplam tarımsal üretim değeri sıralamasında üçüncü sırada yer almaktadır [131]. Bu açıdan bakıldığında Balıkesir ve çevresinde çiftlikler için bu uygulama örnek bir uygulama olarak boyutlandırılmada kullanılabilecektir.

Genellikle çiftlikler için yer seçiminde enerji ihtiyacı düşünülerek şebeke hattına yakın yerler seçilmektedir. Bu durum ise arazi açısından ilk yatırım maliyetini arttırmaktadır. Şebekeden uzak alanlarda ise arsa fiyatlarının daha düşük olması nedeni ile tercih edilmekte, fakat belirli mesafeden sonra elektrik hattı döşemesi yatırım maliyetini yükseltmektedir. Böyle durumlarda genellikle, dizel jeneratör kullanılarak yatırım maliyeti düşürülmeye çalışılmaktadır. Ancak bu durumda da işletme maliyetleri artmaktadır. Şebekeden uzak kırsal bölgeler için farklı çözüm alternatifleri Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2 Şebekeden uzak bölgeler için enerji alternatifleri

Tasarlanan sistemde güneşten ve rüzgardan elde edilen enerjileri, elektrik enerjisine dönüştürmek amacıyla 6 adet güneş panelinden oluşan 1 kWp gücünde fotovoltaik paneller ve 10 kW gücünde rüzgar türbini kurulmuştur.



Şekil 4.3 Rüzgar türbini için hazırlanan beton kaide ve temelin yerleşimi.

Rüzgar türbinini yerine montajı için 2.5 m x 2.5 m x 2.5 m ölçülerinde temel kazılarak rüzgar türbinin üzerine yerleştirileceği örme direğin montajı için metal kaide temelin içerisine yerleştirilerek ankrajı yapılarak beton atılarak temel çukuru kapatıldı. Yaklaşık 1 ton ve 15 m uzunluğunda olan direk kaidesine ait resimler Şekil 4.3’de verilmiştir.

Temeli tamamlanan rüzgar türbini ve direği vinç yardımıyla yerine monte edilmiştir (Şekil 4.4). Burada türbinin ürettiği A.A gerilimin köprü diyotlara oradan akü gruplarına aktarımı için kullanılan iletkenler ve kanat eğim açısı kontrolünün sağlanması için türbin kanatlarının kontrolünü sağlayacak besleme ve akü şarj geriliminin ölçülmesini sağlayan kablolar depo odasına bağlantısı yapılmıştır (Şekil 4.5).



Şekil 4.4 Rüzgar türbini, ekipmanları ve direğinin montajı.

Şekil 4.6 da görüldüğü gibi ekipmanların konulduğu alan yaklaşık 9 m<sup>2</sup> olup bu alanda 20 adet 12 V, 200 Ah aküler, 5 kW tam sinüs evirici, şarj kontrol ünitesi, ölçüm sistemleri ve akım gerilim ölçüm sensörleri bulunmaktadır. Ekipmanların bulunduğu odanın üst kısmında güneş panelleri ve meteorolojik ölçüm donanımları bulunmaktadır.

Fotovoltaik panellerin birbirine gölgeleme yapmadan güneşi en iyi görebileceği kuzey-güney doğrultusuna 40° açı ile sabit montaj ile yerleştirilmiştir.



Şekil 4.5 Evirici, aküler ve kontrol sistemlerinin yerleşimi.



Şekil 4.6 Rüzgar türbinin montaj görüntüsü.

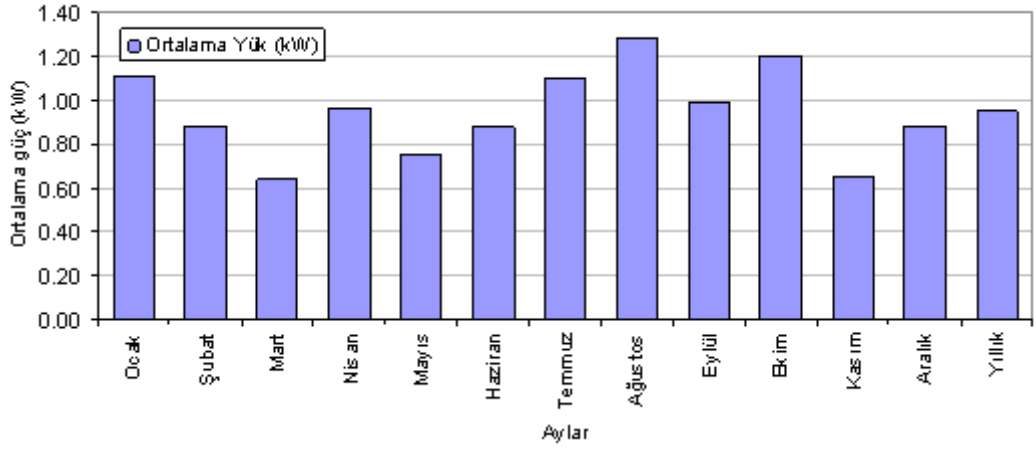
#### 4.1.1 Elektriksel ve Meteorolojik Ölçüm Sistemi

Rüzgar ve güneş hibrid enerji sisteminin performansının belirlenmesinde ve ekonomikliğinin değerlendirilmesi için arazinin topografik yapısı da göz önüne alınarak uygun nokta veya noktalara rüzgar gözlem istasyonu (RGİ) kurulmalıdır. RGİ'lerindeki bir ölçüm direği üzerine yerleştirilmiş ölçüm aletleri ile standartlara uygun olarak yapılan rüzgar hızı, rüzgar yönü gibi ölçümler rüzgar enerji santralı projesinin daha sonraki aşamaları olan verilerin değerlendirilmesi, enerji üretim miktarının belirlenmesi performansının değerlendirilmesinde oldukça önemlidir. Tesisteki elektriksel verilerin ölçümünün yapıldığı sistemin yanı sıra meteorolojik değerlerin ölçülerek kayıt edildiği ölçüm istasyonu kullanılmıştır.

Tablo 4.1 Tesisin elektrik enerji ihtiyacı ve kullanılan cihazlar.

Cihaz	Adet	Güç (W)	Toplam Güç (W)
Kuluçka Makinesi	2	650	1300
Kuluçka Isıtma	1	500	500
Buzdolabı	1	250	250
Buzdolabı	1	200	200
İç Aydınlatma	3	36	108
Dış Aydınlatma	7	36	252
Günlük Ortalama (kW)			15.33
Aylık Ortalama (kW)			450
Tepe Yük (kW)			2.4

Tesisteki yük durumu incelenerek, mevcut elektriksel cihazların sınıflandırılması yapılarak Tablo 4.1 ile gösterilmiştir buna ve yaz-kış çalışma süreleri dikkate alınarak belirlenen yük profili Şekil 4.7 ile verilmiştir.



Şekil 4.7 Tesisin yıllık bazda yük profilinin değişimi.

Sistem performansını belirlemek için meteorolojik ölçümlerin dışında sistemde üretilen akım gerilim değerleri ölçülerek kayıt edilmiştir (Şekil.4.8).



Şekil 4.8 Rüzgar-Güneş-Akü ölçüm sistemi.





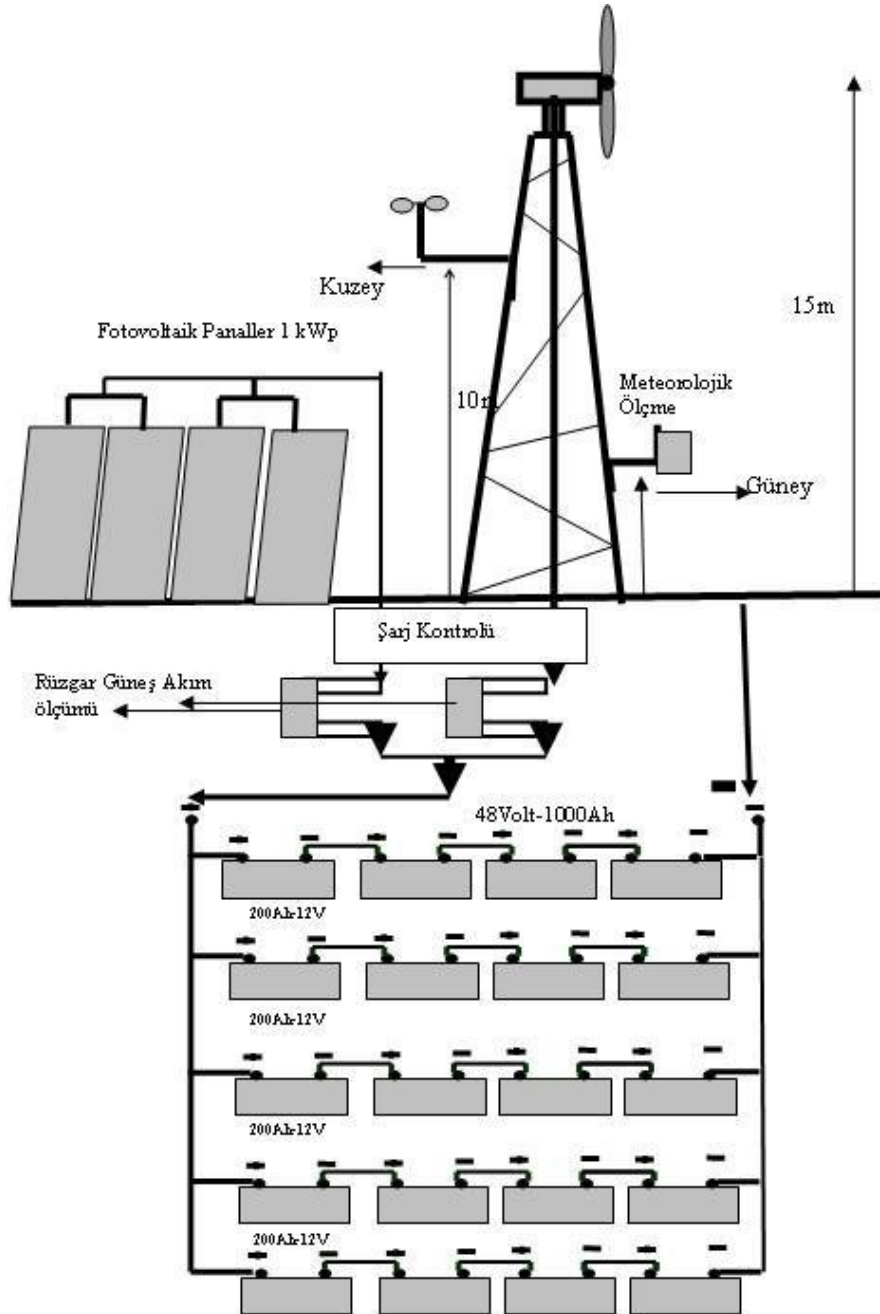
Şekil 4.9 Rüzgar türbininin akü ve ölçüm sistemine bağlantısı.

Gerek rüzgar hız ve yön ölçüm sistemi olsun gerek rüzgar türbini, akü sistemi olsun ölçümlerden elde edilen veriler kayıt sistemi ile saatlik olarak kayıt edilmiştir (Şekil 4.9 ve Şekil 4.10).



Şekil 4.10 Rüzgar hız ölçüm sisteminin montajı.

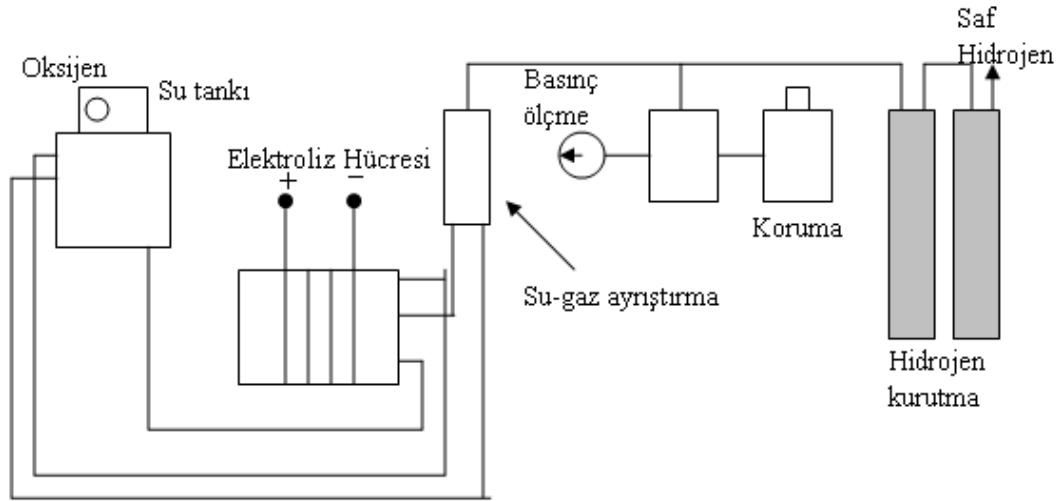
Ölçüm sistemi saatlik ölçüm verilerini ACS 750 ve ACS 200 akım sensörleri kullanarak gerilim değerleri ise gerilim bölücü yardımıyla ölçülerek EPROM üzerine kayıt yapılmıştır. Tüm ölçümler D.A. barasına giriş ve aküden çıkış noktasında yapılmıştır. (Şekil 4.11)



Şekil 4.11 Yenilenebilir enerji sisteminin ölçüm şeması.

## 4.2 PEM Elektroliz Sistemi

Hidrojen üretici olarak QL-150 PEM tipi hidrojen üretici kullanılmıştır [134]. Performansı deneysel ve modelleme yoluyla analiz edilmiştir. Bunun için akım gerilim ve sıcaklık ölçümlerini okuyarak seri port yardımı ile bilgisayara aktarılmıştır. 10 bit analog çözünürlüğü kullanılan 16F877 mikrokontrolör ile akım sensörü olarak Allegro ACS-750 [135] ve sıcaklık sensörü olarak dijital Dallas DS-1620 kullanılmıştır (Şekil 4.12). Bir dakikalık ölçüm aralıklarında veriler seri port yolu ile bilgisayara kayıt edilmiştir. Sistem modellemesinde Matlab-Simulink yazılımı kullanılmıştır [136].



Şekil 4.12 QL-150 PEM Elektroliz cihazının prensip şeması.

QL-150 PEM tipi elektroliz ünitesi Şekil 4.10'da görüleceği üzere su besleme tankı, elektroliz hücresi, su-gaz ayırma, basınç kontrol ve ölçüm, hidrojen kurutma ve valflerden oluşmaktadır. Verilerin ölçüldüğü ve kayıt edildiği sistem Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.13 PEM sisteminin performans ölçümüne yönelik mikrokontrolör denetimli ölçüm sistemi.



Şekil 4.14 Ölçüm sistemiyle birlikte PEM elektroliz cihazı.

Rüzgar türbini, fotovoltaik sistem, şarj regülatörü, evirici, aküler gibi deneysel ölçümlerde kullanılan ekipmanlara ait cihazların teknik özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2 Deneysel ölçümlerde kullanılan cihazların özellikleri.

Eleman	Özellikleri
Rüzgar Türbini	Güç:10kW Kanat uzunluğu: 2.05 m Güç Kontrolü: Kanat Eğim Açısı
Fotovoltaik Sistem [137]	Sabit çatı üstü montajlı 1 kWp Eğim açısı 40° Kyocera 170 Wp 6 Adet
Şarj Regülatörü	1 Adet 48 V 40 A
Evirici	5 kW 48 V DA giriş A.A 220 V 1 fazlı 50 Hz sinüs çıkış
Aküler	20 adet kurşun asit 12 V 200 Ah 48V DA barada 48 kWh
Elektroliz	QL-150 PEM tipi 150 ml/dak H <sub>2</sub> üretim kapasitesi %99,999 saflıkta H <sub>2</sub>

## 5. MODELLEME ve ANALİZ

### 5.1 Ekserji Analizi

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

Ekserji, enerjinin faydalılığının, kalitesinin bir ölçüsüdür ve bir maddenin çevreyle etkileşim potansiyelinin etkin bir ölçümüdür. Ekserji analizi ile işlemin geliştirme olanakları ve sistem bileşenlerindeki tersinmezliklerin dağılımı hakkında bilgi edinilebilir. Böylece sistemdeki tersinmezlikler belirlenebilmekte, enerji kayıpları minimize edilebilmekte ve enerjinin daha verimli kullanımı sağlanabilmektedir [139].

İşlem süresince gerçekleşen ekserji tüketimi, işleme ilişkin tersinmezlikler nedeniyle aratılan entropi ile orantılıdır. Mevcut sistemde iyileştirmelere nereden başlanacağıının 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 [140]. Tablo 5.1 ile enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 5.1 Enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması [140].

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

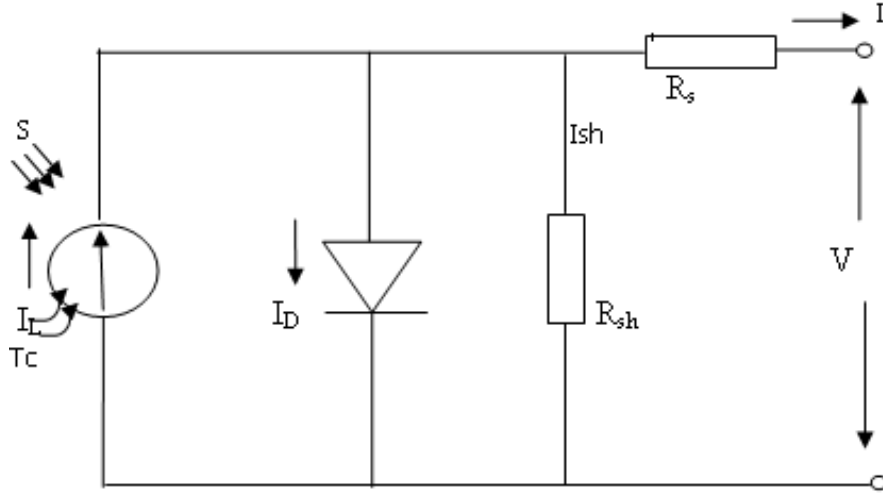
Ekserji analizleri, enerji analizlerinden uygulamaya yönelik ve daha uygulanabilir sonuçlar vermektedir. Ekserji analizi [141]:

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

## 5.2 Fotovoltaik Sistemin Analizi

### 5.2.1 Fotovoltaik Sistemlerin Modellenmesi

Fotovoltaik sistemler, gelen ışınlar sayesinde foton akım ve gerilimi oluşturan geniş alanlı düz beslemeli diyotlardır. Bir fotovoltaik sistemin akım gerilim karakteristiğini anlamak için tek diyotlu eşdeğer devresini iyi analiz etmek gerekir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 Fotovoltaik hücrenin tek diyotlu modeli.

Şekil 5.1 incelendiğinde foton akımı  $I_L$ , diyot akımı  $I_D$  ve paralel koldan akan akım  $I_{sh}$  olmak üzere toplam panel çıkış akımı Denklem 5.1 ile verilmiştir [142].

$$I = I_L - I_D - I_{sh} \quad (5.1)$$

Foton akımı güneş radyasyonuna ve kısa devre akımına bağlı değişirken aynı zamanda hücre sıcaklığı ve referans sıcaklık ( $T_R=25^\circ\text{C}$ )



farkından elde edilen değer ile kısa devre akımının sıcaklık katsayısıyla çarpımıyla değişmektedir ve Denklem 5.2 ile hesaplanabilir.

$$I_L = I_S \cdot S_N + I_t (T_{hüc} - T_R) \quad (5.2)$$

Normalize güneş radyasyonunu, Denklem 5.2'de kullanabilmek için radyasyon değeri bine bölünerek elde edilir.

$$S_N = \frac{St}{1000} \quad (5.3)$$

Modelin sıcaklığa bağlı değişimi için diyot akımı, diyot doyma akımı  $I_0$  için Denklem 5.4 verilmiştir [142].

$$I_D = I_0 \cdot \left( e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_S)}{A \cdot k \cdot T_c}} - 1 \right) \quad (5.4)$$

Burada diyot doyma akımının çalışma noktasındaki değerini bulmak için aşağıdaki Denklem 5.5 kullanılır [142].

$$I_0 = I_{0r} \cdot \left( \frac{T_r}{T_{hüc}} \right)^3 \cdot e^{\frac{q \cdot E_g}{A \cdot k} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_{hüc}} \right)} \quad (5.5)$$

Paralel direnç akımı denklemlerle verilmiştir ve toplam fotovoltaik akım foton akımından diyot akımı ve paralel akım değerinin çıkartılmasıyla Denklem 5.6 ile elde edilir.

$$I = I_S \cdot S_N + I_t \cdot (T_{hüc} - T_r) - I_D - I_{sh} \quad (5.6)$$

$$I_{sh} = \frac{V + I \cdot R_S}{R_{sh}} \quad (5.7)$$

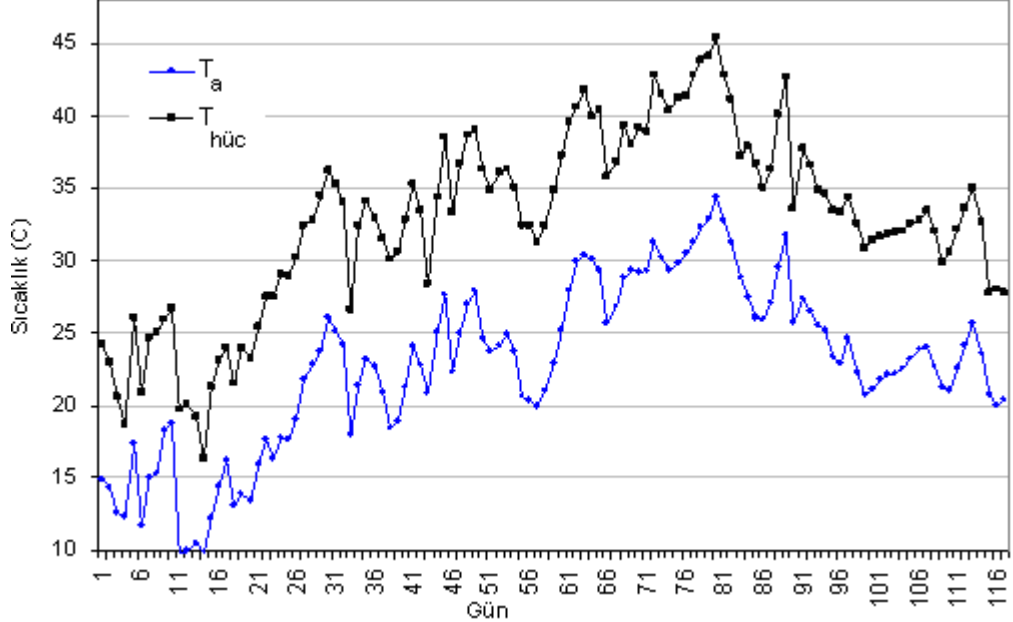
Fotovoltaik panellerden akım akmadığı yüksüz durum için açık devre gerilimi  $V_{ad}$ ,  $K_v$  panel açık devre geriliminin sıcaklığa bağlı sabitesi olmak üzere Denklem 5.8 kullanılarak hesaplanır [143].

$$V_{ad} = V_{ad,n} + K_v \cdot (T_a - T_r) \quad (5.8)$$

Ayrıca hücre sıcaklığı, ortam sıcaklığı, güneş ışınımına ve normal çalışma hücre sıcaklığı ile nümerik olarak Denklem 5.9 ile elde edilir [143].

$$T_{hüc} = T_a + \frac{S_t}{800} (NOCT - 20) \quad (5.9)$$

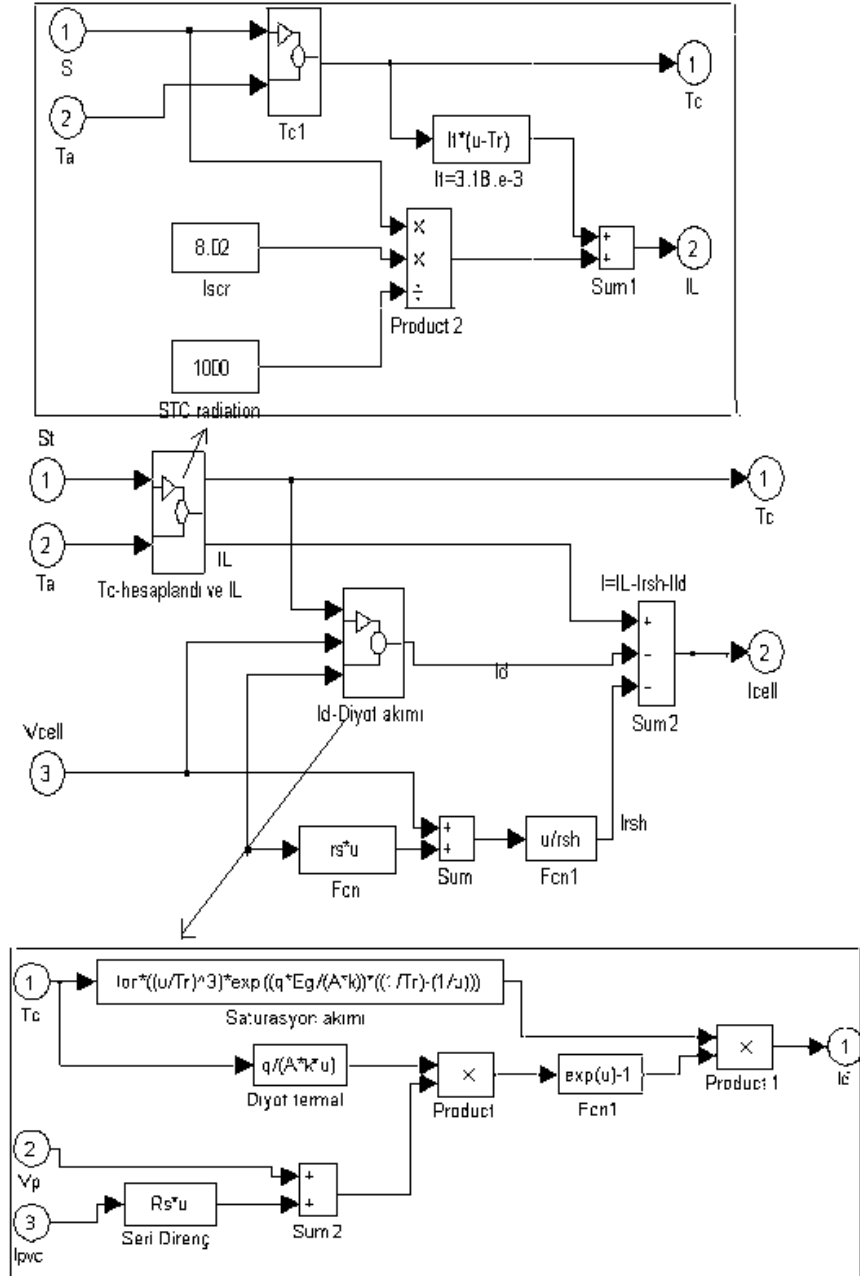
Hücre sıcaklığının ortam sıcaklığına bağlı olarak değişimi Şekil 5.2 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Fotovoltaik panellerin hücre sıcaklığının ortam sıcaklığı ile değişimi.

Fotovoltaik sistemin yukarıda verilen denklemler ile oluşturulan Matlab-Simulink simülasyon modeline ait şema Şekil 5.3'te verilmiştir. Farklı güneş

ışınım ve ortam sıcaklıklarında çalışmasının modellendiği fotovoltaik sistem ile enerji ekserji hesaplamalarında mümkündür.



Şekil 5.3 Fotovoltaik panel için Matlab-Simulink blokları.

## 5.2.2 Fotovoltaik Sistemlerde Enerji ve Ekserji Analizi

Fotovoltaik sistemlerin enerji verimlerinin hesaplanması sistem performansının belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Ancak hesaplanmasında bazı güçlükler söz konusudur. Verim, sistemde üretilen toplam elektrik enerjisinin maksimum değerinin, birim alana düşen toplam güneş ışınımına oranı olarak Denklem 5.10 ile hesaplanır. Buda sadece fotovoltaik panellerden elektrik üretildiği anlar için uygun olmaktadır. Ayrıca hücre sıcaklığı, ortam sıcaklığı, ısı kapasitesi gibi parametreler direk olarak hesaba katılmamaktadır. Bu noktada daha kapsamlı ve daha fazla ortam parametresi ile hesaplama yapılabilen ekserji veriminde ise bu parametreler direk olarak hesaba katılmaktadır. Fotovoltaik sistemlerin enerji verimleri panel çıkış akım ve geriliminin maksimum değerlerinin, yüzeye gelen toplam güneş radyasyonuna oranı olarak Denklem 5.10 ile hesaplanmaktadır [69]:

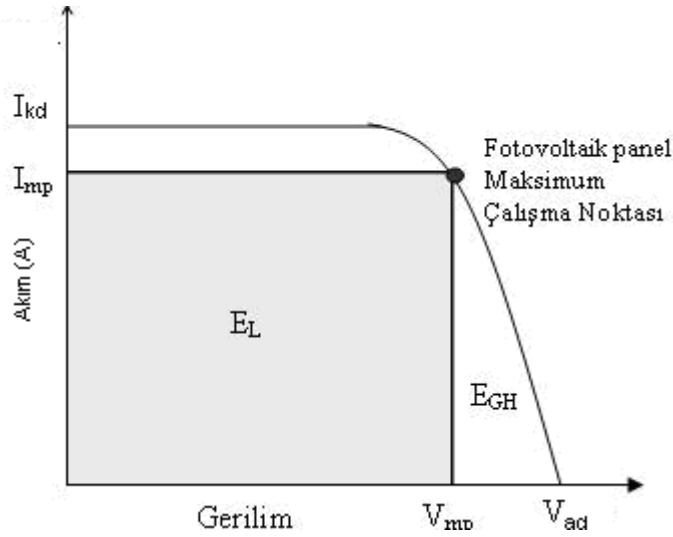
$$\eta = \frac{V_m \cdot I_m}{S_t \cdot A} \quad (5.10)$$

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

Fotovoltaik veya termal kolektörlü sistemlerde ekserji analizinin esas amacı: (a) ısı ve kimyasal işlemlerin termodinamik hatalarının sebeplerini değerlendirmek, (b) enerji sistemlerindeki atık ve kayıpların gerçek değerleri, tipleri ve gerçekleştiği yerleri belirlemek (c) mevcut enerji sistemlerindeki etkinsizlikleri azaltarak, daha etkin sistem tasarım yöntemlerini geliştirmektir [138].

Fotovoltaik panellerin performansı dış ortam sıcaklığı, güneş ışınımı, hücre yüzey sıcaklığı gibi ortam şartlarının yanı sıra toplam ısı kayıp sabiti,

açık devre gerilimi, kısa devre akımı, maksimum akım, maksimum gerilim ve yüzey alanı gibi çalışma ve tasarım parametrelerine bağlıdır. Sistemin performansı, genellikle enerji ve ekserji verimi olarak hesaplanmaktadır. Ancak enerji analizi temel olarak enerjinin miktarıyla ilgilendiğinden 1 W ısı enerjisini 1 W elektrik enerjisine eşit olarak kabul eder. Ekserji analizi ise bu bakış açısının ötesinde, proseslerin performansı açısından daha gerçekçi sonuçlar vermektedir ve bazı durumlar için enerji ve ekserji verimleri farklılık göstermektedir [141].



Şekil 5.4 Fotovoltaik panelin maksimum çalışma noktası [141].

Şekil 5.42de görüldüğü gibi fotovoltaik sistemden elde edilen maksimum elektrik gücü  $E_L$ , akımın maksimum değeri ile gerilimin maksimum değerinin çarpımı olarak doğrudan yazılabilir. Kullanılmayan termal ekserji, panel yüzeyi ve çevre sıcaklığı arasında gerçekleşen ısı transferinin kullanılabilir işe çevrilmesiyle hesaplanabilir ve ekserji yıkımı olarak ifade edilebilir.  $(V_{ad}I_{kd} - V_mI_m)$  terimi elektriksel ekserji yıkımını ifade eder.

Fotovoltaik panelde gerçekleşen ekserji transferi Denklem 5.11 ve 5.12 ile hesaplanabilir [72].

$$\sum \dot{E}x_g = \sum \dot{E}x_\zeta + \sum \dot{E}x_d + \sum \dot{E}x_k \quad (5.11)$$

$$\dot{E}x_\zeta = \dot{E}x_m - \sum \dot{\Gamma} - \sum \dot{E}x_k \quad (5.12)$$

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

$$\dot{E}x_m - \sum \dot{\Gamma} = V_{ad} I_{kd} - (V_{ad} I_{kd} - V_m I_m) = V_m I_m \quad (5.13)$$

Isı kaybı  $Q$  ise çevreye ısı enerjisi olarak atılmaktadır. Değeri ise Denklem 5.14 ile hesaplanabilir.

$$Q = h_c \cdot A \cdot (T_{hüc} - T_a) \quad (5.14)$$

Çevreye olan ekserji kaybını hesaplamak için, ısı taşınım katsayısı nümerik olarak  $h_c = 5.7 + 3.8 \cdot V$  olarak ifade edilmiş ve aşağıdaki Denklem 5.15'te kullanılmıştır [72].

$$\sum \dot{E}x_k = \left(1 - \frac{T_0}{T_{hüc}}\right) \cdot [(5.7 + 3.8 \cdot V) \cdot A \cdot (T_{hüc} - T_a)] \quad (5.15)$$

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

$$\dot{E}x_\zeta = V_m \cdot I_m - \left(1 - \frac{T_0}{T_{hüc}}\right) \cdot [h_c \cdot A \cdot (T_{hüc} - T_a)] \quad (5.16)$$

Ekserji veriminin hesaplanabilmesi için sistemin çıkış ekserjisinin yanı sıra sisteme güneşten gelen giriş ekserjisinin hesaplanması gerekmektedir. ve Denklem 5.17 ile hesaplanır [72].

$$\dot{E}x_g = S_i \cdot A \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_G}\right) \quad (5.17)$$

Fotovoltaik panellerin ekserji verimi çıkış ekserji değerinin giriş ekserji değerine oranı olarak Denklem 5.18 ile hesaplanabilir [72].

$$\psi_{PV} = \frac{\dot{E}x_\zeta}{\dot{E}x_g} = \frac{V_m \cdot I_m - \left(1 - \frac{T_0}{T_{hüc}}\right) \cdot [h_c \cdot A \cdot (T_{hüc} - T_0)]}{S_i \cdot A \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_G}\right)} \quad (5.18)$$

### 5.3 Rüzgar Türbininin Analizi

#### 5.3.1 Rüzgar Türbininin Modellemesi

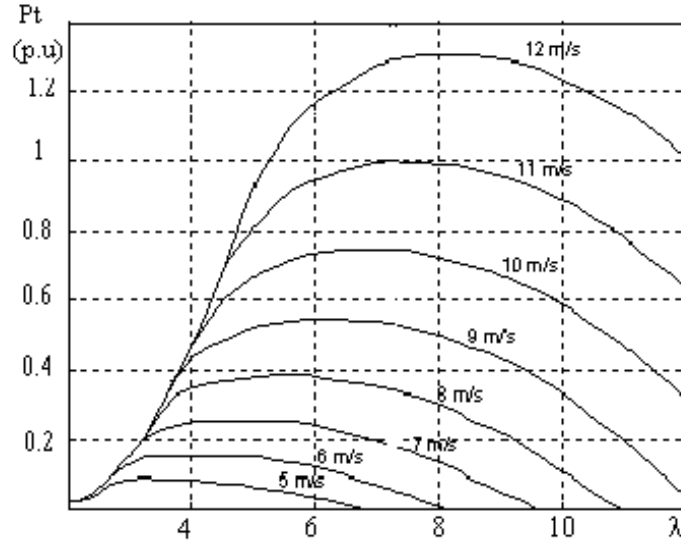
Rüzgar, atmosferdeki hava kütlelerinin, ana enerji kaynağı olan güneş tarafından farklı ısıtılması sonucu bozulan ısıl dengenin sağlanması için hava kütlelerinin hareket etmesi olarak tanımlanır. Rüzgardan elde edilen güç  $P_w$ , rüzgar hızı  $V$ , hava yoğunluğu  $\rho$  ve yer düzlemine dik süpürme alanı  $A$  'nın değişimiyle Denklem 5.19 ile ifade edilir [144].

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (5.19)$$

Hareket eden hava kütleindeki mevcut enerjinin tümünü elde etmek mümkün değildir. Betz 1926, bir rüzgar türbinden elde edilebilecek teorik maksimum güç katsayısını % 59 olarak hesaplamıştır. Betz tarafından hesaplanan maksimum güç katsayısına, rüzgar türbinine giren rüzgarın, hızının 2/3'ünü türbinden çıkarken kaybetmesi durumunda ulaşılır. Ancak

uygulamada rüzgar türbinlerinde bu oran sağlanamaz. Buna bağlı olarak güç katsayısı daha küçük olur. Rüzgar türbininin gücü  $P_{wt}$ , rüzgar türbinin güç katsayısı  $C_p$ 'nin rüzgar gücü  $P_w$  ile çarpımı olarak ifade edilebilir [144].

$$P_{wt} = C_p \cdot P_w \quad (5.20)$$



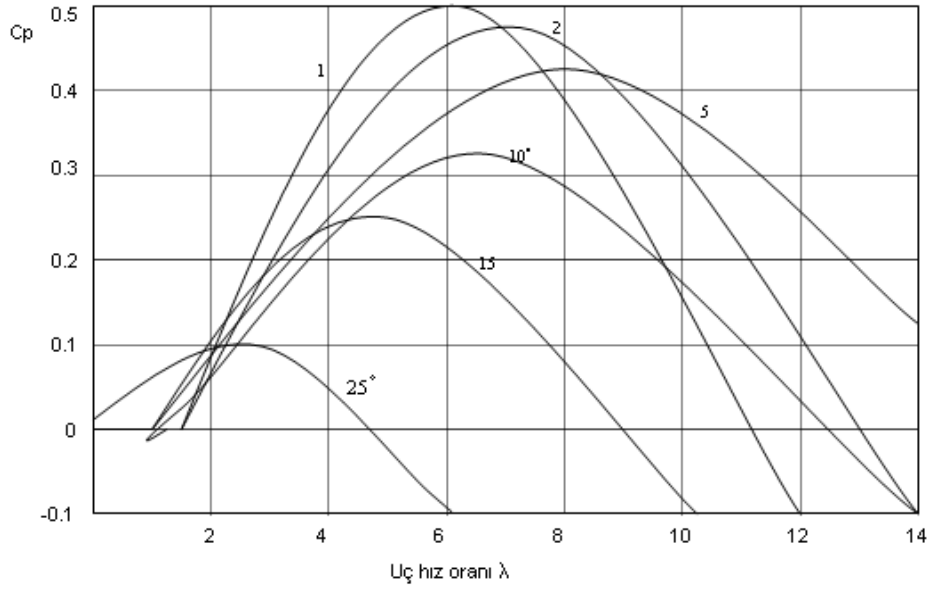
Şekil 5.5 10 kW gücünde dikey eksenli bir rüzgar türbininin çıkış gücünün farklı rüzgar hızlarında uç hız oranıyla değişimi.

Buradaki her bir eğri, farklı rüzgar hızlarına aittir. Şekil 5.5'te görüldüğü gibi rüzgar hızı sabitken maksimum güç, sadece belli açisal hız değerinde sağlanmaktadır.

Rüzgar hızının ve şaft hızının bir fonksiyonu olan güç katsayısı  $C_p$  sabit bir çalışma noktasında, sabit bir kanat eğimi için, bir oran olarak ifade edilebilir. Türbin kanat ucu hızı  $v_p$ , rüzgar hızı  $V$ , türbinin açisal hızı  $w_t$  olmak üzere uç hız oranı  $\lambda$  olarak ifade edilen boyutsuz sabit Denklem 5.21 ile aşağıdaki gibi yazılabilir [144].

$$\lambda = \frac{v_p}{V} = \frac{w_t \cdot R}{V} \quad (5.21)$$





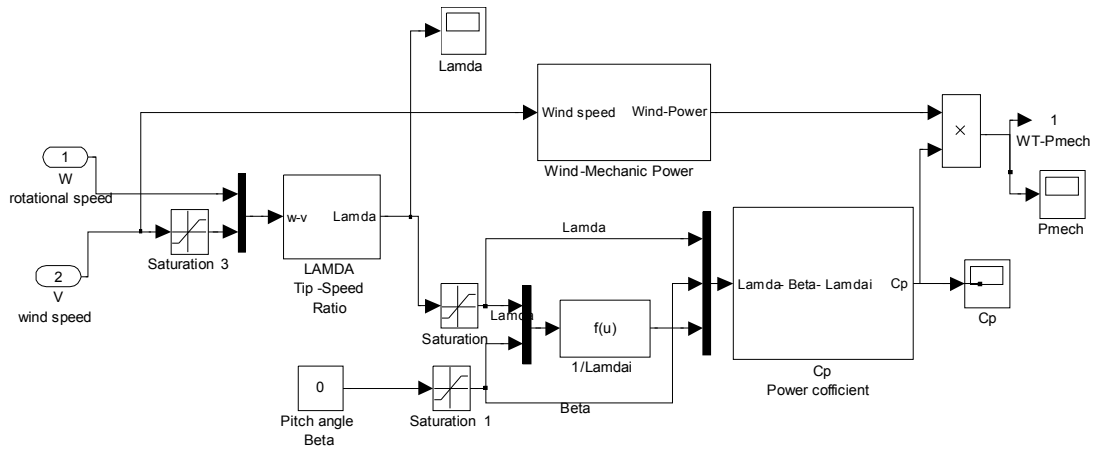
Şekil 5.6 Güç katsayısının kanat eğim açısına ve uç hız oranıyla değişimi.

Uç hız oranınının değişimine bağlı olarak çizilen 10 kW gücündeki dikey eksenli bir rüzgar türbinin güç katsayısının değişimi Şekil 5.6'da çizilmiştir. Farklı rüzgar hızı için çizilen eğrileri tek bir eğri ile ifade edebilmek için güç ve açısal hız parametrelerini boyutsuzlaştırıp, güç yerine güç katsayısı, açısal hız yerine de uç hız oranı parametrelerini kullanılır. Rüzgâr hızının ve şaft hızının bir fonksiyonu olan güç katsayısı sabit bir çalışma noktasında, sabit bir kanat eğimi için, bir oran olarak ifade edilebilir. Güç katsayısının  $C_p(\lambda, \vartheta)$ , uç hız oranı ve kanat eğim açısının bir fonksiyonu olarak yazarak farklı kanat eğim açılarında ve uç hız oranında mevcut olan güç katsayısını Denklem 5.22'den yararlanarak Şekil 5.6 gibi çizilebilir [109].

$$C_p = 0.22 \cdot \left( \frac{116}{\lambda} - 0.4 \cdot \vartheta - 5 \right) \cdot e^{\frac{-12,5}{\lambda i}} \quad (5.22)$$

$\lambda i$ , uç hız oranının ve kanat eğim açısına bağlı olarak Denklem 5.23 ile hesaplanır ve Denklem 5.22'de yerine konulur.

$$\frac{1}{\lambda i} = \frac{1}{\lambda + 00.8 \cdot \vartheta} - \frac{0.035}{\vartheta^3 + 1} \quad (5.23)$$



Şekil 5.7 Rüzgar türbinin Matlab-Simulink modeli.

### 5.3.2 Rüzgar Türbininin Enerji ve Ekserji Analizi

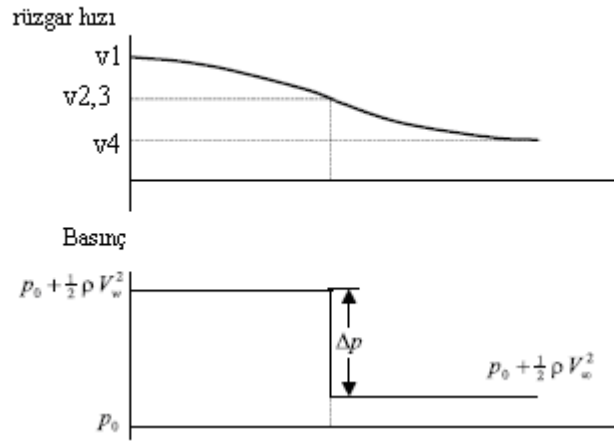
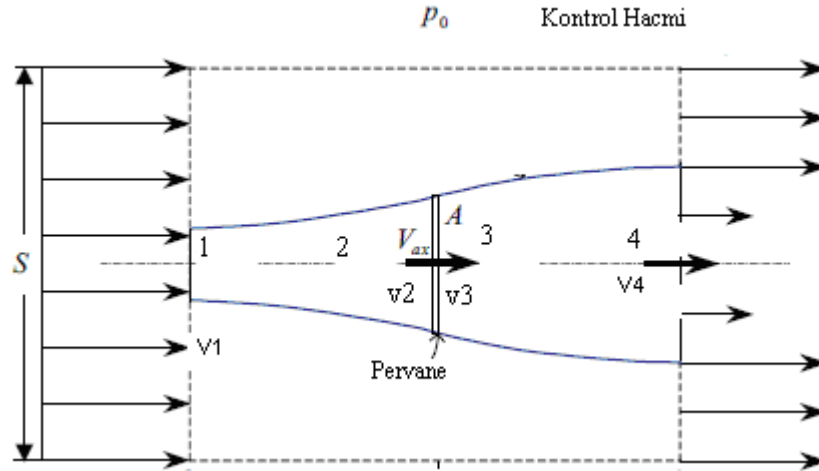
Akış diyagramı aşağıda verilen sistemin silindirik kontrol hacminin kesiti  $S$ , rotor diskinin alanı  $A_1$ ,  $\rho$  hava yoğunluğu olmak üzere 0 noktasında statik basınç  $p_0$  rotora gelen rüzgar hızı  $V_1$ 'dir. Rüzgarın rotora ulaşmasıyla var olan kinetik enerji rotora aktarılır. Şekil 5.8 ile rüzgarın rotora akış yüzeyleri gösterilmiştir.

$$V_2 = V_3 = (2/3) \cdot V_1 \quad (5.24)$$

Gelen rüzgar hızı, türbinin dönüşü esnasında endüklenen hız sebebiyle yavaşlar, serbest halde gelen rüzgar hızından  $v$  kadar yavaşlar. Türbinin rotorunu terk ettiği haldeki hız değeri ise bu değerden de daha düşük bir değerde  $V_4$  olacaktır [144].

$$V_4 = (1/3) \cdot V_1 \quad (5.25)$$

Rüzgar türbinine giriş ve çıkış esnasında rüzgar hızı hava akışının genişlemesiyle birlikte azalır. Hava akışındaki genişleme ise aşağıdaki gibi ifade edilir.



Şekil 5.8 Pervanenin önünde ve arkasında rüzgar hızı ve dönüşe bağlı olarak basınç ve sıcaklık ve hava akışındaki değişimler

$$A_2 = A_3 = (3/2).A_1 \quad (5.26)$$

Denklem 5.25 ile rüzgar hızında yaşanan yavaşlama oranı akışın genişlemesine bağlı olarak oluşmaktadır. Bu değer Betz limiti değerine karşılık gelir ve türbinin maksimum verimde çalıştığı noktaya karşılık gelir.

$$A_4 = 3A_1 \quad (5.27)$$

Rüzgar türbininin kanatlarının süpürdüğü alandan geçen hava kütle akış miktarı aşağıdaki denklem ile hesaplanır [80].

$$\dot{m} = \left(\frac{2}{3}\right) \cdot \rho \cdot A_2 \cdot V_1 \quad (5.28)$$

Yapılan çalışmada, ayrıca havanın özgül ağırlığı ekserji ve enerji hesaplamalarında sabit değer olarak alınmamıştır. Bu değer Denklem 5.29 ile ölçülen ortam sıcaklığı ve atmosfer basınç değeri kullanılarak hesaplanmıştır [144].

$$\rho = \frac{P_{atm}}{0.287 \cdot T_a} \quad (5.29)$$

Rüzgar türbininin girişinde ve çıkışındaki dinamik basınç değerleri ise aşağıdaki formül kullanılarak ölçülen atmosfer basıncı yardımıyla hesaplanmıştır [78].

$$P_1 = P_{atm} + \rho \cdot \frac{V_1^2}{2} \quad (5.30)$$

$$P_2 = P_{atm} + \rho \cdot \frac{V_2^2}{2} \quad (5.31)$$

Rüzgarın soğutma etkisi sıcaklığın insan vücudu üzerindeki etkisi ile rüzgarın genel ortama etkisinin dikkate alınmasıyla hesaplanan sıcaklık değeridir. Rüzgar soğutma endeksi vücudun ortalama ısı kaybı ile sıcaklığın nasıl hissedildiğini ortaya koyar. Bu değer gerçek hava sıcaklığı değildir ve o değerden farklıdır. Buna bağlı olarak rüzgar türbinin giriş ve çıkışındaki sıcaklık değerleri aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır [78].

$$T_{sog} = 35.74 + 0.6215 \cdot T_a - 35.75 \cdot (V^{0.16}) + 0.4274 T_a \cdot (V^{0.16}) \quad (5.32)$$

Rüzgar türbinine giren ve çıkan havanın hareketine bağlı kinetik ekserji ise aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [78]:

$$\dot{E}x_{kin} = 0.5 \cdot \rho \cdot A_2 \cdot V_1^3 \quad (5.33)$$

Düzgün akışlı kararlı bir açık bir sistemin enerji ve ekserji akışının eşitliği Denklem 5.34 ve Denklem 5.35 ile ifade edilmektedir [78].

$$\sum_g \dot{E}_g - \sum_x \dot{E}_\varphi + \sum_k \dot{Q}_k - \dot{W} = 0 \quad (5.34)$$

$$\sum_g \dot{E}x_g - \sum_\varphi \dot{E}x_\varphi + \sum_k \dot{E}x^Q - \sum \dot{\Gamma} = 0 \quad (5.35)$$

Burada,  $\dot{E}_g$  ve  $\dot{E}_\varphi$  sırasıyla sisteme giren ve çıkan enerjileri,  $\dot{E}x_g$  ve  $\dot{E}x_\varphi$ , sisteme giren ve çıkan ekserjileri;  $Q_k$  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 ve  $\Sigma \dot{\Gamma}$  toplam ekserji yıkımını (tersinmezlikler) göstermektedir. Toplam ekserji yıkımı, tersinir sistemler için sıfıra eşit olduğu halde, tersinmez sistemlerde sıfırdan büyüktür. Denklemdaki gibi ekserji, kinetik, potansiyel, kimyasal ve fiziksel ekserjilerin toplamıdır [80].

$$\dot{E}x_T = \dot{E}x_{fiz} + \dot{E}x_{kim} + \dot{E}x_{kin} \quad (5.36)$$

Herhangi bir durumda ve ideal gazdan oluşan sistemin fiziksel ekserjisi aşağıdaki Denklem 5.37 kullanılarak hesaplanır [78].

$$ex_{fiz} = (C_{p,a} + w \cdot C_{p,v}) \cdot T_0 \cdot \left[ \left( \frac{T}{T_0} \right) - 1 - \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) \right] + (1 + 1.6078 \cdot w) R_a \cdot T_0 \cdot \ln \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (5.37)$$

İdeal gazdan oluşan sistemin kimyasal ekserjisi ise aşağıdaki Denklem 5.38 kullanılarak hesaplanır [78].

$$e_{kim} = R_a T_0 \left[ (1 + 1.6078 \cdot w) \ln \left[ \frac{(1 + 1.6078 \cdot w_0)}{1 + 1.6078 \cdot w} \right] + 1 + 1.6078 \cdot w \ln \left( \frac{w}{w_0} \right) \right] \quad (5.38)$$

## 5.4 PEM Elektroliz Sisteminin Analizi

### 5.4.1 PEM Elektroliz Sisteminin Modellenmesi

Bir PEM elektrolizörün dinamik davranışını düzgün bir şekilde modelleyebilmek için anot, katot, membran, gerilim bölümlerini ve birbiriyle olan etkileşimini iyi anlamak gerekir. Elektrolizöre gerilim uygulandığında uygulanan gerilim değerine bağlı olarak Nernst eşitliğini kullanarak omik polarizasyon ve aktivasyon polarizasyon hesaplanabilir [145].

Elektroliz reaksiyonun tümü için Denklem 5.39 ile verilen kimyasal reaksiyon için reaksiyona giren ürünler ve çıkan reaktantlar için stokiyometrik sabitler için, reaksiyondan çıkan ürünlerin işaretleri artı, giren reaktantların işaretleri eksi olarak kullanılmaktadır. A, B, C, D değerleri reaksiyona giren reaktantların ve reaksiyondan çıkan ürünlerin termodinamik özellikleridir.



$$A_{\text{H}_2} + 0.5A_{\text{O}_2} - A_{\text{H}_2\text{O}} \quad (5.40)$$

Reaksiyonun ideal durumdaki Gibbs serbest enerjisi gazların ve suyun spesifik ısı kapasitesi modeliyle verilmektedir [101].

$$\Delta G^o = R.T. \left[ \frac{\Delta G_0^o - \Delta H_0^o}{R.T_0} + \frac{\Delta H_0^o}{R.T} + \frac{1}{T} \int \frac{\Delta C_p^o}{R} dT - \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_p^o}{R} \frac{dT}{T} \right] \quad (5.41)$$

$\Delta G_0^o$  ve  $\Delta H_0^o$  sıvı haldeki suyun referans sıcaklık değerinde ( $T_0$ ) standart entalpi ve Gibbs enerji değeridir. Eşitlikte verilen ürünler ve reaktantların spesifik ısı kapasitelerinin sıcaklıkla değişimi ise [101];

$$\int_{T_0}^T \Delta C_p^0 dT = (\Delta A)T_0(\tau - 1) + \frac{\Delta B}{2}T_0^2(\tau^2 - 1) + \frac{\Delta C}{3}T_0^3(\tau^3 - 1) + \frac{\Delta D}{T_0} \left(\frac{\tau - 1}{\tau}\right) \quad (5.42)$$

$$\int_{T_0}^T \frac{\Delta C_p^0}{R} \frac{dT}{T} = \Delta A \ln \tau + \left[ \Delta B T_0 + \left( \Delta C T_0^2 + \frac{\Delta D}{\tau^2 T_0^2} \right) \left( \frac{\tau + 1}{2} \right) \right] (\tau - 1) \quad (5.43)$$

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

Pratikte Gibbs serbest enerjisi iş yapmak için mevcut net iç enerjisidir. Standart basınç ve sıcaklıkta Gibbs serbest enerji değeri sıfır enerji noktası olarak tanımlanır ve bir sistemin enerjisindeki değişimi hesaplamakta kullanılır. Gibbs serbest enerji değeri maddenin durumu ve sıcaklığı ile değişir, sabit bir değere eşit değildir. Suyu hidrojen ve oksijene ayırmak için gereken tersinir gerilim, ürünler ve reaktantlar arasındaki serbest enerjisindeki değişiklik olarak tanımlanır [101].

$$E_0 = -\frac{\Delta G^0}{z \cdot F} \quad (5.44)$$

E<sub>0</sub> bir elektroliz hücresinin teorik minimum tersinir gerilimi, z elektron sayısı (2), F faraday sabitidir (96485 coulomb mol<sup>-1</sup>). Önemli miktarda suyu parçalamak için gereken gerçek gerilim değeri ise V<sub>el</sub>, E<sub>0</sub> dan büyük olmalıdır. Gerilimlerin ikisi arasındaki fark ise aşırı gerilim, polarizasyon veya basit kayıplardır. Elektrolizör gerilimi V<sub>el</sub>, E açık devre gerilimi, aktivasyon gerilimi ve omik polarizasyon gerilimlerinin toplamıyla elde edilmektedir [145].

$$V_{elk} = E + V_{akt} + V_{ohm} \quad (5.45)$$

Nerst potansiyeli (E) standart olmayan koşullarda ve reaksiyonun aktivitesinin değişimine karşı gelir [145].

$$E = E_0 + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln\left[\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}}\right] \quad (5.46)$$

$P_{H_2}$ ,  $P_{O_2}$ ,  $P_{H_2O}$  hidrojen oksijen ve suyun kısmi basınçlarıdır.  $P_{H_2O}$  suyun kısmi basıncı deneysel bir formülle bulunabilir. Deionizereden anot yığına giren suyun sıcaklık değişimine bağlı olarak değişmektedir [145].

$$P_{H_2O} = 610.78 \cdot \exp\left[\frac{T}{T + 298.3}(17.2694)\right] \quad (5.47)$$

$$P_{H_2} = P_k - P_{H_2O} \quad (5.48)$$

**Aktivasyon Aşırı Gerilimi:** Elektro-kimyasal reaksiyon süreçlerinde reaksiyona giren reaktantların üstesinden gelmesi gereken enerji bariyerleri mevcuttur. Reaksiyona giren reaktantların üstesinden gelmesi gereken enerji bariyerleri aktivasyon enerjisi olarak bilinmektedir, ve buda aktivasyon aşırı geriliminin bir sonucudur. Elektrotlarda yürüyen kimyasal reaksiyonların hızının geçen akımdan daha düşük olması durumunda meydana gelir. Bu durumda elektrotlarda yürüyen reaksiyon hızını belli bir değerde tutabilmek için elektrot potansiyellerinin artırılması gerekir. Aktivasyon enerjisi iyonik ve elektronlar arasındaki transferdeki değişimlere bağlıdır. Anot ve katot aktivasyon aşırı gerilimi  $\eta_A$  ve  $\eta_C$  PEM yığınının tersinmez kayıplarını temsil eder ve toplam aşırı gerilim düşük akım yoğunluklarında daha etkin olmaktadır [101].

$$\eta_A = \frac{R \cdot T}{\alpha_a \cdot z \cdot F} \cdot \ln\left(\frac{i}{i_{a,o}}\right) \quad (5.49)$$

$$\eta_k = \frac{R \cdot T}{\alpha_c \cdot z \cdot F} \cdot \ln\left(\frac{i}{i_{c,o}}\right) \quad (5.50)$$



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

Omik Kayıplar: Elektrotların, zarın ve etkileşim yüzeylerinde mevcut dirençler sebebiyle oluşmaktadır. Devreden hiç akım geçmezken ölçülen elektrot potansiyellerine denge potansiyeli denir. Devreden akım geçince elektrot potansiyellerinde polarizasyon nedeniyle değişmeler olur. Denge durumunda elektrotların temel karakteristik davranışlarına bağlı olarak her bir elektrotta ölçülebilen dinamik akımlar mevcuttur. Anot ve katot değişim akım yoğunlukları oksidasyon ve indirgenmenin bir oranı olarak tanımlanabilir. Büyük değişim akım yoğunluğu bir elektrotun hızlı bir kinetik ile anlık elektron transferinin büyük olduğunu, küçük akım yoğunluğu düşük kinetik ve elektron transferinin yavaş olduğunu göstermektedir. Anot katot akım değişim yoğunlu sıcaklığın exponansiyel bir fonksiyonu olarak hesaplanabilir. Sıcaklığın artması ile daha hızlı kimyasal reaksiyon gerçekleşmesi bunun sonucunda yüksek kinetik enerji ile aktivasyon gerilimini düşürecektir ve verimi yükseltecektir [101].

Omik kayıplar katı elektrolitteki iyonların hareketi ve elektrotlar boyunca elektron akışı neticesinde oluşur. Elektrolitteki iyon akışı ohm kanununa uyar. Omik aşırı potansiyel  $V_{ohm}$  eşitlikle tanımlanır ve yığın akım yoğunluğu ( $i$ ), membranın kalınlığı  $\varphi$ , yığının iletkenliği  $\sigma$  olmak üzere Denklem 5.51 ile hesaplanır;

$$V_{ohm} = i \cdot R_{ohm} \quad (5.51)$$

Burada  $\sigma$  (Siemens  $cm^{-1}$ ) iyon transferindeki toplam membran direncini ve elektrotların elektriksel direncini içerir. Belirli bir kullanım süresi sonucunda iç polarizasyon kayıpları artar ve yığın geriliminde belirli akım değeri için artar. Omik polarizasyon ise [145];

$$R_{ohm} = \frac{\varphi}{\sigma} \quad (5.52)$$

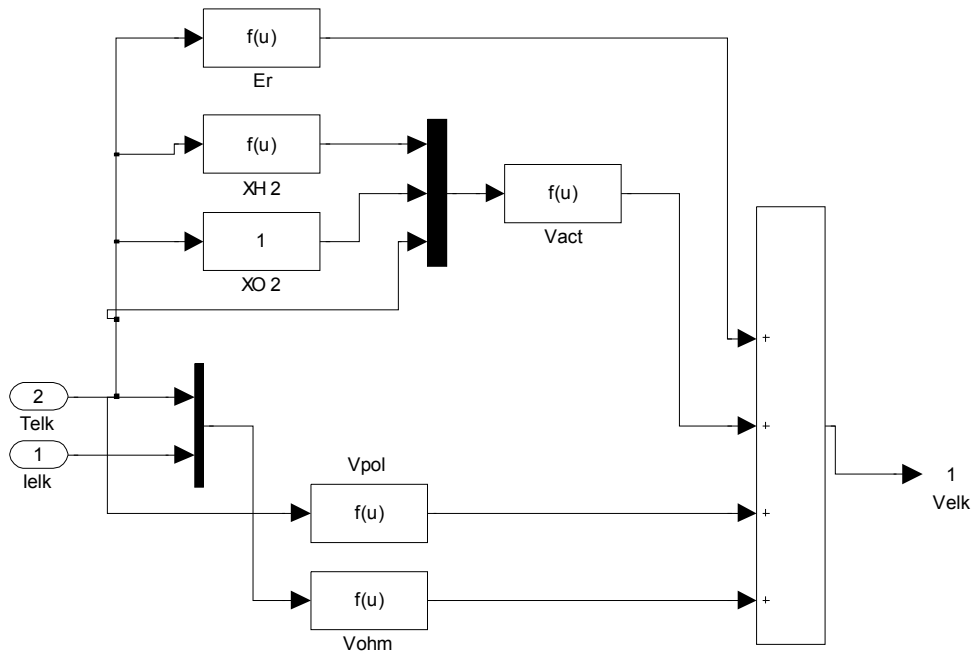
Yığınin iletkenliği elektrolit ve sıcaklığa bağılı olarak Denklem 5.53 ile hesaplanır.

$$\sigma = (0.00514 \cdot \lambda_m - 0.00326) \cdot \exp\left(1268 \cdot \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{elk}}\right)\right) \quad (5.53)$$

Elektroliz ünitesinde saniyede üretilen hidrojen mol miktarı elektroliz akımı  $i$  faraday verimi  $\eta_F$  bağılı olarak Denklem 5.54 ile aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$N_{H_2} = \frac{n \cdot \eta_F \cdot i}{2 \cdot F} \quad (5.54)$$

Şekil 5.9'da sıcaklığa ve akım yoğunluğuna bağılı olarak elektroliz gerilimini belirlemek için Matlab Simulink ile hazırlanan modelin blokları gösterilmiştir.



Şekil 5.9 PEM elektroliz için hazırlanan Matlab Simulink Modeli.

#### 5.4.2 PEM Elektroliz Enerji ve Ekserji Analizi

PEM Elektroliz sisteminin verimi ve yığın verimi aşağıdaki denklemlerle verilmektedir. Sistemin veriminde hidrojenin üst ısı değeri (HHV= 39 kWh/kg) yada düşük ısı değeri kullanılabilir. Yığının verimi ise çalışma sıcaklık ve basıncında ideal hücre gerilimi ve yığındaki hücre sayısını basınçla çarparak ölçülen sığın gerilimine bölünerek bulunmuştur [101].

$$\eta_{elk} = \frac{HHV \cdot N_{H_2}}{W_{elk}} \quad (5.55)$$

Sudan hidrojen üretilmesinde yaygın olarak kullanılan PEM elektrolizörlerinin termodinamik–elektrokimyasal modellerinin kullanılması sistemin çalışmasının iyi anlaşılmasını ve sistemde yapılacak optimizasyon çalışmalarını kolaylaştıracaktır. Ekserji verimi; reaksiyonadan çıkan ürünlerin ekserjileri ile reaksiyona giren reaktantların (H<sub>2</sub>O) ekserji farkının PEM elektrolizörünün giriş elektrik gücüne oranı olarak hesaplanır [83].

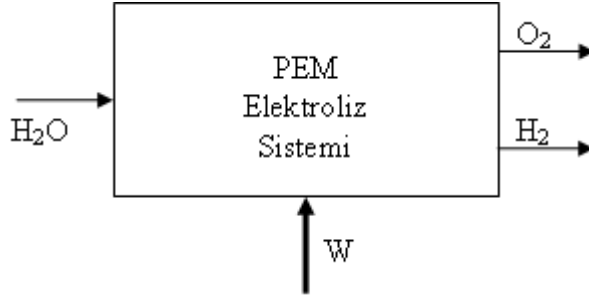
$$\psi_{elk} = \frac{(Ekserji)_{ürün} - (Ekserji)_{Reaktant}}{Elektrik - gücü} = \frac{(\dot{E}x_{H_2} + \dot{E}x_{O_2}) - (\dot{E}x_{H_2O})}{\dot{W}} \quad (5.56)$$

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

$$ex = ex_{fiz} + ex_{kim} \quad (5.57)$$

Fiziksel ekserji denkleminin en genel şekli aşağıda eşitlikle verilmiştir [85].

$$ex_{fiz} = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0) \quad (5.58)$$



Şekil 5.10 Elektroliz prensip şeması.

Yukarıdaki eşitlik reaksiyona giren reaktant ( $H_2O$ ) için uygun bir hesaplamadır. Fakat reaksiyondan çıkan ürünler hidrojen ve oksijen ideal gaz olarak değerlendirilir ve bu durumda fiziksel ekserji değeri spesifik ısı değeri  $C_p$  ve spesifik ısı oranı  $k$  olmak üzere Denklem 5.59 ile hesaplanabilir [83].

$$ex_{fiz} = C_p \cdot T_0 \left[ \frac{T}{T_0} - 1 - \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + \ln\left(\frac{P}{P_0}\right)^{k-1/k} \right] \quad (5.59)$$

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

$$\dot{Ex}_{H_2O} = \dot{m}_{H_2O} \cdot (ex_{kim} + ex_{fiz})_{H_2O} \quad (5.60)$$

Elektroliz esnasında oluşan kimyasal reaksiyonda reaktantların toplam ekserji oranı ise teker teker Denklem 5.61 ve Denklem 5.62 ile aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\dot{Ex}_{H_2} = \dot{m}_{H_2} \cdot (ex_{kim} + ex_{fiz})_{H_2} \quad (5.61)$$

$$\dot{Ex}_{O_2} = \dot{m}_{O_2} \cdot (ex_{kim} + ex_{fiz})_{O_2} \quad (5.62)$$

Hidrojen oksijen ve suyun kütle akışlarının hesaplanabilmesi için öncelikle mol akışları bulunmalıdır. Hidrojen mol miktarı akım yoğunluğu ve

faraday sabitine bağlı olarak hesaplanabilir. Bulunan bu değer hidrojenin birim mol değerine başına kütlesiyle çarpılarak kütle akışı hesaplanır [83].

$$N_{H_2} = \frac{i}{2F} \quad (5.63)$$

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

$$N_{O_2} = \frac{i}{4.F} \quad (5.64)$$

Elektroliz sisteminden dışarı atılan su miktarı sisteme giren su miktarından hidrojen ve oksijen saniyedeki mol miktarının çikartılmasıyla Denklem 5.65 ile hesaplanır.

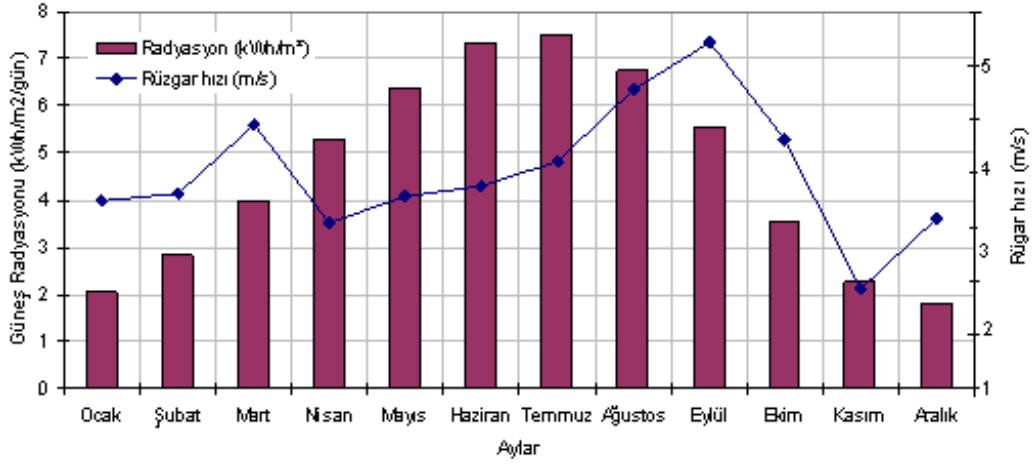
$$N_{H_2O,\phi} = N_{H_2O} - N_{O_2} - N_{H_2} \quad (5.65)$$

## 5.5 Yenilenebilir Enerji Sistemi Boyutlandırma Optimizasyonu

Yenilenebilir enerji sisteminin boyutlandırma analizlerinde HOMER yazılımını kullanılmıştır. Tekno-ekonomik uygulanabilirlik açısından değerlendirilmiştir. HOMER Amerika Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (National Renewable Energy Laboratory) tarafından geliştirilen, yenilenebilir hibrid enerji sistemleri için boyut optimizasyonunda kullanılan bir yazılımdır. Küçük güçlerde ve farklı konfigürasyonda yenilenebilir enerji sistemleri için en iyi verime sahip sistemin belirlenmesi için kullanılır. Yapılan simülasyon ile kurulması planlanan sistemin performansı, yatırım maliyeti, enerji maliyeti ve çevresel etkileri belirlenir.

Hibrid sistemler birden fazla enerji kaynağının kullanıldığı sistemlerdir, özellikle yaz-kış enerji gereksiniminin olduğu ve kesintiye yer verilmemesi gereken sistemler için uygundur. Hangi enerji kaynağının ağırlıklı olarak

kullanılacağı özellikle bölgenin meteorolojik koşullarına ve yük profiline göre değişmektedir.



Şekil 5.11 Aylık ortalama rüzgar hızı ve güneş radyasyon değerleri.

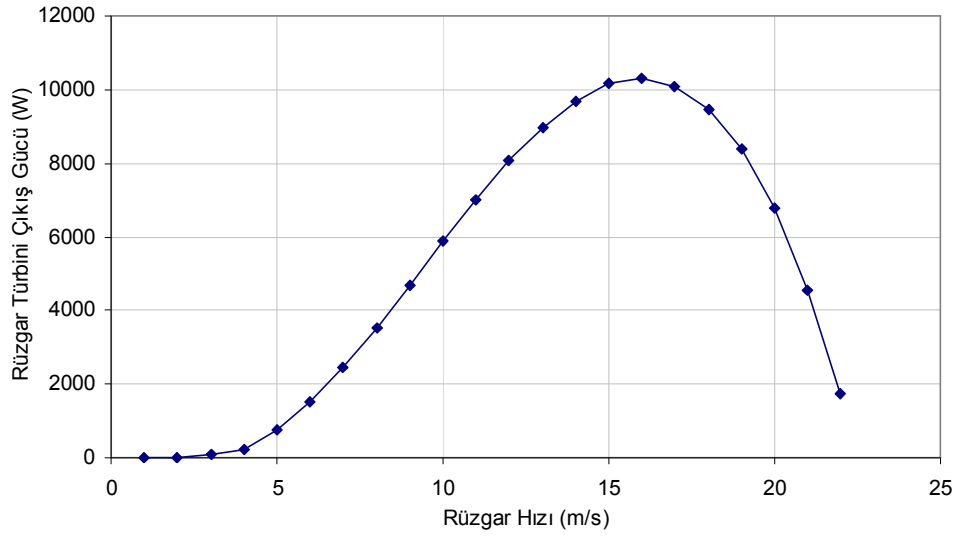
Boyutlandırma için yapılan hesaplamalarda Türkiye Devlet Meteoroloji İşleri Müdürlüğünden 2002–2007 yılına ait ölçülmüş saatlik güneş radyasyonu ve ortalama saatlik rüzgar hızı verileri Bigadiç için alınmıştır (39° 30' K 28° 1' D). Şekil 5.11'de görüldüğü gibi güneş radyasyonu en yüksek yaz aylarında olmaktadır. Temmuz ve Aralık ayı arasındaki radyasyon değerleri m<sup>2</sup> başına 1.55 ile 7.38 kWh arası değişmektedir. Yıllık ortalama radyasyon seviyesi m<sup>2</sup> başına 4.03 kWh dır. Aylık 15 m'deki rüzgar hızı ise 2.8 ile 5.38 m/s arasında değişmektedir. Aylık ortalama radyasyon ve rüzgar hızı değerleri Şekil 5.11'de verilmiştir.

Yapılan hesaplamalarda meteorolojik ölçümler ile alınan 10 m yükseklikteki rüzgar hız verilerin, türbinin yüksekliğinde değerlendirilebilmesi için aşağıda verilen (Halmann denklemi) formülden yararlanılmıştır. Buna göre referans rüzgar hız değeri  $V_{ref}$  Denklem 5.66 ile istenilen yükseklikteki hız değerine dönüştürülmüştür [17].

$$V_x = V_{ref} \cdot \left( \frac{h_x}{h_{ref}} \right)^k \quad (5.66)$$

Formülde  $k$  yüzey pürüzlülük katsayısı,  $h_x$  rüzgar hızının hesaplanacağı yükseklik (m),  $V_x$  istenilen yükseklikte hesaplanacak rüzgar hızını göstermektedir (m/s).

Rüzgar güç hesaplamalarında ise 10 kW rüzgar türbinine ait aşağıdaki çıkış güç eğrisi kullanılmıştır. Eğriye ait Şekil 5.12 ile gösterilmiştir. Hesaplamalar için çıkış gücüne karşılık gelen üçüncü dereceden polinom belirlenerek çıkış gücü hesaplanmaktadır.



Şekil 5.12 10 kW gücünde Rüzgar türbini rüzgar hızı-çıkış gücü eğrisi.

Fotovoltaik güç hesaplaması için Denklem 5.67 hesaplamalarda kullanılmaktadır. Formülde, güneş panelinin nominal güç değeri  $P_{PV}$  toplam güneş ışınım değeri  $I_T$  ve  $I_s$  1 kW/m<sup>2</sup>'dir [18].

$$P_{PV} = f_{PV} \cdot Y_{PV} \cdot \left(\frac{I_T}{I_s}\right) \quad (5.67)$$

Dizel jeneratörün yakıt tüketimi Denklem 5.68 ile hesaplanabilir [18]:

$$F = F_0 \cdot Y_{gen} + F_1 \cdot P_{gen} \quad (5.68)$$

Burada  $Y_{gen}$ , jeneratörün nominal çıkış gücü,  $P_{gen}$ , anlık elektrik çıkış gücü,  $F_0$  ve  $F_1$  ise katsayılarıdır

Güneş ve rüzgar enerjisinden elde edilen enerji 24 saatlik süreçte yükün enerji talebiyle her zaman örtüşmemektedir. Rüzgar ve güneşten üretilen enerji depolanarak kullanılır. Aküler sistemde enerji olmadığı durumlarda ya da üretilen enerjinin yükün enerji talebini karşılayamadığı durumlarda kullanılır. Kıvalı keklik tesisinde enerji ihtiyacının sürekli olması istenmektedir. Bu nedenle şebeke kesintisinde sistemde enerji ihtiyacı kuluçka makineleri gibi hayati ünitelere enerji veremezse veya bir arıza durumunda geri dönülemez durumların yaşanmaması için tüm sistemi yaklaşık olarak 7.5 saat besleyecek aküler (48 kW) yedek güç kaynağı olarak kullanılmıştır.

## 5.6 Ekonomik Analiz

Bir projenin ömür maliyeti onun toplam fiyatı ve bütün çalışma süresi boyunca maliyetinin toplamıdır. Bu toplam maliyet, satın alma maliyeti, yerine koyma, enerji maliyeti, bakım ve hurda maliyetini kapsar. Bu maliyetlerin birçoğu satın alındıktan daha sonraki bir tarihte oluştuğundan, paranın zamana bağlı değerine göre analiz edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple sistemin toplam maliyeti tüm maliyetleri içermelidir [146].

Toplam Maliyet = İlk yatırım Maliyeti + İşletme ve Bakım Maliyeti + Yerine Koyma Maliyeti - Hurda Maliyeti

Ekonomik yatırımlar faiz oranlarından etkilenmektedirler. Bu nedenle, santralde üretilen elektrik maliyetinin daha doğru olarak hesaplanması, santralin yapımı ve çalışma ömrü boyunca yapılan tüm masrafların referans bir tarihe getirilmiş toplamlarının, o santralin ömrü boyunca üreteceği elektrik enerjisine bölünmesi ile yapılır. Bir tesisin kuruluşunda yapılan toplam yatırım masraflarının, kredi alınmış ise kredi faizi de dahil olmak üzere, belirli bir sürede ödenmesi amacıyla, toplam yatırım değerinin önceden belirlenmiş



bir kısmının sermaye maliyeti olarak her yıl işletme gelirlerinden ayrılması gerekir ve bu değere de amortisman değeri adı verilir. Amortisman katsayısı kullanılarak sabit bir yıllık sermaye masrafı hesaplanabilir. Amortisman değerlendirmesinde proje ömrü içerisindeki faiz yüklerini de hesaba katılmaktadır [147]. Yıllık sermaye maliyetini hesaplayabilmek için amortisman katsayısının hesaplanması gerekir.

$$CRF = \frac{(1+i)^N \cdot i}{(1+i)^N - 1} \quad (5.69)$$

Şimdiki değeri P olan bir yatırımın sabit yıllık amortisman bedeli veya sabit yıllık sermaye maliyeti Denklem 5.70 ile hesaplanır.

$$C_a = P \cdot \left[ \frac{(1+i)^N \cdot i}{(1+i)^N - 1} \right] \quad (5.70)$$

Eğer hesaplamada N yıl sonraki hurda değeri L söz konusu ise yıllık amortisman payı Denklem 5.71 ile hesaplanır.

$$C_a = P \cdot \left[ \frac{(1+i)^N \cdot i}{(1+i)^N - 1} \right] - L \cdot \left[ \frac{i}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (5.71)$$

Bir santralde üretilen enerjinin maliyeti, seçilen bir tarihte hesaplanan yıllık sermaye masrafları, işletme ve bakım masrafları ve yakıt masrafları toplamının, yıllık elektrik üretim miktarına bölünmesi ile bulunur.

$$g = \frac{C_k + C_m + C_f}{E} \quad (5.72)$$

Ekonomik analizlerin tümünde kullanılan tüm teknik donanımlara ait değerler aşağıda Tablo 5.2 ile gösterilmiştir.

Tablo 5.2 Teknik ve ekonomik hesaplamalarda kullanılan değerler.

Birim	Değer	Birim	Değer
<b>Fotovoltaik (1kWp)</b>		<b>Jeneratör (5kW)</b>	
Maliyet (\$/kWp)	7500	Yerine koyma maliyeti (\$)	500
Ömür (yıl)	25	Maliyet (\$/kW)	500
İşletme ve Bakım (\$/yıl)	0	İşletme ve Bakım (\$/saat)	0.15
Eğim açısı	40°		
Yerine Koyma Maliyeti (\$)	6500	<b>Akü (48kW)</b>	
<b>Rüzgar Türbini (10kW)</b>		Kurşun-asit tipi	
Maliyet (\$)	10000	Nominal gerilim (V)	12
Nominal çıkış gücü (kW)	10	Nominal kapasite (Ah)	200
Yerine Koyama (\$)	9000	Maliyet (\$)	200
İşletme ve Bakım(\$/yıl)	50	<b>Evirici</b>	
Ömür (yıl)	25	Nominal Güç (kW)	5
		Maliyet (\$/kW)	400

### 5.7 Belirsizlik Analizi

DeneySEL belirsizlikler ve hatalar, sistemde kullanılan cihaz ve ölçüm aletlerinin seçiminden, çalışma durumundan, işlem koşullarından, kalibrasyonundan, çevre koşullarından ve okumalardan dolayı ortaya çıkar. Bu hata ve belirsizliklerin belirlenmesinde “Belirsizlik Analizi” kullanılmaktadır.

Belirsizlik analizinin hem deneysel sonuçların yorumlanmasında, hem de sistem kurulumu öncesindeki tasarım çalışmalarında uygulanması gerekmektedir. Bu çalışmada, kullanılan tüm ölçüm aletlerinin yapısından kaynaklanan belirsizlik ile ilgili bilgiler, ölçüm aletlerinin üreticilerinden alınmış ve Tablo 5.3’de verilmiştir.

Tablo 5.3 Meteorolojik ölçüm istasyonuna ait özellikler

Rüzgar yönü	±7° doğruluk
Rüzgar hızı	1 ile 67 m/s
İç-Dış ortam sıcaklığı	0.1°C hassasiyette, ± 0.5 °C kesinlikte
Basınç	0.1mb hassasiyette, ±1.0 mb kesinlikte
Nem	% 1 hassasiyette, , ±5 kesinlikte
Güneş Radyasyonu	1 W/m <sup>2</sup> hassasiyette, ±%5 kesinlikte

Tüm bu duyarlık ve hata değerleri Holman tarafından tanımlanmış yöntem ile aşağıdaki denklem ve Tablo 5.3'deki değerlerden yararlanılarak hesaplanmıştır [148].

$$u_F = \left[ \left( \frac{\partial F}{\partial z_1} u_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial F}{\partial z_2} u_2 \right)^2 + \left( \frac{\partial F}{\partial z_3} u_3 \right)^2 + \left( \frac{\partial F}{\partial z_4} u_4 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial F}{\partial z_n} u_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.73)$$

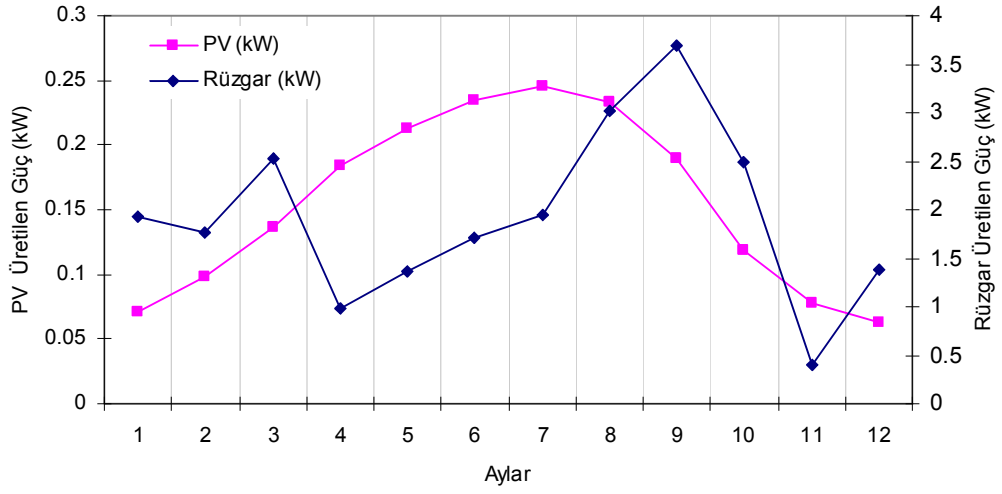
## 6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan tez çalışmasında, hibrid yenilenebilir rüzgar-güneş enerji sistemlerinden elektrik ve hidrojen üretimi incelenmiştir. Deneysel uygulamada Balıkesir Bigadiç ilçesinde kınalı keklik yetiştirme çiftliğine uygulanan proje UNDP-GEF'den ve Balıkesir üniversitesi Araştırma projesiyle desteklenmiştir. Tez kapsamında elde edilen bulgular da sürdürülebilir yaşamı desteklemek amacı ile kullanılacak olması tez konusunun önemi ve faydası açısından tartışılmaz olarak ortaya çıkmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular 5 ana grupta toplanmış ve aşağıda alt bölümler halinde sunulmuştur.

### 6.1 Hibrid Yenilenebilir Enerji Sisteminin Boyutlandırma Sonuçları

HOMER programı ile yapılan boyutlandırma analizi sonucunda tesis için gerekli enerji ihtiyacının karşılanacağı sistemin boyutları belirlenmiştir. Simülasyonda 4 farklı enerji sistemi incelenmiştir. Sırasıyla sadece dizel jeneratör, fotovoltaik-rüzgar türbini-akü-dizel, rüzgar türbini-akü-dizel jeneratör, fotovoltaik -akü-dizel sistemleri HOMER yazılımında analiz edilerek bölgenin meteorolojik durumuna göre en uygun sistem belirlenerek boyutlandırılması yapılmıştır. Buna göre 1 kW fotovoltaik, 10 kW rüzgar yenilenebilir enerji sistemi akülerle birlikte en uygun sistem olarak diğer konfigürasyonlara oranla avantajlı olarak bulunmuştur.

Analiz neticesinde elde edilen enerjinin 1 kW fotovoltaik, 10 kW rüzgar türbininin ürettiği elektrik enerjisinin aylara göre günlük ortalama dağılımı ise Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Fotovoltaik sistemden elde edilen enerji Haziran-Temmuz-Ağustos aylarında olurken rüzgar türbininden üretim Eylül ayında olmaktadır.



Şekil 6.1 Yıllık bazda aylara göre günlük ortalama güç üretim miktarları.

Analiz neticesinde farklı hibrid yenilenebilir sistemler için en avantajlı olan hibrid sistem Tablo 6.1’de verilmiştir. 1 kW güneş enerjisi 10 kW rüzgar enerji sisteminin üreteceği toplam enerjinin % 84 yenilenebilir enerji sisteminden sağlanırken enerji maliyeti 0.816 \$ olarak en avantajlı konfigürasyon olarak bulunmuştur. İlk yatırım maliyeti oldukça düşük olan dizel jeneratörün işletme bakım maliyetleri sebebiyle ömür süresince hesaplanan enerji maliyeti oldukça yüksek olarak 3.089 \$ olarak belirlenmiştir.

Tablo 6.1 Boyutlandırma sonucunda farklı konfigürasyonla için hesaplanan enerji maliyetleri.

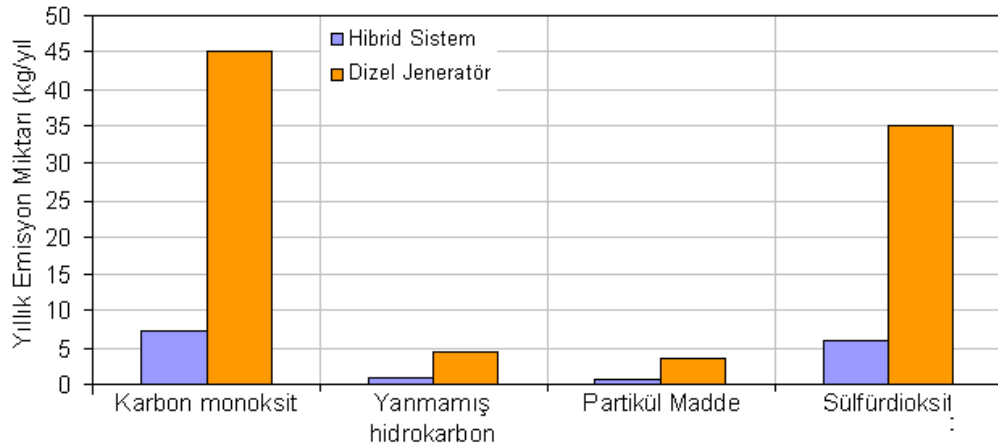
Rüzgar Gücü (kW)	Fotovoltaik Gücü (kWp)	Akü Kapasitesi (kW)	Jeneratör Gücü (kW)	Yenilenebilir Enerji Oranı (%)	İlk yatırım Maliyeti (\$)	Birim Enerji Maliyeti (\$)
10	1	48	5	84	24000	0.816
10	-	48	5	80	17000	0.837
-	-	48	5	0	7000	1.49
-	-	-	5	0	2000	3.089

Küresel ısınma ve iklim değişikliği ile mücadele açısından hibrid yenilenebilir enerji sistemlerinin kullanımı zararlı gaz emisyonlarının engellenmesi açısından da büyük önem arz etmektedir. Tablo 6.2'de jeneratörün kullanılması sebebiyle ortaya çıkacak zararlı gaz emisyonları hesaplanmıştır.

Tablo 6.2 Hibrid sistemden jeneratör kaynaklı emisyonlar.

Kirletici Tipi	Emisyon (kg/yıl)
Karbondioksit	3032
Karbon monoksit	7.48
Yanmamış hidrokarbon	0.829
Partikül Madde	0.564
Sülfür dioksit	6.09

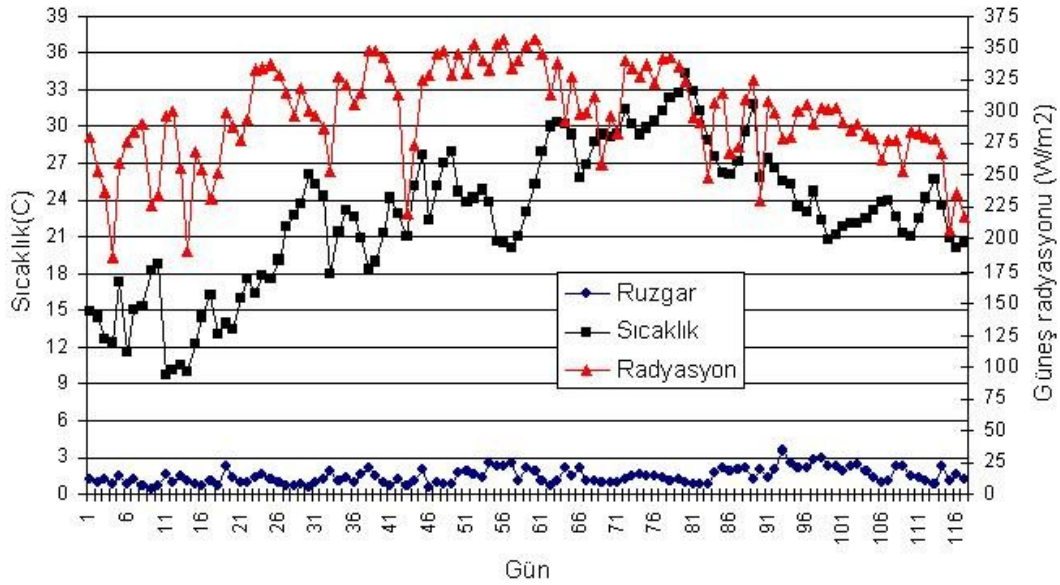
Yenilenebilir enerji tesisinin yerine sadece dizel jeneratör kullanılması durumunda yıllık bazda önlenecek gaz emisyonları Şekil 6.2 ile verilmiştir. HOMER yazılımının güvenilirliğini test etmek amacı ile yazılımda kullanılan veriler MS Excel programında yapılan hesaplama ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma neticesinde yapılan ihmal edilen bazı değerler neticesinde olarak % 3'lük bir fark olduğu bulunmuştur. Bu hata oranının kabul edilebilir bir değerde olması sebebiyle HOMER hesaplamalarda kullanılmıştır.



Şekil 6.2 Yenilenebilir enerji kullanımı ile engellenen zararlı gaz emisyonları.

## 6.2 Fotovoltaik-Elektroliz Hidrojen Eldesi Sonuçları

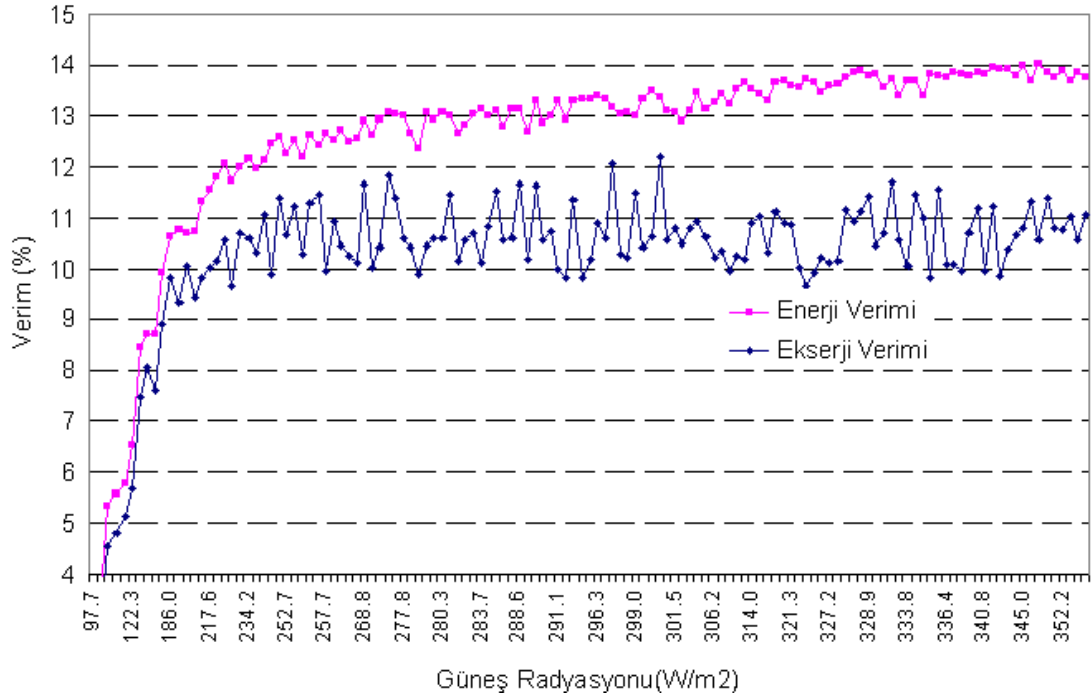
Fotovoltaik-Elektroliz sistemin enerji ve ekserji verimlerini belirlemek için yapılan analizde günlük ortalama güneş radyasyonu, rüzgar ve sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Şekil 6.3 incelendiğinde görüldüğü gibi günlük ortalama radyasyon değerleri 190.3–357.7 W/m<sup>2</sup> aralığında değişirken, sıcaklık 9.7–34.4°C arasında, panel üzerinde ölçülen rüzgar hızı ise 0–3.4 m/s aralığında değişmektedir.



Şekil 6.3 Analizde kullanılan rüzgar, sıcaklık ve radyasyon değerlerinin değişimi.

360 saatlik ölçüm verisinin değerlendirildiği analizde fotovoltaik sistemin enerji ve ekserji verimleri hesaplanmıştır. Şekilde 6.4'te görüldüğü gibi enerji verimi % 10.7–14 aralığında değişirken ekserji verim aralığı enerji verimine oranla daha düşük bir aralıkta % 9.5–12 arasında değişmektedir. Bu farkın temel sebebi ekserji veriminde ısı kayıplarının etkisidir. Ekserji verimindeki değişim güneş radyasyonu, sıcaklık ve rüzgar hızına bağlı olmaktadır. Ekserji veriminin enerji verimine göre daha fazla salınmasının

sebebi rüzgar hızının etkisidir bu etki ekserji verimine negatif olarak etki etmektedir.



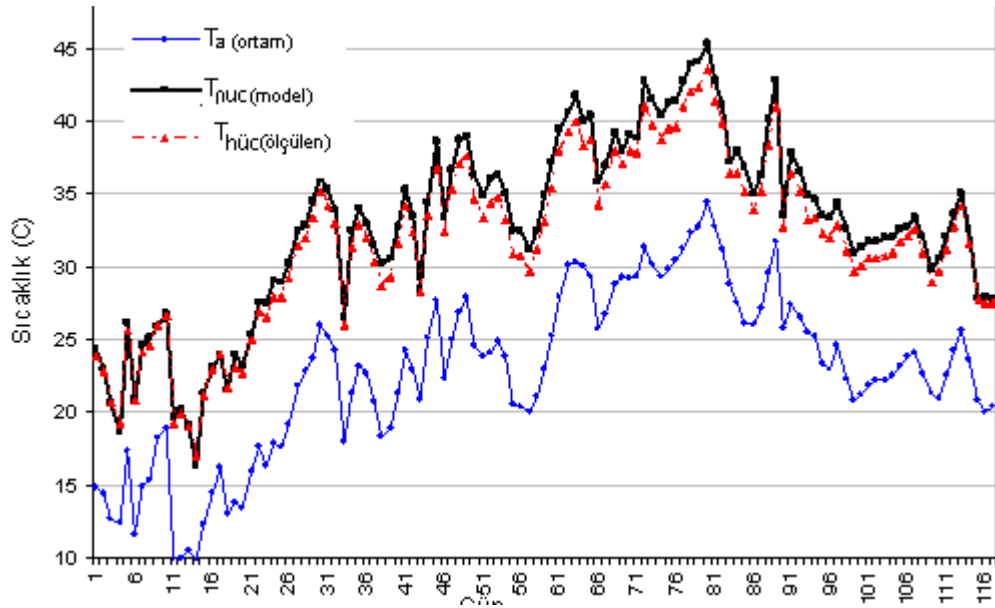
Şekil 6.4 Günlük ortalama radyasyonla enerji ve ekserji veriminin değişimi.

Matlab-Simulink ile fotovoltaik sistemin modellenmesi yapılarak analiz için kullanılmıştır. Yapılan modelde ölçülerek elde edilen ortam sıcaklığı verileri kullanılarak elde edilen fotovoltaik hücre sıcaklığı, ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Şekil 6.5 ile hücre sıcaklığının deneysel ve modelle arasındaki ilişki gösterilmiştir. Model ile ölçülen değerler arasında bir korelasyon mevcuttur. Aradaki fark modelde kullanılan denklemde rüzgar hızı olmadığı fakat uygulamada rüzgar hızıyla panel sıcaklığının değişimi söz konusudur. Bu etki için elde edilen denklem aşağıda Denklem 6.1 ile ifade edilmiştir.

$$T_{hüc} = 3.1 + 0.025.S + 0.95.T_a - 0.3.V \quad (R^2=0.98) \quad (6.1)$$

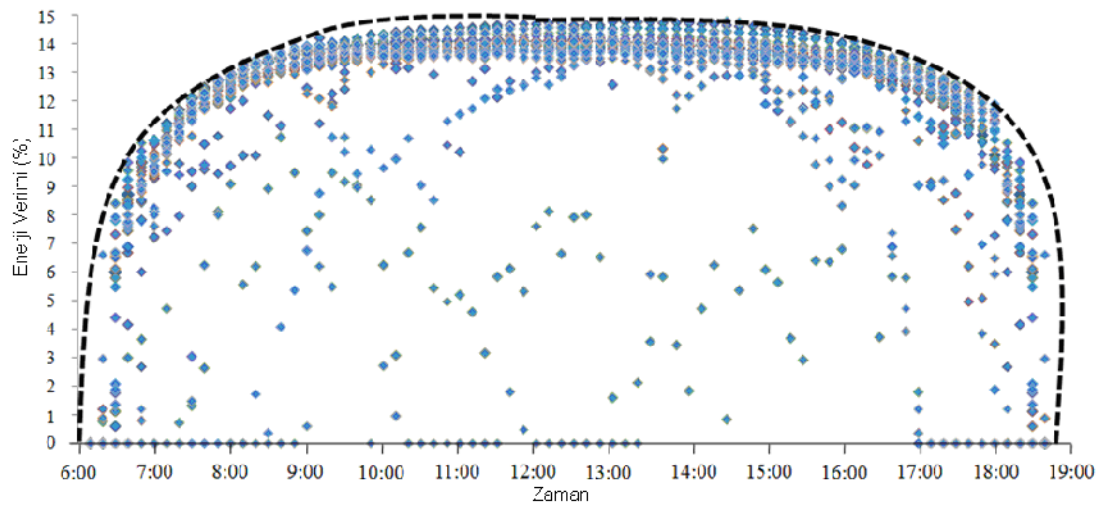
Panel hücre sıcaklığının ortam sıcaklığı ( $T_a$ ), güneş radyasyonuna bağlı değişiminin yanı sıra pratikte rüzgar hızının etkisinde söz konusu olmaktadır. Rüzgar hızının ( $V$ ) hücre sıcaklığına etkisi çoklu regresyon ile Denklem 6.1 ile elde edilmiştir.





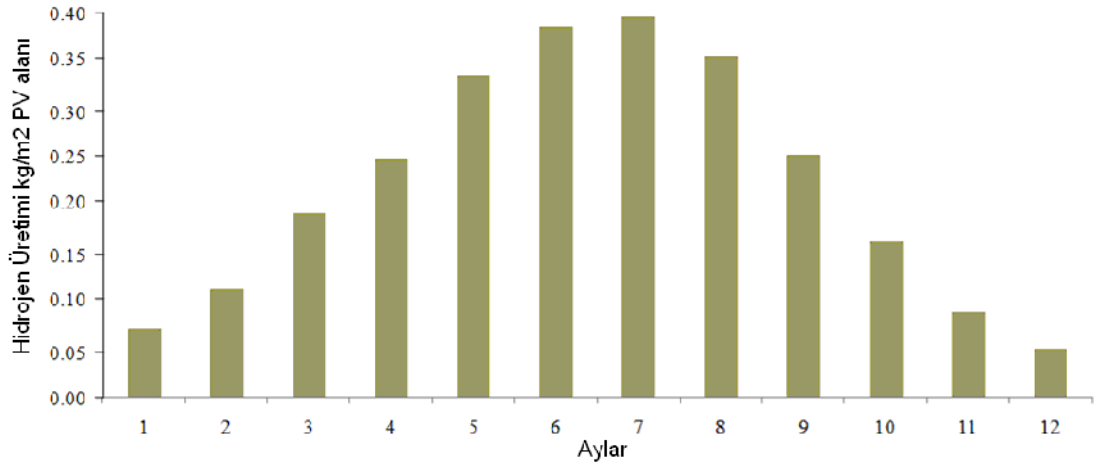
Şekil 6.5 Fotovoltaik panel için sıcaklık değerlerinin değişimi.

Ayrıca fotovoltaik sistemin enerji verimi, Haziran ayının bir günü için 06:00 ile 19:00 saatleri aralığında 10 dakikalık ölçüm verilerine göre incelenmiştir. Saat 10:00'da güneş radyasyon değeri  $330 \text{ W/m}^2$  değerine ulaştığında enerji verimi % 14 değerine ulaşmaktadır (Şekil 6.6).



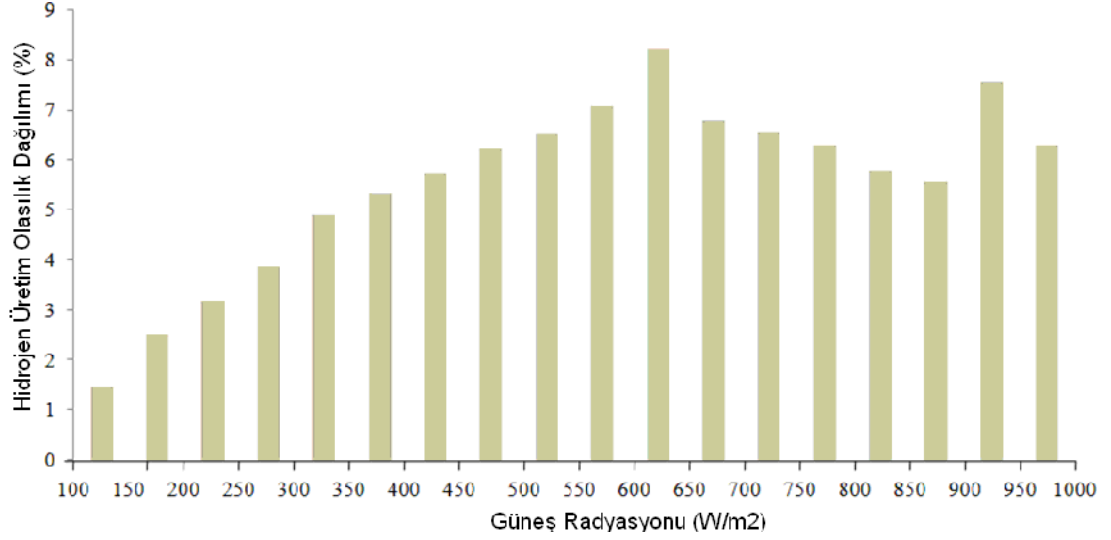
Şekil 6.6 Fotovoltaik panel veriminin saatlik olarak değişimi.

Balıkesir bölgesinde, fotovoltaik sistemden hidrojen eldesi için yapılan analizde elde edilebilecek hidrojen miktarı hesap edilmiştir. 1 m<sup>2</sup> yüzey alanına ve % 14 verime sahip fotovoltaik sistemden 150 ml/dak hidrojen üreticiyle elektroliz yolu ile (PEM tipi QL-150) elde edilebilecek hidrojen miktarı 2.97 kg olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.7 incelendiğinde hidrojen üretim miktarının en yüksek olduğu ay Temmuz olurken (0.45 kg H<sub>2</sub>) en düşük olduğu ay Aralık ayı (0.055 kg H<sub>2</sub>) olmaktadır Temmuz ayında toplam hidrojen üretiminin %14.95'i yapılırken Aralık ayında % 1.89'u yapılmaktadır. PEM elektroliz sisteminin kararlı çalıştığı akım yoğunluk değeri (0.48 A/cm<sup>2</sup>) için elektroliz sisteminin enerji verimi % 60.2 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.7 Fotovoltaik-Elektroliz aylık hidrojen üretim miktarı.

Ayrıca hidrojen üretim dağılım olasılığı yıllık bazda bulunmuştur. Şekil 6.8 incelendiğinde 50 W/m<sup>2</sup> radyasyon aralığında incelenen olasılık dağılımında 600-650 W/m<sup>2</sup> aralığında yıllık hidrojen üretiminin % 8.5 ile yüksek değerine ulaştığı ve 900-950 W/m<sup>2</sup> arasında ise % 8 olduğu görülmüştür. Olasılık dağılımı sadece gelen radyasyon miktarına bağlı olmadan, yıllık bazda bölgenin radyasyon potansiyeline beğli olarak yani görülme sıklığına bağlı olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.8 Hidrojen üretim dağılım olasılığının yıllık güneş radyasyonu ile değişimi.

Verim hesaplamalarında işlem kolaylığı açısından saatlik verilerin ortalamasıyla bulunan günlük, aylık, yıllık değerlerle yapılan enerji verimi hesaplamalarında hatalı sonuçlar elde edilmesine neden olmaktadır. Bu hatayı bulabilmek için fotovoltaik sistemin maksimum çıkış gücü denklemlerle elde edilerek saatlik, aylık ve yıllık verilerle analizler yapılmıştır.

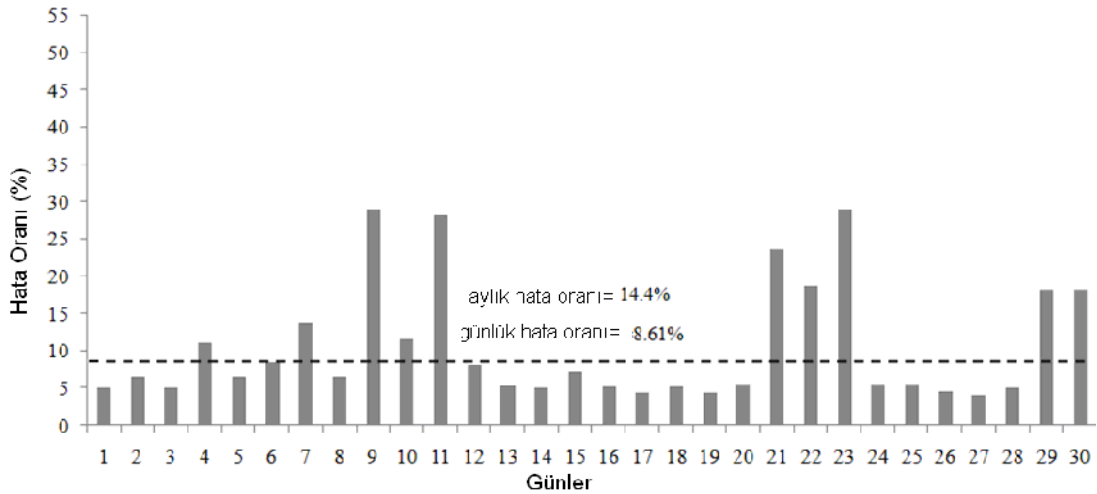
Fotovoltaik sistemin enerji verimi çıkış akımı, gerilimi ve güneş radyasyonuna bağlı olarak değişmektedir. Ancak fotovoltaik sistemin çıkış gücü sıcaklığının ve güneş radyasyonunun bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Aradaki bu ilişkiyi daha basit bir hale getirebilmek için maksimum çıkış gücü sıcaklığın ve güneş radyasyonunun fonksiyonu olarak Denklem 6.2 ile ifade edilmiştir. Lineer olmayan bu denklem çoklu regrasyon yöntemi ile elde edilmiştir.

$$P_m = -11.017 + 0.34 \cdot S \cdot 2.73^{-0.003 \cdot T_a} \quad (R^2 = 0.98) \quad (6.2)$$

Denklem 6.2'de  $T_a$  ortam sıcaklığı (Kelvin) ve  $S$  güneş radyasyonu ( $W/m^2$ ) olarak hesaplanmıştır. Çıkış gücünün radyasyonla doğrusal

değişmemesi sebebiyle enerji verim formülü de doğrusal olmayan bir fonksiyondur.

Ortalaması alınan sıcaklık-radyasyon veri kümesinin verim fonksiyonunda yerine konulmasıyla bulunacak değerler ile veri kümesinin teker teker verim fonksiyonuna konulmasıyla bulunan değerlerin ortalaması fonksiyonun doğrusal olmayışı sebebiyle farklı sonuç vermektedir. Saatlik veriler yerine ortalama değerler ile elde edilmiş günlük ve aylık verilerle yapılan enerji verimi hesaplamalarında saatlik verilerden % 8.61 oranında, aylık verilerde ise bu oran % 14.4 oranında bulunmuştur. Haziran ayına ait verilerle yapılan 30 günlük hesaplamada 720 veri değerlendirilmiş ve bulunan hata oranları Şekil 6.9'da gösterilmiştir.



Şekil 6.9 Enerji verim hesaplamalarında aylık ve günlük ortalama değerlerin kullanılması sonucunda ortaya çıkan hata oranları.

### 6.2.1 Fotovoltaik-Elektroliz Sisteminin Ekonomik Analiz Sonuçları

Bir projenin ömür maliyeti onun toplam fiyatı ve bütün çalışma süresi boyunca maliyetlerinin toplamıdır. Toplam maliyeti ilk yatırım maliyeti, enerji maliyetleri, bakım ve hurda maliyetlerini içerir. Bu maliyetlerin bir kısmı satın

almanın sonrasında oluştuğundan paranın zamana bağlı değerine göre analiz edilmesi gerekmektedir

Yapılan ekonomik analizde yıllık faiz oranı % 8 fotovoltaik paneller, dönüştürücülerin ekonomik proje periyodu (N) 25 yıl, elektroliz ünitesi için 15 yıl olarak belirlenmiştir. Ekonomik hesaplamalarda, fotovoltaik sistemlerin Ekonomik hesaplamalarda, fotovoltaik ve elektroliz sistemlerin ilk yatırım maliyeti birim Watt başına 6 \$ değeri kullanılmıştır. Elektrolizden elde edilen hidrojenin kg maliyetini hesaplamak için toplam bu günkü değer metodu kullanılmıştır. Bu değer yıllık hidrojen üretim miktarına oranıyla birim hidrojen maliyeti belirlenmiştir.

1 m<sup>2</sup> yüzey alanına sahip fotovoltaik panel ve verimi % 60.2 olan 160 ml/dak hidrojen üretebilen sahip bir elektrolizörden Balıkesir bölgesinde (güneş radyasyonu yıllık 4.58 kWh/m<sup>2</sup>/gün) elde edilebilecek yıllık hidrojen üretim miktarı 2.65 kg/yıl olarak hesaplanmıştır. Fotovoltaik-Elektroliz hidrojen üretim maliyeti ise 44 \$/kg olarak hesaplanmıştır.

Modelleme ile elde edilen sonuçların test edilmesi için HOMER programı doğrulama için kullanılmıştır. Ayrıca yıllık hidrojen üretiminin ( $m_{H_2}$ ) ve kg maliyetinin ( $C_{H_2}$ ) belirlenmesinde daha genel bir hesaplama yapılabilmesi için ve güneş radyasyon değerine bağlı olarak Denklem 6.3 ve Denklem 6.4 ile elde edilmiştir.

$$C_{H_2} = 0.19 \cdot S_t^4 - 4.62 \cdot S_t^3 + 41.12 \cdot S_t^2 - 163.61 \cdot S_t + 291.37 \quad (R^2=0.99) \quad (6.3)$$

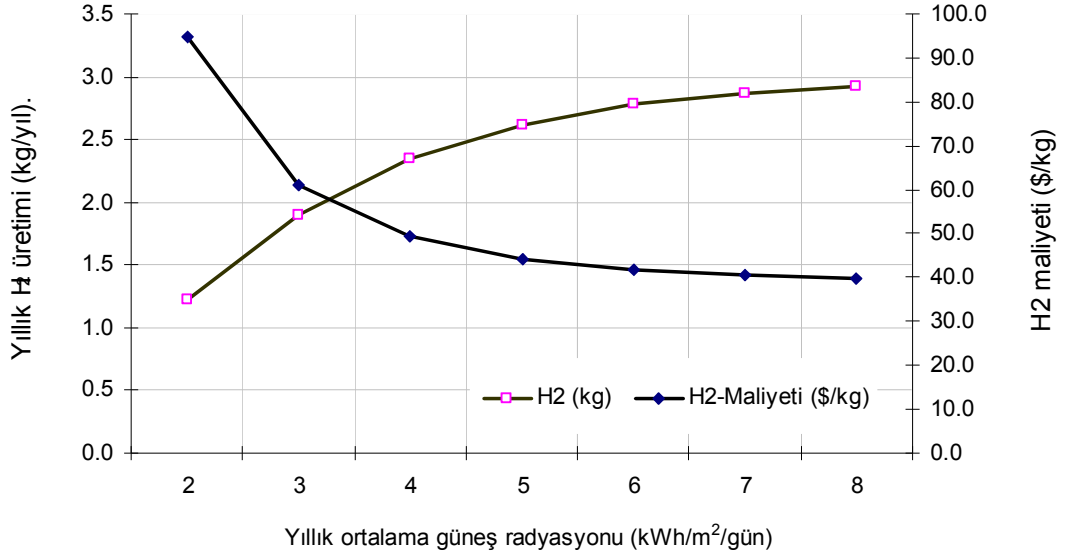
$$m_{H_2} = -0.06 \cdot S_t^2 + 0.87 \cdot S - 0.23 \quad (R^2 = 0.99) \quad (6.4)$$

Tablo 6.3'te görüldüğü gibi PV-Elektroliz sistemi için yıllık güneş radyasyon oranındaki değişikliklerle farklı bölgeler için hidrojen üretim maliyeti ve miktarı belirlenmiştir. Radyasyon değeri arttıkça üretilen hidrojen miktarı artarken hidrojen üretim maliyeti azalmaktadır.

Tablo 6.3 Radyasyonun değişimiyle hidrojen üretim miktarı ve maliyetinin değişimi.

Radyasyon (kW/m <sup>2</sup> /gün)	Üretilen H <sub>2</sub> (kg)	H <sub>2</sub> -Maliyeti (\$/kg)
2	1.22	94.9
3	1.90	60.90
4	2.35	49.30
5	2.69	44.30
6	2.78	41.60
7	2.87	40.40
8	2.93	39.60

Ancak Şekil 6.10 incelendiğinde 5 kWh/m<sup>2</sup>/gün değerinden sonra elektroliz ünitesinin kapasite kullanımı sınır değere ulaştığı için azalma oranı daha düşük olarak gerçekteşmektedir. Elektroliz sisteminin üretim kapasitesine bağlı olarak 5-6 kWh/m<sup>2</sup>/gün aralığından sonra artış fazla olmamaktadır. Yukarıda elde edilen Denklem 6.2 ve 6.3 kullanılarak farklı coğrafik konumlarda hidrojen üretim miktarı ve maliyetini belirlemek mümkün olacaktır. Hesaplama kullanılan ekonomik değerler faiz ve ilk yatırım maliyeti gibi değerler aynı meteorolojik koşullara sahip farklı ülkeler için yeniden hesaplama gerektirir. Bu nedenle yukarıda elde edilen denklemler Türkiye'de farklı coğrafi bölgeler için kullanılabilir.



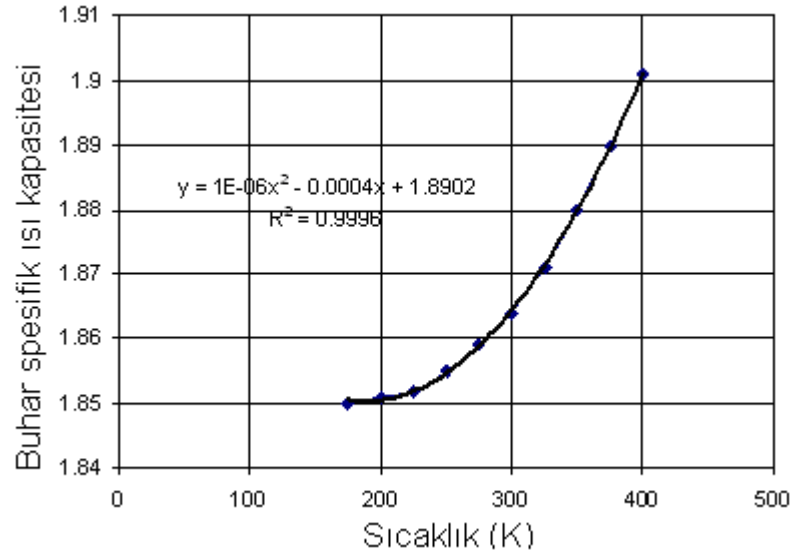
Şekil 6.10 Yıllık hidrojen üretim miktarı ve maliyetinin güneş radyasyonu ile değişimi.

### 6.3 Rüzgar Türbini Elektroliz Sistemi Analiz Sonuçları

Rüzgar türbini elektroliz sisteminden hidrojen eldesinin enerji ve ekserji analizinin yapılması için barometrik basınç, sıcaklık, nem, rüzgar hızı ve yönü, hissedilen sıcaklık, güneş radyasyon verileri Vantage Pro2 veri toplayıcısı ile 10 dakikalık aralıklarla kaydedilmiştir. Enerji ve ekserji verimleri için toplam 1390 adet ölçüm verisi kullanılmıştır. Ekserji analizi rüzgar türbini giriş ve çıkış sıcaklık ve basınç değerleri  $T_1, T_2, P_1, P_2$  ölçüm verileri yardımıyla hesaplanmıştır. Havanın nem oranı, buhar spesifik ısı kapasitesi değerlerinin sabit değer olarak alınmayarak hesaplamalarda ölçülen değerlerden elde edilmiştir.

Havanın nem oranı  $w$  için ise ölçülen sıcaklık ve nem değerine bağlı bir denklem ile elde edilerek kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalarda değişken olarak hesaba alınan bu değer alınan veri aralığında 0-0.029 aralığında değiştiği ve ortalama değerinin 0.01 olduğu görülmüştür. Bunun yanında ekserji verimine etkisinin doğru orantılı olarak yaklaşık olarak % 1 olduğu belirlenmiştir.

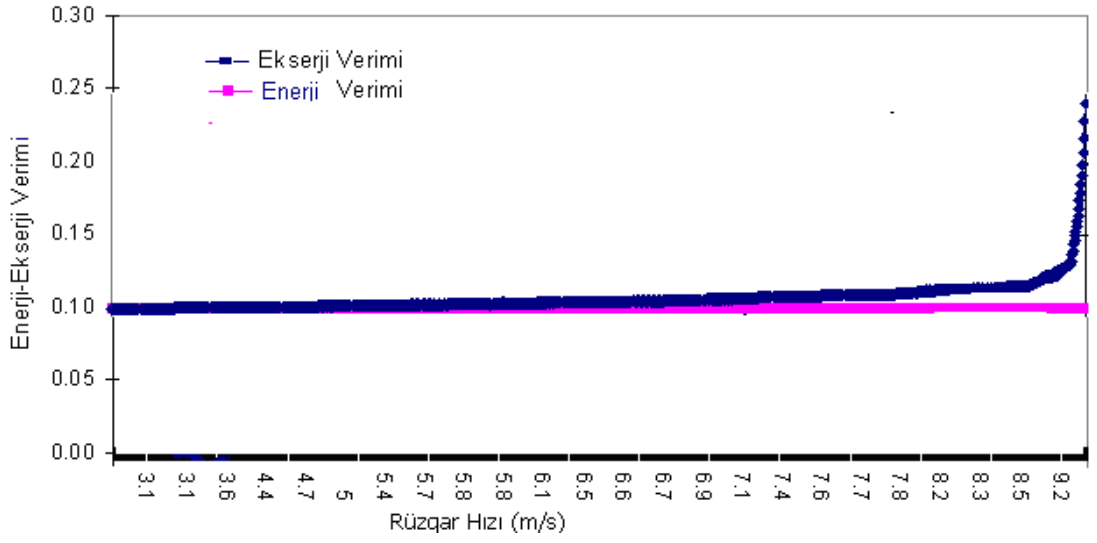
Buhar spesifik ısı kapasitesinin  $C_{p,v}$  sıcaklıkla değişimi aşağıdaki grafikte (Şekil 6.11) gösterilmiştir. Ayrıca fiziksel ekserji hesaplamalarda kullanılabilecek sıcaklığa bağlı ikinci dereceden bir polinomla formüle edilmiştir. Hesaplamalarda 1.85 -188 aralığında değişen buhar spesifik ısı kapasitesinin enerji veriminde etkisi gözlenmemiştir. Ekserji verim hesaplamasında ise etkisinin küçük olduğu görülmüştür. Doğru orantılı olarak artışın olduğu ekserji veriminde % 10 artışa karşılık % 0.001 gibi bir değişim gerçekleşmiştir.



Şekil 6.11 Buhar spesifik ısı kapasitesinin sıcaklıkla değişimi.

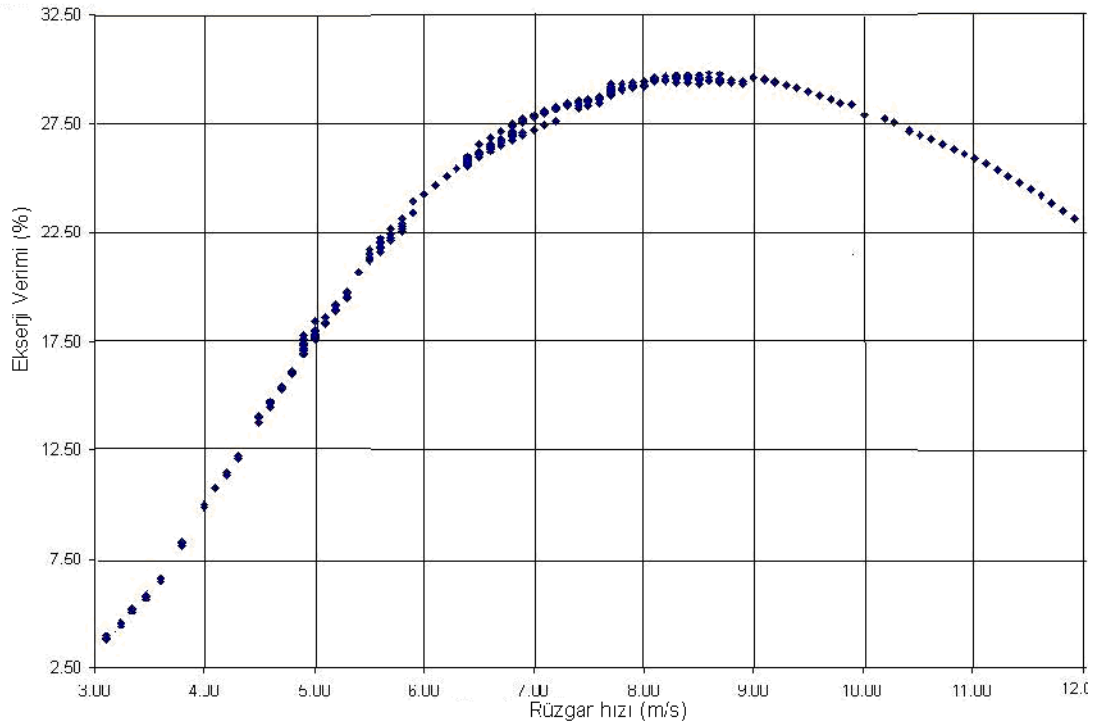
Havanın özgül ağırlığının enerji ve ekserji verimine olan etkin Şekil 6.12'de verilmiştir. Özgül ağırlığın % 10 artırılmasıyla enerji verimi doğru orantılı olarak artmaktadır. Ancak ekserji verimi hesaplamaların da bu etki 6 m/s'den daha küçük hızlarda % 10 artışa bağlı doğru orantılı olurken 6 m/s hızın üzerinde ekserji verimindeki artış daha büyük olmaktadır.





Şekil 6.12 Havanın özgül ağırlığının % 10 artışına bağlı enerji ve ekserji veriminin değişimi.

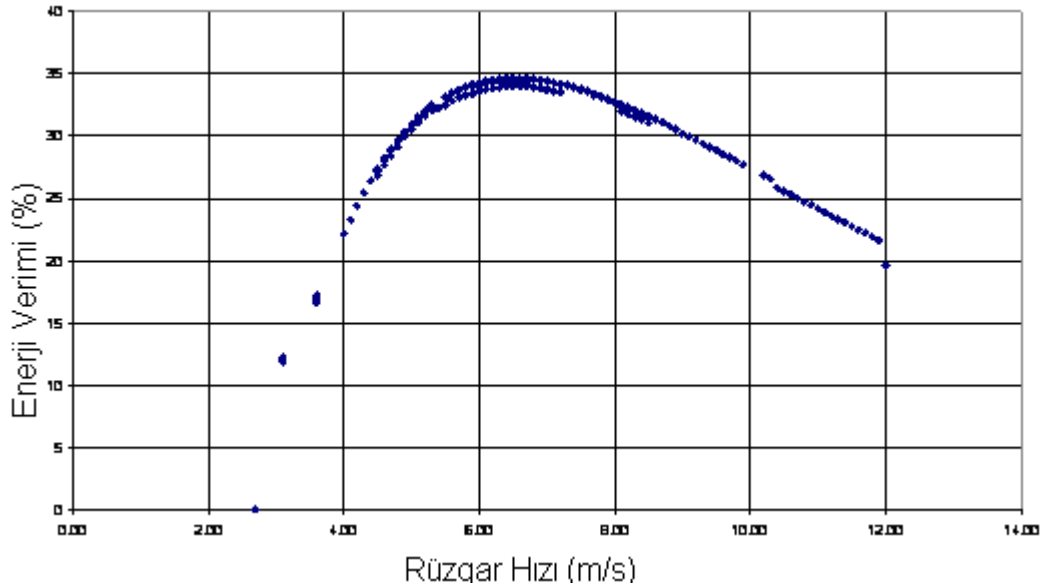
Şekil 6.12 de görüldüğü gibi rüzgar hızının 12 m/s değeri için bu değer havanın özgül ağırlığının % 10 artmasıyla ekserji verimi % 24 artmaktadır.



Şekil 6.13 Rüzgarın değişimine bağlı olarak ekserji veriminin değişimi.

Şekil 6.13 ile ekserji verimi rüzgar hızına bağlı olarak çizilmiştir. Burada ekserji veriminin 8–9 m/s aralığında maksimum değerine ulaştığı görülmektedir. % 28.5 değeri maksimum değer olarak enerji veriminden daha düşük olarak hesaplanmıştır. 9 m/s değerinden sonra ekserji verimi azalmaya başlamaktadır. 2.7 m/s rüzgar türbinin enerji üretmeye başladığı değerdir ve enerji ve ekserji verimi bu değerde sıfır olmaktadır.

Enerji verimi hesaplamasında en önemli sınır değer olan ve bir akışkanın akışından elde edilebilecek maksimum kullanılabilir güç Betz limitidir. Betz, rüzgar türbinin teorik olarak, rüzgarda var olan gücün en fazla 16/27'sini (% 59.2) kullanılabilir güce dönüştüğünü hesaplamıştır. Rüzgar türbininin enerji verimi bunun dışında rüzgar türbininin jeneratörünün elektriksel verimi, iletkenlerde mevcut ısı kayıpları gibi parametrelerle daha düşük hesaplanmaktadır. Rüzgar türbininin enerji verimi Şekil 6.14 ile grafik olarak farklı rüzgar hız değerleri için çizilmiştir.



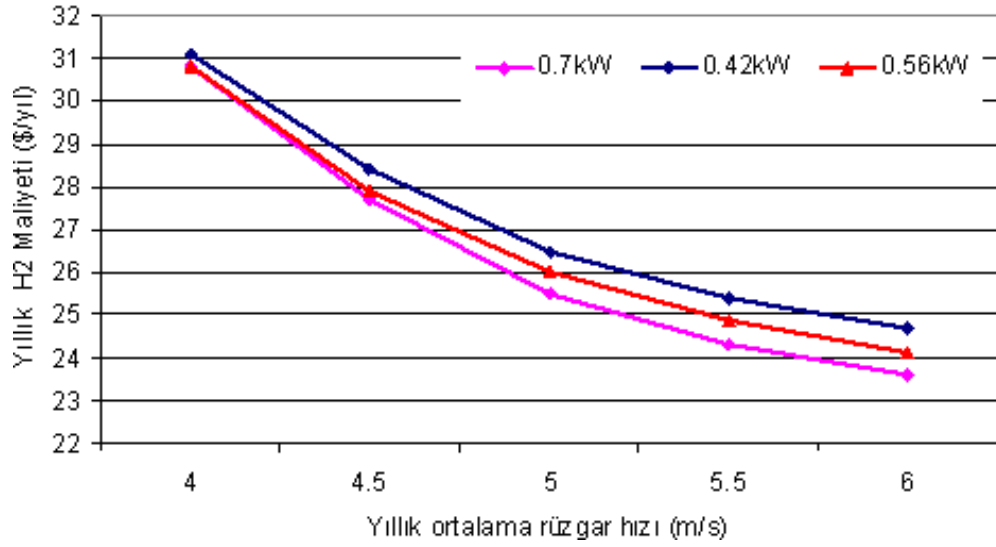
Şekil 6.14 Farklı rüzgar değerlerinde rüzgar türbininin enerji veriminin değişimi.

Enerji verimi 6.6 m/s değerinde maksimum % 34.6 değerine ulaşmaktadır. 7 m/s rüzgar hızından sonra enerji verimi azalmaya başlamaktadır. Enerji verimi ekserji verimine oranla daha büyük olarak hesaplanmıştır. Ayrıca enerji ve ekserji verimleri aynı değerlerde maksimum değerlerine ulaşmamaktadır. Bunun en önemli sebeplerinden biri potansiyel ekserji denkleminde mevcut parametrelerin etkisidir. Ayrıca yanı havanın özgül ağırlığı ve dinamik basınç gibi parametrelerin lineer artmamasıdır. Enerji veriminde rüzgar hızı havanın özgül ağırlığı etkin değişken parametrelerdir. Ancak ekserji denkleminde değişken parametre sayısı daha fazladır ve kinetik ve potansiyel ekserji değerleri farklı değişkenleri içerir. Dolayısıyla ekserji verim ifadesinde paydada yer alan toplam ekserji ifadesinde parametrelerden bir kısmının değişimi daha etkin ve verime etkisi lineer olmamaktadır.

### **6.3.1 Rüzgar Elektroliz Hidrojen Maliyeti**

Rüzgar-Elektroliz hidrojen eldesi ekonomik hesaplamalarında hidrojen maliyeti hesaplanmıştır. Ayrıca bir yıllık süreçte elde edilebilecek hidrojen miktarları belirlenmiştir. Daha genel hesaplama yapabilmek için rüzgar türbininin birim kW değeri için elde edilebilecek hidrojen ve maliyeti hesaplanırken, elektroliz ünitesi için en uygun güç değeri de belirlenmiştir.

Hesaplamalarda yıllık faiz oranı % 8, rüzgar türbini, dönüştürücülerin ve elektroliz sisteminin ekonomik proje periyodu 15 yıl olarak belirlenmiştir. Ekonomik hesaplamalarda, rüzgar türbin sistemlerin ilk yatırım maliyeti için 1 W için 2 US\$ ve elektroliz sistemi için 6 US\$ değeri kullanılmıştır. 1 kW rüzgar türbini ve % 60.4 verime sahip 0.56 kW elektroliz ünitesinden yıllık ortalama 4.03 m/s rüzgara sahip Balıkesir bölgesinde 20.3 kg hidrojen ve yıllık hidrojen maliyeti 30.8 US\$/kg olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.15 Rüzgar hidrojen sisteminde değişken yıllık ortalama rüzgar hızları için hidrojen maliyetinin değişimi.

Şekil 6.15’de görüldüğü gibi elektroliz ünitesinin optimum güç değerini hesaplamak için, değişken yıllık ortalama rüzgar hız değeri için farklı güçteki elektroliz ünitelerinin hidrojen üretim miktar ve maliyeti hesaplanmıştır. Rüzgar hızı arttıkça kapasite kullanım oranı artmakta ve dolayısıyla hidrojen miktarı artmaktadır.

Tablo 6.4 Rüzgar elektroliz sisteminden hidrojen üretim miktarı ve maliyeti.

Elektroliz Gücü (kW)	Rüzgar hızı (m/s)	H <sub>2</sub> (kg)	Kapasite faktörü	Maliyet (\$/kg)
0.7	4	23.5	0.28	30.8
	4.5	26.1	0.31	27.7
	5	28.4	0.33	25.5
	5.5	29.7	0.35	24.3
	6	30.7	0.36	23.6
Elektroliz Gücü (kW)	Rüzgar hızı (m/s)	H <sub>2</sub> (kg)	Kapasite faktörü	Maliyet (\$/kg)
0.56	4	20.3	0.30	30.8
	4.5	22.3	0.33	27.9
	5	24	0.35	26
	5.5	25.1	0.37	24.9
	6	25.9	0.38	24.1
Elektroliz Gücü (kW)	Rüzgar hızı (m/s)	H <sub>2</sub> (kg)	Kapasite faktörü	Maliyet (\$/kg)
0.49	4	18.4	0.31	31.1
	4.5	20.2	0.34	28.4
	5	21.6	0.36	26.5
	5.5	22.6	0.38	25.4
	6	23.2	0.39	24.7

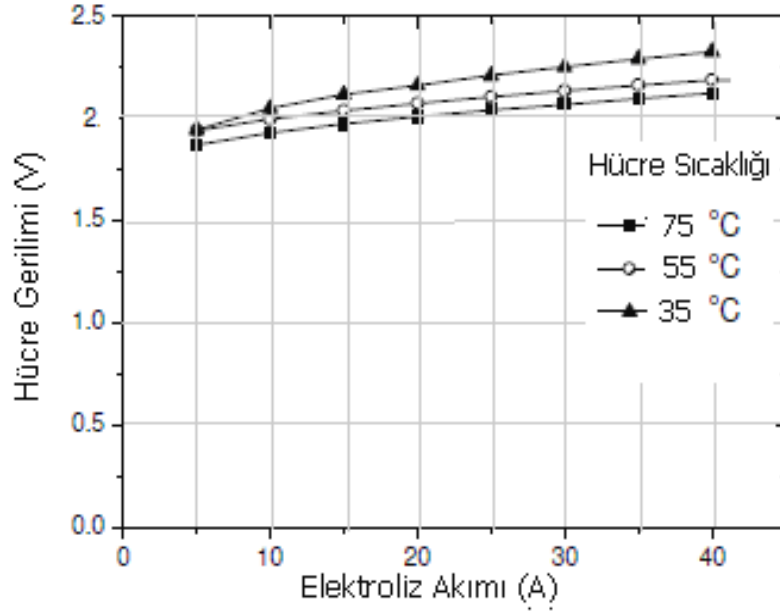
Ayrıca 1 kW rüzgar türbini gücüne karşılık 4-4.5 m/s rüzgar hız değerlerinde hidrojen üretim maliyeti yaklaşık olarak aynı olurken 0.42 kW bir elektroliz ünitesi kullanmakla, 0.7 kW kullanmak arasında pek fark görülmemiştir. Yıllık bazda ortalama rüzgar hızı yüksek olan bölgelerde elektroliz ünitesinin boyutu önemli olmaktadır. En optimum değer olarak 0.7 kW değeri belirlenmiştir. 6 m/s hız değerinde en düşük maliyet 23.6 US\$/kg olarak bulunmuştur (Tablo 6.4).

#### **6.4 PEM Elektroliz Enerji ve Ekserji Analizi Sonuçları**

Suyun elektroliz ile hidrojen ve oksijene ayrılması, uygulanan katalizör ortamında bir elektrik alanın uygulanması ile gerçekleşen bir elektrokimyasal reaksiyondur. Elektroliz ile suyun hidrojen ve oksijene ayrışması için hesaplanan teorik gerilim yetersiz kalmaktadır. Bunun sebebi reaksiyon süresince toplam kayıplardır. Bu sebeple hücreler arasına uygulanacak teorik gerilimden (1.229V) daha büyük bir gerilimin uygulanması gerekmektedir. Suyun elektroliz yolu ile oksijen ve hidrojene ayrışmasında uygulanacak gerilim birçok değişkene bağlı olarak değişmektedir.

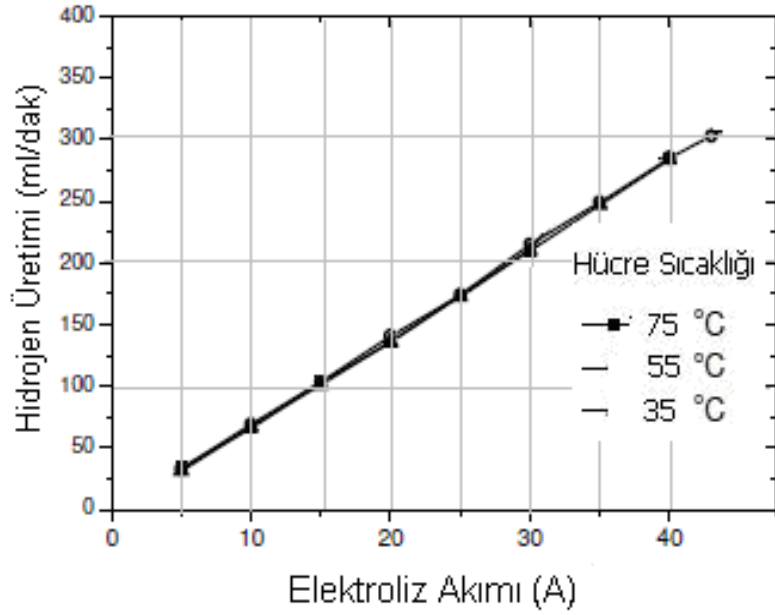
Elektroliz hücre geriliminin sıcaklık ve akım yoğunluğuyla değişimini deneysel ölçümlerle belirlemek için elektroliz hücresinin akımı 10–40 A aralığında değiştirilerek hücre gerilimine olan etkisi incelenmiştir. Sıcaklığın elektroliz gerilimine etkisinin belirlenebilmesi için ise hücre sıcaklığı 25–75°C arasında değişimi incelenmiştir. Şekil 6.16'da görüldüğü üzere sıcaklık ve akım yoğunluğunun değişimi incelenmiştir. 35°C'de elektroliz gerilimi 2.18 den 2.35 V değerine artmıştır. Akım yoğunluğunun artmasına bağlı olarak omik kayıpların etkisi ile hücre gerilimi artmaktadır. Sıcaklık değişiminin elektroliz gerilimine etkisinin incelenmesi için suyun sıcaklığı 35–75°C aralığında artırılmıştır. Akım 25 A değerine ulaştığında 35°C de 2.2 V olan elektroliz gerimi 75°C derecede 2 V olarak ölçülmüştür. Sıcaklığın artmasıyla elektroliz gerilimi azalmaktadır. 75°C'de 10–40 A akım aralığında elektroliz gerilimi 1.92 V den 2.1 V değerine artmıştır. Sıcaklık artışı elektroliz sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonu hızlandırdığı ve ortamdaki elektrolitin

iletkenliğini artırdığı için elektroliz gerilimi azalmaktadır. Ancak eş sıcaklık artışına rağmen 75°C 'ye yaklaştıkça gerilim azalış oranı fazla olmamaktadır.



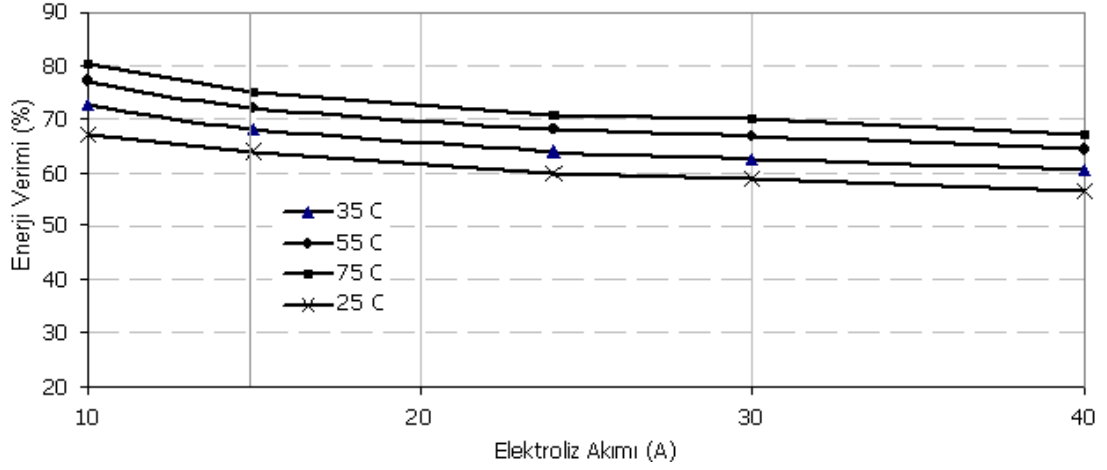
Şekil 6.16 Hücre geriliminin akım yoğunluğu ve sıcaklıkla değişiminin deneysel olarak belirlenmesi.

Ayrıca akım yoğunluğunun ve sıcaklık değişiminin hidrojen üretimine yaptığı etki de incelenmiştir. Şekil 6.17’de görüldüğü gibi hidrojen üretim miktarının akım yoğunluğuyla değişimi artışının hidrojen üretimiyle değiştiği görülmüştür. Sıcaklığın 35–75°C aralığında değişiminin hidrojen üretimine etkisi çok düşük düzeyde olmaktadır. 35°C’de, 10 A için hidrojen üretimi 75 ml/dak olarak, 40 A de ise 275 ml olarak ölçülmüştür. Aynı şekilde 25 A değerinde sıcaklığın 35–75°C değişimiyle hidrojen üretim miktarı 165–170 ml/dak artışla çok küçük bir oranda olmuştur.



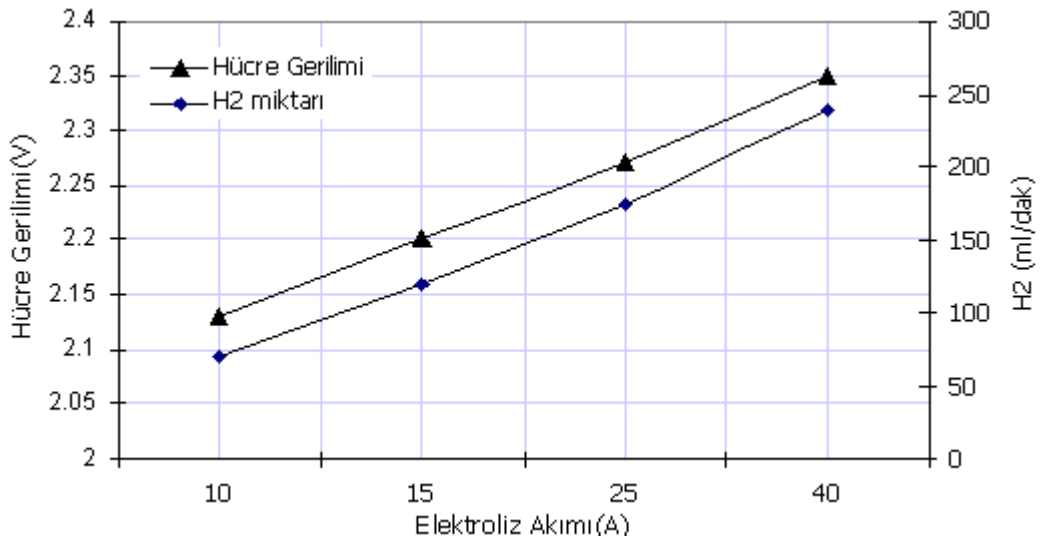
Şekil 6.17 Hidrojen üretim miktarının akım yoğunluğuna ve sıcaklıkla değişimi deneysel olarak incelenmesi.

Yukarıda yapılan ölçümlere bağlı olarak elektroliz hücresinin enerji verimi farklı sıcaklıklar ve akım yoğunluk değerleri için hesaplanmıştır. Şekil 6.18'de çizilen grafikte 35°C derecede yapılan hesaplamalarda 10 A için enerji verimi % 71, 40 A için bu değer % 60.2 olarak bulunmuştur. Akım yoğunluğunun artışıyla omik kayıpların artmasıyla verim azalmaktadır. Sıcaklık artışıyla hücre gerilimindeki azalışa bağlı olarak verim artmaktadır. Verim 75°C sıcaklık için 10–40 A akım aralığında % 67–82 değer aralığında değiştiği bulunmuştur. 25°C'de 25 A akım için enerji verimi % 60.4 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.18 Enerji veriminin akım yoğunluğuna ve sıcaklığa bağlı değişimi.

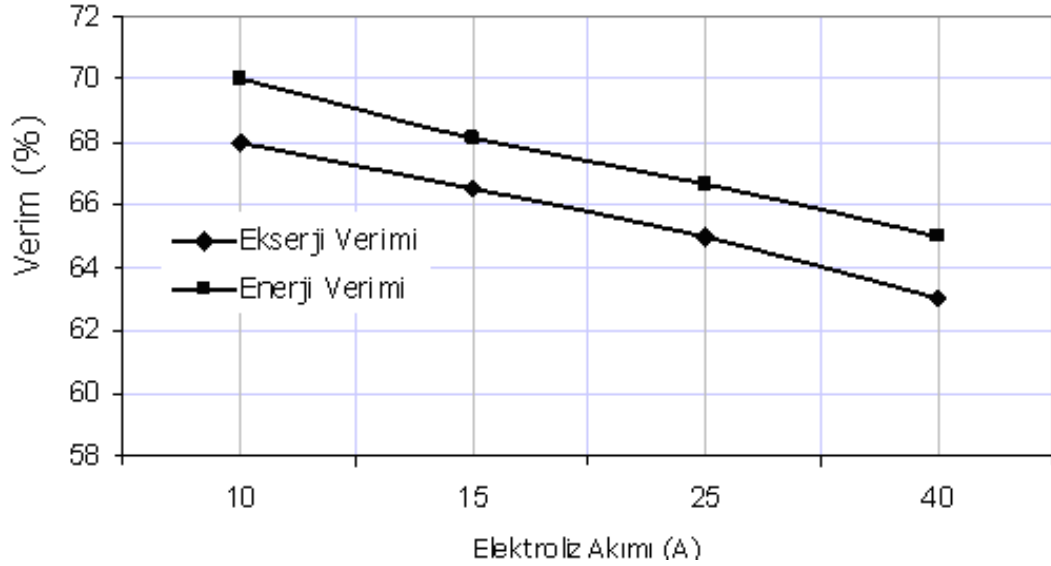
DeneySEL çalışmanın yanında sistemin Matlab-Simulink programında modellenmesi yapılmıştır. Modellenen sistemde elde edilen sonuçların deneysel sistemde ölçülen verilerle uyum göstermiştir. Şekil 6.19 incelendiğinde 35°C derecede 10 A akım değerinde elektroliz gerilimi 2.2 V, 40 A de ise 2.35 V olarak bulunmuştur. Benzer şekilde modelde hidrojen üretim miktarı 10 A de 71 ml/dak, 40 A de ise 260 ml/dak olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.19 Matlab Simulink modeli ile hücre geriliminin ve hidrojen miktarının akım yoğunluğuyla değişimi (T=35°C).



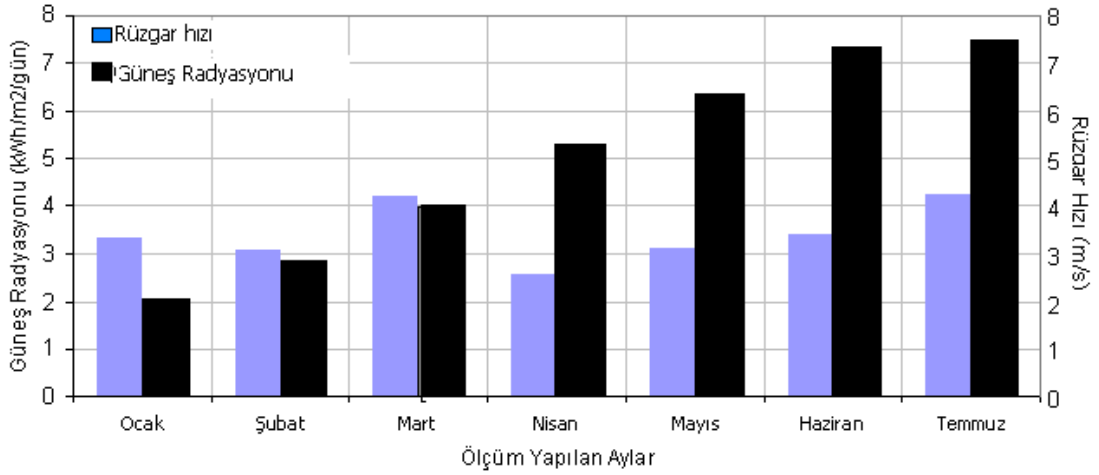
Simulink modeli ile yapılan analizde enerji ve ekserji verimi Şekil 6.20’de gösterilmiştir. 35°C sıcaklıkta enerji ve ekserji verimleri arasında çok küçük oranda fark bulunmuştur. Enerji verimi ekserji verimine oranla daha büyük değerde belirlenmiştir.



Şekil 6.20 Enerji ve ekserji veriminin akım yoğunluğu ile değişiminin Matlab-Simulinkte belirlenmesi(T=35 °C).

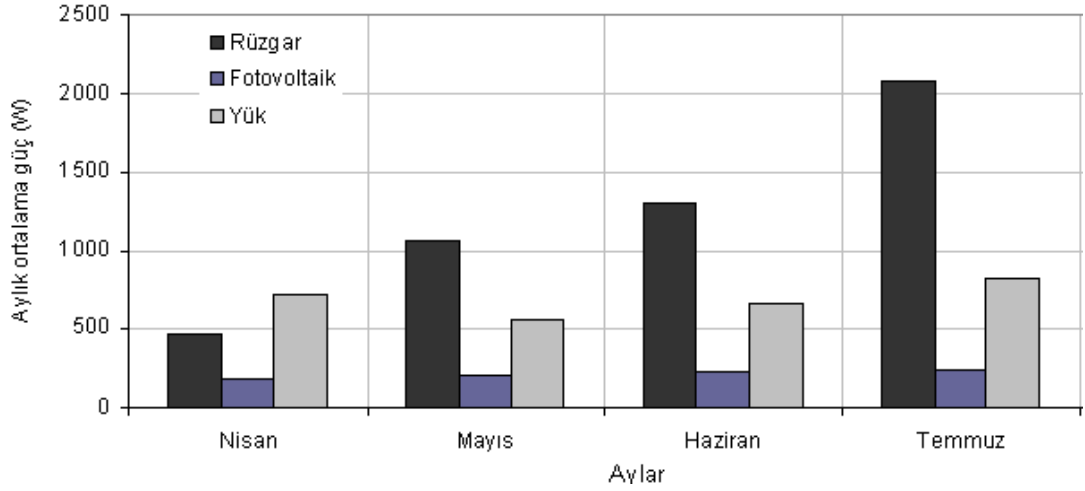
### 6.5 Yenilenebilir Hibrid Sistemin Analiz Sonuçları

Yenilenebilir hibrid enerji sisteminin performansını değerlendirmek için Bigadiç’te kurulan meteorolojik ölçüm istasyonu ile rüzgar hızı, güneş radyasyonu değeri 10 dakika aralıklarla ölçülerek, değerler kaydedilmiştir. Şekil 6.21 ile Ocak-Temmuz aylarında aylık ortalama rüzgar hızı 2.6–4.3 m/s aralığında değişmektedir. En yüksek rüzgar hızı Mart ayında ölçülmüştür. Güneş radyasyonu günlük ortalama değer olarak 2–7.4 kWh/m<sup>2</sup> aralığında değişirken Haziran ve Temmuz ayında ortalama günlük 7 kWh/m<sup>2</sup> civarında değişmektedir.



Şekil 6.21 Ocak-Temmuz ayları arasında tesis'te ölçülen rüzgar hızı ve güneş radyasyonu.

Meterolojik ölçümlerin dışında rüzgar türbini, fotovoltaik paneller ve tüketilen enerji miktarı ölçülmüştür. Rüzgar türbinin çıkışından elde edilen en yüksek değer Haziran ayında gerçekleşmiştir. Rüzgar türbini Temmuz ayı saatlik ortalaması 2.072 kW ve fotovoltaik panellerin 0.230 kW olarak kayıt edilmiştir. Ölçülen rüzgar hızlarının aylık ortalama değerlerine bakılarak rüzgar çıkış güçlerinin değişimi doğrusal değildir. Bunun sebebi çıkış gücünün rüzgar hızıyla üssel olarak değişmesidir. Ayrıca rüzgar türbininin her rüzgar hızında enerji üretmediği ve 2.7 m/s altında enerji üretimi olmamaktadır. Bu sebeple günlük ortalama ve aylık ortalama değerlerle hesaplama yanıltıcı olmaktadır. Bu nedenle performans değerlendirmelerinde ölçüm aralıkları 10 dakika gibi kısa aralıklarla yapılması gerekmektedir.



Şekil 6.22 Nisan-Temmuz ayları arasında üretilen ve tüketilen enerji değerleri.

Nisan-Temmuz ayları arasında rüzgar ve fotovoltaik panellerden üretilen enerji değerleri ve sistemdeki yük dolayısı ile tüketilen enerji değerleri ise Şekil 6.22’de görülmektedir. Rüzgardan üretilen enerji Nisan ayında minimum değerinde iken en fazla üretimin Temmuz ayında olduğu görülmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen güçler ve akülerin gerilimine bağlı olarak şarj durumu Tablo 6.5’te verilmiştir. Nisan-Temmuz aralığında şarj durumu aylık ortalama olarak % 56.6–88.3 aralığında değişmektedir. Akü şarj durumu Nisan ayında yükün yüksek olması sebebiyle % 56.6 olarak düşük düzeyde gerçekleşmiştir. Fotovoltaik sistemden elde edilen 5 aylık ortalama çıkış gücü günlük 0.218 kW, rüzgar türbininden ise 1.265 kW olmuştur.

Tablo 6.5 Ölçüm yapılan aylarda aylık ortalama saatlik güç değerleri ve akü şarj durumu.

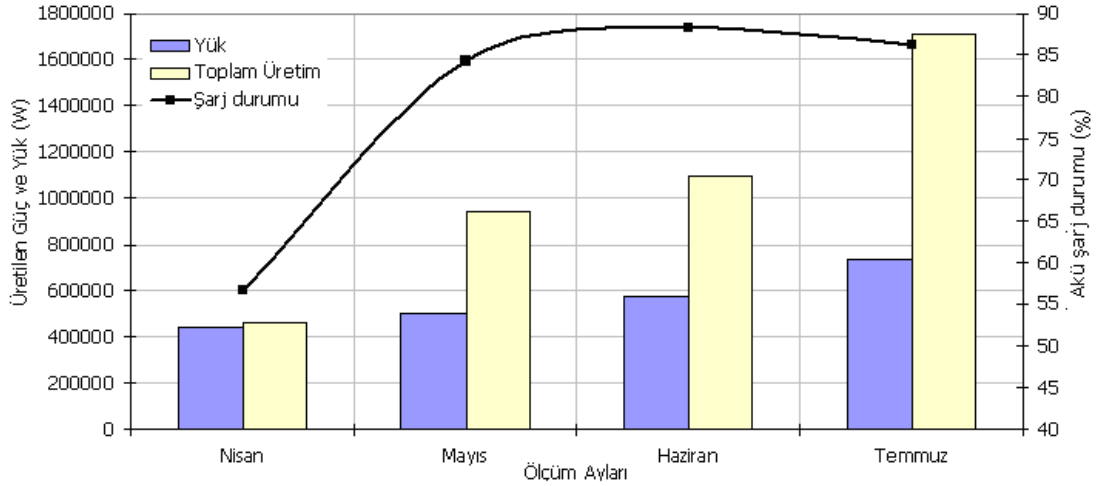
	Rüzgar türbini (W)	Fotovoltaik panel (W)	Toplam güç (W)	Akü şarj durumu (%)	Tesis elektrik yükü (W)
Nisan	470.7	171.5	642.2	56.6	721.6
Mayıs	1061.6	199.5	1261.1	84.2	562.8
Haziran	1300.0	220.7	1520.7	88.3	660.4
Temmuz	2072.0	230.7	2302.7	86.2	823.8

Gerek rüzgar türbininde gerekse fotovoltaik sistemde akü şarj durumuna bağlı olarak kontrol yapılmıştır. Akülerin tam şarj olduğu durumlarda akülerin aşırı şarj olup zarar görmesini engellemek için akü gerilimi 54 V değerini aşılmayacak şekilde koruma yapar. Rüzgar türbininde bu konuda iki temel yöntem kullanılmaktadır. Aküler dolduğunda türbini akülerden ayırmanın türbini boşa çıkartarak hasar görmesi gibi çok ciddi sorun olmasından dolayı aküler şarjlıysa akü gerilimini kontrol edilerek rüzgar türbinin kanat eğim açısı kontrol edilir (pitch kontrol). Bu durumlarda rüzgar ve güneş enerjisi mevcutken enerji üretimi söz konusu olmamaktadır.

Tablo 6.5 Yenilenebilir hibrid enerji sisteminin aylık kapasite kullanım oranları.

Aylar	Rüzgar (%)	Fotovoltaik (%)	Hibrid Sistem (%)
Nisan	4.7	1.7	5.8
Mayıs	10.6	2.0	11.4
Haziran	13.0	2.2	13.8
Temmuz	20.7	2.3	20.9

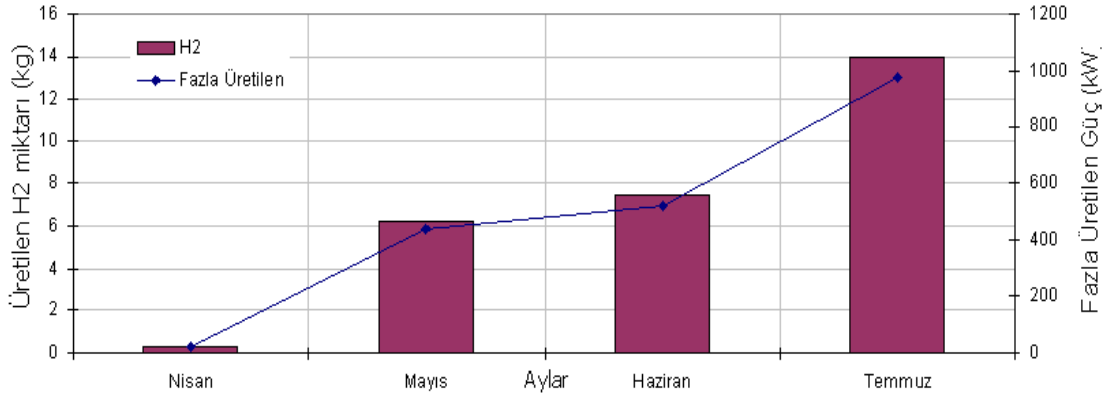
Tablo 6.5 ile verilen aylık saatlik enerji üretim değerlerinin yanında sistemden elde edilebilecek maksimum enerjinin üretilen enerji miktarıyla kapasite kullanım değerleri hesaplanarak Tablo 6.6 ile verilmiştir. Nisan ayında % 5.8 olarak gerçekleşen toplam kapasite kullanımı Temmuz ayında % 20.9 olarak en yüksek değerinde gerçekleşmiştir. Şebeke bağımsız rüzgar türbini sistemlerinde daha hızlı bir ekonomik geri dönüş sağlanması açısından % 30–35 kapasite kullanım değerleri ön görülmektedir. Fotovoltaik sistemde kapasite kullanım oranı ortalama olarak % 2.1 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.23 Tesiste akü şarj durumu, toplam üretim ve yükün Nisan-Temmuz aylarında değişimi.

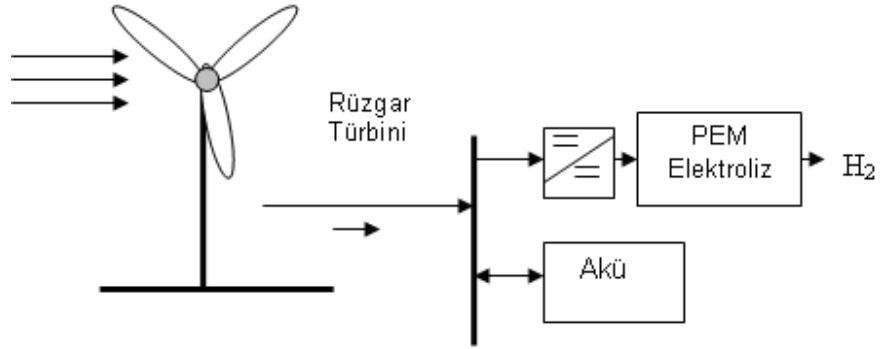
Şekil 6.23'te Nisan-Temmuz ayları arasında sistemde kullanılan yük, toplam üretim, şarj durumu görülmektedir. Hibrid sistemlerde şarj kontrol sistemi yaygın olarak aküleri korumaya yönelik kullanılmaktadır. Ancak yapılan bu kontrol ile mevcut kullanılacak enerji kullanılamamaktadır. Özellikle uzun dönemli enerji depolamak için elektroliz yolu ile hidrojenin depolanarak yakıt pillerinde kullanılması mümkündür. Ancak özellikle ilk yatırım maliyetlerinin yüksek oluşu sebebiyle tercih edilmemektedir. Sistemde elde edilecek fazla enerji kontrolör olmaksızın yükün akülerin tam şarj durumunda elektroliz yolu ile hidrojen üretim miktarı hesaplanmıştır. En yüksek hidrojen üretimi Temmuz ayında 14 kg olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.24). Ölçüm yapılan dönem içerisinde 33.17 kg hidrojen üretimi yapılabileceği hesaplanmıştır.

Hibrid yenilenebilir enerji sisteminden elde edilebilecek fazla enerji ile hidrojen eldesinin belirlenmesinin yanı sıra, sistemde sadece hidrojen üretiminin enerji ve ekserji verimleri açısından incelenmesi de yapılmıştır. Bu amaçla sistemde rüzgar ve fotovoltaik sistemin enerji yolları ayrı ayrı enerji ve ekserji verimleri açısından incelenmiştir.

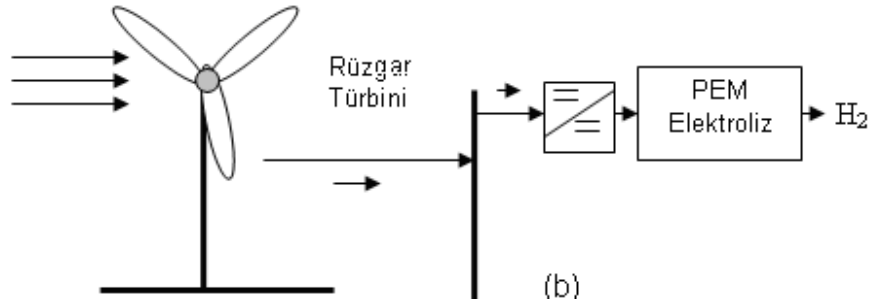


Şekil 6.24 Şarj kontrolü yapılmaksızın sistemden elde edilecek fazla enerji ile üretilebilecek hidrojen miktarı.

Değerlendirmede her sistemin enerji yolu kendi içerisinde iki durumda incelenmiştir. Rüzgar türbininin enerji yolu Şekil 6.25a'da görüldüğü gibi Rüzgar türbini-Akü-Elektroliz ve Şekil 6.25b'de görüldüğü gibi Rüzgar türbini-Elektroliz enerji yoludur.



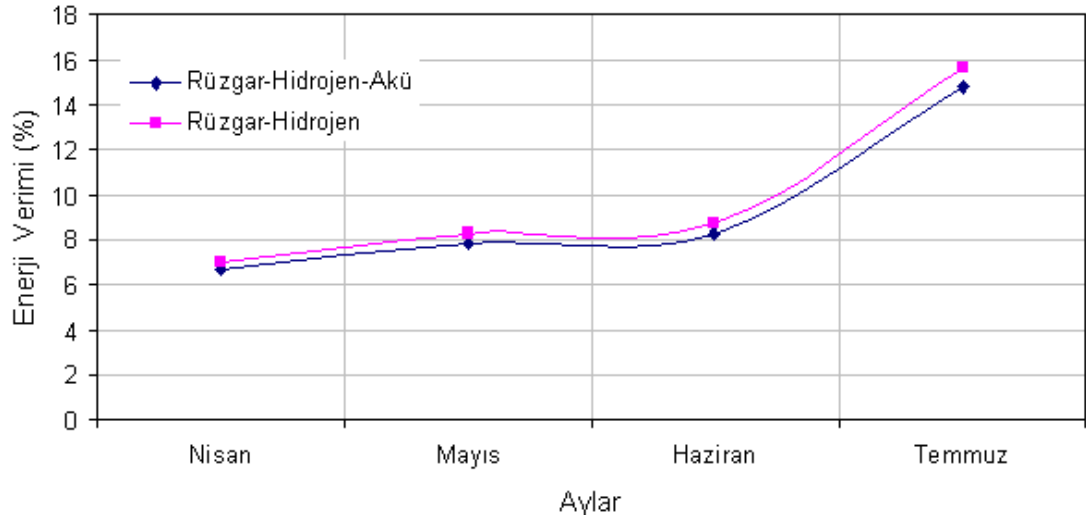
(a)



(b)

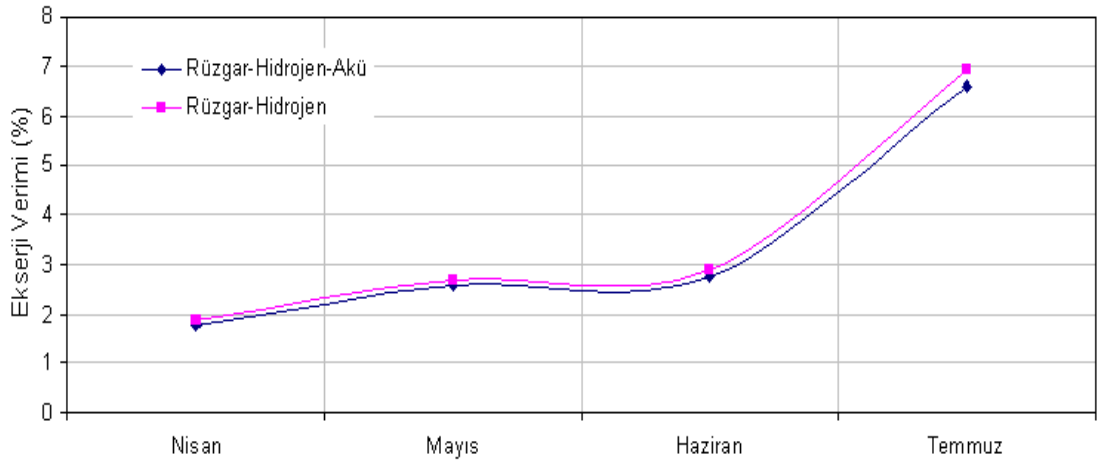
Şekil 6.25 İncelenen rüzgar-elektroliz enerji yolları.

Depolamanın söz konusu olduğu durumda akü verimi hesaba katıldığı için enerji ve ekserji verimi düşük olmaktadır. Rüzgar enerji ve ekserji verimi hesaplamasında aylık ortalama değerler kullanılmıştır. Temmuz ayı ortalama rüzgar hızı 4.2 m/s olurken Haziran ayında bu değer 3.3 m/s olarak ölçülmüştür. Enerji verimi akü depolaması ile Haziran ayında % 8 olarak en yüksek değerine ulaşırken, Temmuz ayında % 14.8 değeriyle en yüksek değerde hesaplanmıştır. Verim değerlerinin rüzgar hızı ile değişimi üssel olması sebebi ile Temmuz ve Haziran ayları arasında enerji ve ekserji verimleri açısından fark oluşmuştur (Şekil 6.27).



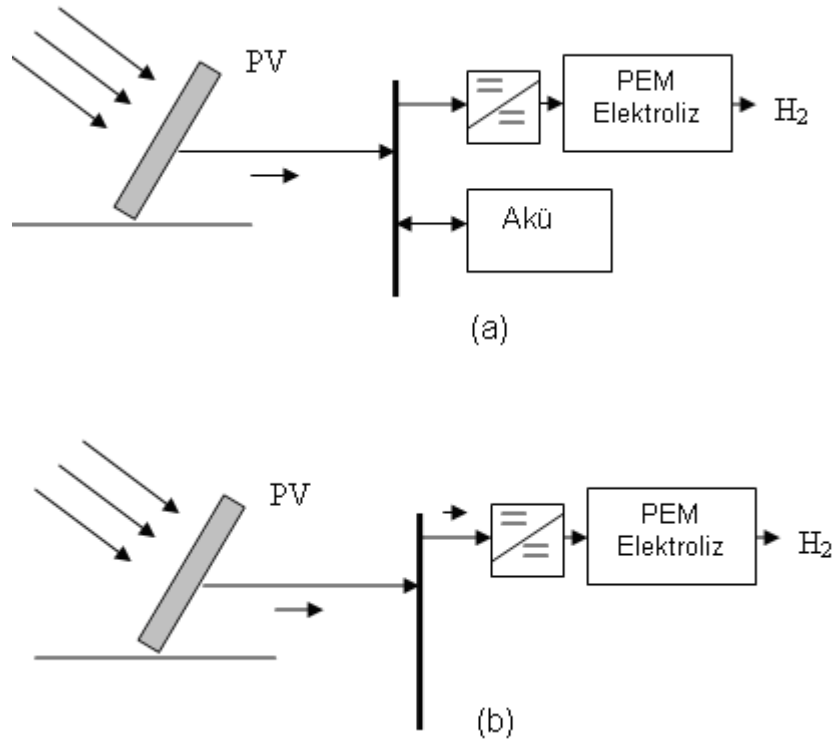
Şekil 6.26 Rüzgar ile hidrojen eldesinin toplam enerji verimi.

Ekserji verimi enerji verimine oranla daha düşük olarak depolama olmadan Temmuz ayında % 6.9 Haziran ayında ise % 3 olarak hesaplanmıştır. Tersinmezlikler ve çeşitli kayıplar nedeni ile ekserji verimi daha düşük olarak bulunmuştur.



Şekil 6.27 Rüzgar ile hidrojen eldesinin toplam ekseji verimi.

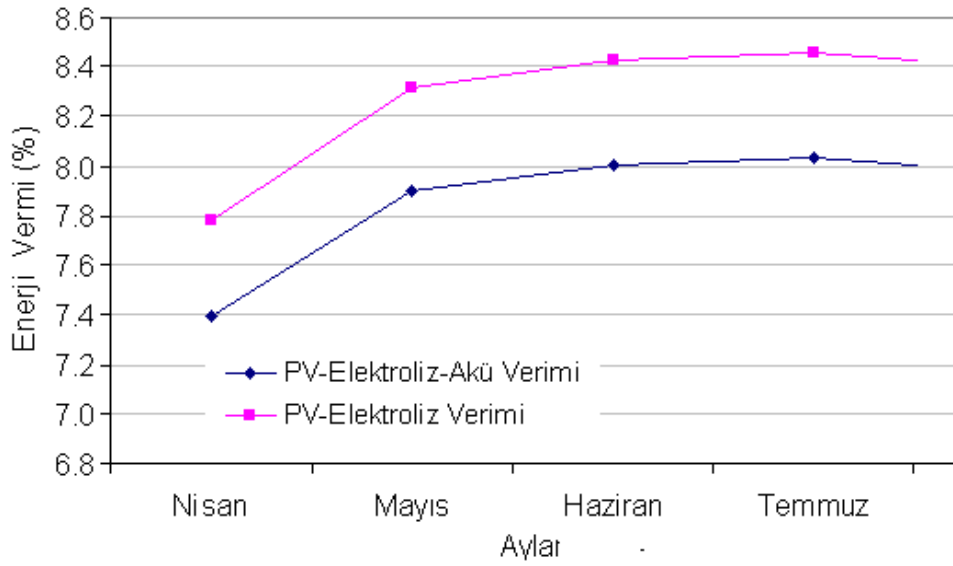
Hibrid enerji sisteminin enerji yollarından bir diğeri de fotovoltaik enerji yoludur. Burada da sistem Şekil 6.28'de görüldüğü gibi kendi içinde akünün olduğu ve olmadığı durum olarak iki açıdan incelenmiştir.



Şekil 6.28 Fotovoltaik hidrojen eldesinin enerji yolları.

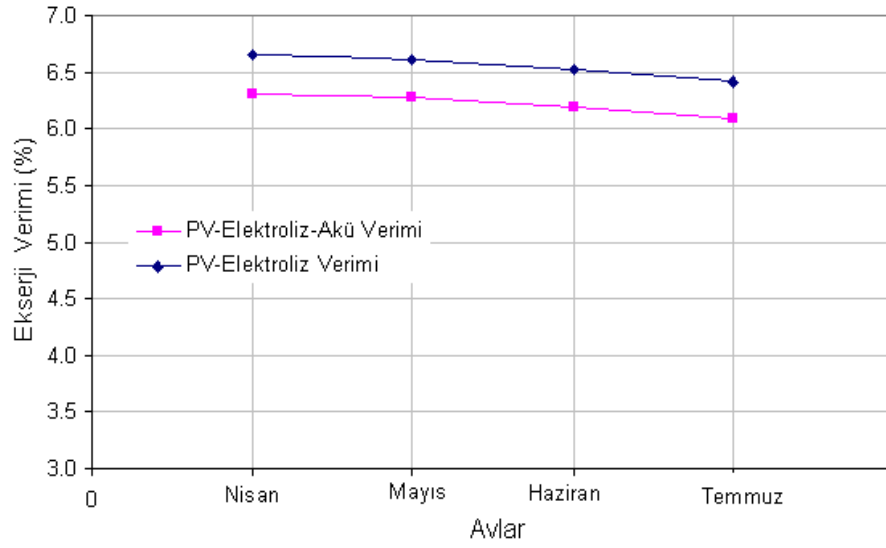


Nisan-Temmuz ayları arasında PV-hidrojen üretiminin enerji verimi % 7.8 ile Nisan ayında gerçekleşirken, Temmuz ayında bu değer % 8.46 ile en büyük değerine depolamanın olmadığı durumda ulaşmaktadır (Şekil 6.29). Enerji veriminin aylara göre değişiklik göstermesinin temel nedeni fotovoltaik sistemin aylık ortalama radyasyon ve sıcaklık değerlerinin farklılık göstermesidir. Rüzgar-Elektroliz sistemine benzer olarak enerji yoluna akü eklendiğinde bu değer daha düşük olarak gerçekleşmektedir.



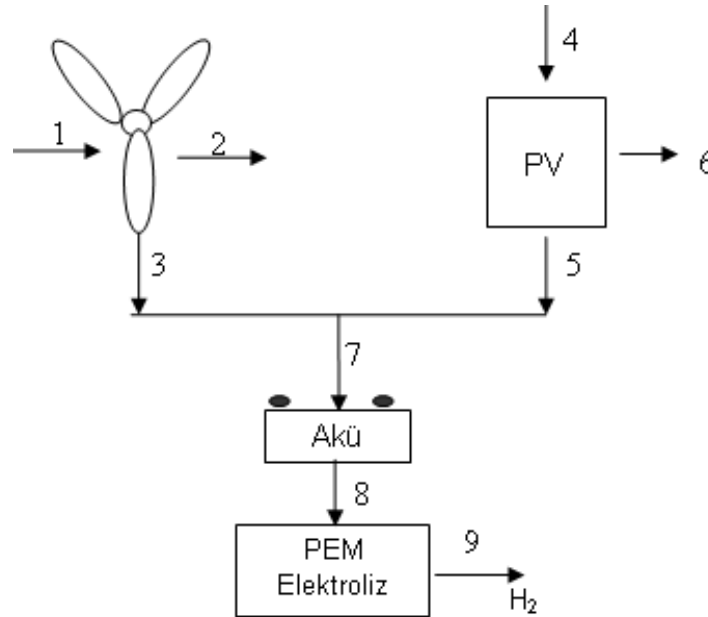
Şekil 6.29 Fotovoltaik-elektrolizden hidrojen eldesinin enerji verimi.

Fotovoltaik-Elektroliz ile hidrojen eldesinin toplam ekserji verimi enerji verimine oranla daha düşük olarak Nisan ayında % 6.65, Temmuz ayında ise % 6.4 olarak hesaplanmıştır. Akülü sistemde şarj deşarj olayına bağlı olarak verim daha düşük olarak Temmuz ayında % 6.1 olarak hesaplanmıştır. Gerek enerji gerek ekserji veriminin söz konusu olduğu tüm hesaplamalarda depolamanın olmadığı direk kullanım seçeneği daha verimli bir seçenek olmaktadır (Şekil6.30).



Şekil 6.30 Fotovoltaik-elektrolizden hidrojen eldesinin toplam ekserji verimi.

Daha detaylı bir gösterim için Şekil 6.31’de çizilen hibrid sistem kayıt edilen meteorolojik veriler ve şekilde gösterildiği gibi numaralandırılan giriş ve çıkış noktalarında enerji ve ekserji değerleri Tablo 6.9’da hesaplanmıştır.



Şekil 6.31 Hibrid sistem için tüm enerji yollarının detaylı olarak incelenmesi.

Tablo 6.7’de rüzgar türbini, fotovoltaik panel, akü ve elektroliz sisteminden oluşan sisteme ilişkin meteorolojik verilere bağlı olarak örnek değer bir için numaralandırılan noktadaki enerji ve ekserji değeri verilmiştir.

Tablo 6.6 Hibrid sistemin tüm elemanlarının enerji ve ekserji değerleri.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Enerji (W)	1907	1343	433	3731	480	3251	58	55	35.4
Ekserji (W)	39550	20010	433	3555	400	3155	58	55	31.35
Sıcaklık (°C)	Nem (%)		Rüzgar Hızı (m/s)		Hava Basıncı (Atm)		Güneş Radyasyonu (W/m <sup>2</sup> )		
20.2	45		4.2		1.002		525		

### 6.6 Belirsizlik Analizi Sonuçları

Deneysel çalışmada ölçülmüş olan sıcaklık, rüzgar hızı, nem, basınç, akım gerilim değerlerinin deneysel belirsizlikleri hesaplanmış ve hesaplamalar sonucunda bulunan değerler Tablo 6.8'de gösterilmiştir. Yapılmış olan belirsizlik analizi bu çalışmadaki deneysel belirsizliklerin kabul edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir.

Tablo 6.7 Deneysel hesaplanan değerlerin belirsizlikleri.

Parametre	Birim	Sonuç
<b>Deneysel ölçümler</b>		
PV Akım ölçümünde belirsizlik	A	± 0.624
PV Gerilim ölçümünde belirsizlik	V	± 2.595
PV Rüzgar Hızı ölçümünde belirsizlik	m/s	± 0.1
Güneş Radyasyonu ölçümünde belirsizlik	W/m <sup>2</sup>	± 40
Elektroliz Akım ölçüm belirsizliği	A	± 0.25
Elektroliz Gerilim ölçüm belirsizliği	V	± 0.023
Hidrojen akışındaki belirsizlik	ml/dak	± 5
Rüzgar hızı ölçümündeki belirsizlik	m/s	± 0.6
<b>Hesaplanan Toplam Belirsizlik</b>		
PV Ekserji verimi ( $\psi_{pv}$ )		± % 6.06
PV Enerji verimi ( $\eta_{pv}$ )		± % 3.00
Elektroliz Enerji verimi ( $\eta_{elek}$ )		± % 1.2
Rüzgar Enerji Verimi ( $\eta_{rüz}$ )		± % 5.5

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sürdürülebilir yaşamı desteklemek için Balıkesir Bigadiç'te Kınalı Keklik üretim tesisinin enerji ihtiyacını yenilenebilir enerjilerle (YE) karşılamak amacı ile yola çıkılmıştır. Mevsimlere bağlı olarak YE potansiyelinin değişken olmasından dolayı oluşan fazla elektriğin depolanma problemini gidermek amacı ile elektroliz ile H<sub>2</sub> üretimine gidilmiştir. Bu amaçla tesisin yıllık enerji ihtiyacı ve bölgenin meteorolojik verileri kullanılarak sistemde kullanılan tüm elemanların boyut optimizasyonu yapılmıştır. Modelleme ve analiz için HOMER ve Matlab-Simulink programlarından yararlanılarak, 1 kWp fotovoltaik ve 10 kW rüzgar türbini, 48 kW aküler ve 5 kW evirici ile birlikte hibrid bir enerji sistemi kurulmuştur. Sistemin performansını ortaya çıkarmak amacı ile enerji ve ekserji analizleri yapılmış, ayrıca yaşam döngüsü maliyet analizi ile ekonomik değerlendirmeleri yapılmıştır. Sistem çeşitli parametrelere bağlı olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda kısaca maddeler halinde özetlenmiştir:

- Yapılan boyutlandırma analizinde rüzgar-güneş hibrid enerji sistemi en ekonomik seçenek olarak bulunmuştur. 10 kW rüzgar, 1 kWp fotovoltaik sistem için enerji maliyeti 0.816 \$ olarak belirlenmiştir.
- Bigadiç'te kurulan hibrid sistem yükü beslerken, üretilen fazla enerji ile elde edilebilecek yıllık hidrojen miktarı 33.17 kg olarak hesaplanmıştır.
- Enerji analiziyle yapılan değerlendirmelerin yanında ekserji analizinin yapılmasının sistem performansı açısından önemli olduğu belirlenmiştir. Ekserji analizinde yapılan değerlendirmelerin daha detaylı ve enerji analizinden farklılıklar gösterdiği görülmüştür.

- Fotovoltaik sistemin enerji verimi % 10.7–14, ekserji verimi ise % 9.5–12 aralığında değişmektedir. Rüzgar enerjisinin enerji verimi maksimum değer olarak % 36.6, ekserji verimi ise % 28.5 olarak bulunmuştur. Ayrıca enerji ve ekserji verimlerinin rüzgar hızına bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Enerji ve ekserji veriminin maksimuma ulaştığı rüzgar hız değerlerinin de farklı olduğu belirlenmiştir.
- Yapılan çalışmada 6-7 m/s rüzgar hız değerinde ekserji veriminin, 8-9 m/s aralığında ise enerji veriminin maksimum olduğu görülmüştür. Bu nedenle rüzgar türbini yer seçimlerinde rüzgar hız yön ölçümlerinin dışında havanın basınç, sıcaklık nem ve benzeri özelliklerinin de ölçülerek değerlendirilmesinin yani ekserji analizinin yapılması gereği ortaya çıkmıştır.
- Gerek rüzgardan gerek fotovoltaik sistemden elektroliz yardımıyla hidrojen eldesinde çalışma koşullarının değişken olması, PEM elektroliz sisteminin değişken koşullarda analiz edilmesini gerektirmiştir. PEM elektroliz sisteminin enerji analizinde yüksek sıcaklıkta sistemin daha verimli çalıştığı gözlenmiştir. 35°C 'de elektroliz gerilimi 2.18 den 2.35 V değerine artmıştır.
- Yüksek akım yoğunluklarında PEM elektroliz sisteminin verimin azaldığı görülmüştür. 75°C'de 10–40 A akım aralığında elektroliz gerilimi 1.92 V'tan 2.1 V değerine artmıştır.
- Elektroliz sisteminde sıcaklığın 35–75°C aralığında değişiminin hidrojen üretimine etkisi çok düşük düzeyde olduğu görülmüştür. Enerji verimi için 35°C derecede yapılan hesaplamalarda 10 A için % 71, 40 A için % 60.4 olarak hesaplanmıştır.
- PEM elektroliz ünitesinin modelleme ile Matlab–Simulinkte 35°C sıcaklık için yapılan hesaplamada ise enerji verimi 10 A için % 68.7 ve 40 A için

ise % 64.2 olarak ihmal edilen bazı değerlere bağılı olarak deneysel ölçüm sonuçlarına göre % 3-5 değerinde farklı olarak hesaplanmıştır. Ekserji verimi ise enerji veriminden daha düşük olarak 10 A için % 68, 40 A için ise % 63 olarak hesaplanmıştır.

- Fotovoltaik sistemin enerji verimlerinin eldesinde, saatlik veriler yerine ortalama değerler ile elde edilen günlük, aylık, yıllık değerlerin kullanılmasıyla elde edilen verim değerlerinin de farklı olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle çalışmada yapılan hesaplamalarda saatlik veriler kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Hata payının günlük ortalama değerlerin kullanılmasıyla % 8.61 olurken aylık ortalama değerlerle yapılan hesaplamalarda hata oranı % 14.4 olarak hesaplanmıştır.
- Yaşam döngüsü maliye analizi ile yapılan ekonomik hesaplamalarda Fotovoltaik-elektroliz sistemiyle hidrojen eldesinin yıllık hidrojen üretim miktarı 2.97 kg ve yıllık hidrojen üretim maliyeti 46 \$/kg olarak bulunmuştur. Ayrıca Balıkesir bölgesinde rüzgar türbini elektroliz sisteminin hidrojen üretiminin ekonomikliğı hesaplanmıştır. 1 kW rüzgar ve 0.56 kW elektroliz ünitesinden yıllık olarak 20.3 kg hidrojen üretilebileceğı ve hidrojen eldesinin maliyetinin de 30.8 \$/kg olduğu bulunmuştur.

Nisan-Temmuz ayları arasında PV-hidrojen üretiminin enerji verimi % 7.8 ile Nisan ayında gerçekleşirken, Temmuz ayında bu değer % 8.46 ile en büyük değerine depolamanın olmadığı durumda ulaşmaktadır. Fotovoltaik-Elektroliz ile hidrojen eldesinin toplam ekserji verimi enerji verimine oranla daha düşük olarak Nisan ayında % 6.65, Temmuz ayında ise % 6.4 olarak hesaplanmıştır. Akülü sistemde şarj deşarj olayına bağılı olarak verim daha düşük olarak Temmuz ayında % 6.1 olarak hesaplanmıştır. Gerek enerji gerek ekserji veriminin söz konusu olduğu tüm hesaplamalarda depolamanın olmadığı direk kullanım seçeneğı daha verimli bir seçenek olmaktadır.

- Hibrid sistem için yapılan enerji ve ekserji analizlerinde sistem iki ayrı enerji yolu için incelenmiştir. Rüzgar-elektroliz ve fotovoltaik-elektroliz enerji yolları için sistemin toplam enerji verim değerleri aylık ortalama olarak kullanılmıştır. Enerji verimi akü depolaması ile Haziran ayında % 8 olarak en yüksek değerine ulaşırken, Temmuz ayında % 14.8 değeriyle en yüksek değerde hesaplanmıştır. Ekserji verimi enerji verimine oranla daha düşük olarak depolama olmadan Temmuz ayında % 6.9 Haziran ayında ise % 3 olarak hesaplanmıştır.

Çalışma sonucunda elde edilen veriler ve deneysel olarak kurulan bu sistemin tecrübelerine bağlı olarak bu komuda çalışacak olan akademisyen ve uygulayıcılara yönelik olarak yararlı olacağı düşünülen bazı öneriler aşağıda kısaca verilmiştir:

- YE kaynaklı sistemlerin yatırım maliyetinin çok yüksek olması nedeni ile sistem tasarlanırken yükün çok iyi belirlenmesi amacıyla boyut optimizasyonunun mutlaka yapılması gerekmektedir.
- Bölgeden bölgeye değişen meteorolojik durumlara bağlı olarak sistem boyutlandırması farklılıklar göstermektedir. Bu sebeple fizibilitenin yapılacağı alanlar için doğru bir ölçüm veya noktasal tahminlerin doğru yapılması sistemin maliyeti ve güvenilir çalışması açısından önemlidir. Sistem elemanlarının belirlenmesinde özellikle boşa güç tüketimi gibi özelliklerin seçiminde dikkatli olunmalıdır.
- Gereğinden büyük seçilen ve boşa fazla güç tüketen eviricilerin yük talebi yokken akülerden gereksiz yük tüketmesi sistemi verimsiz kılmaktadır.
- Yenilenebilir enerji sistemlerinin özellikle boyutlandırma probleminde ihtiyaç duyulan yük profilinin doğru bir şekilde saatlik belirlenmesi gerekmektedir. Kurulu güçler kullanılarak yapılan tahminler doğru sonuçlar vermeyip yanıltıcı olabilmektedir. Bu analizlerde kullanılması

gereken saatlik yük profillerinin sektörel olarak ölçümlere dayalı olarak belirlenmesi oldukça önemlidir.

- Ayrıca rüzgar türbini ve fotovoltaik sistemlerin şarj kontrolünde akü gerilimi kontrol edilerek aşırı şarjın önlenmesi için var olan enerji sisteme aktarılamamaktadır. Bunu önlemek için fazla güç üretim anında hidrojen üretimi ya da fazla enerjinin kullanılabilirliğini veya depolanabileceği sağlayacak tasarımlar ve kontrol seçenekleri oluşturulmalıdır.
- Yapılan deneysel çalışmada hidrojen depolamanın yapılmaması sebebiyle depolama esnasında oluşacak kayıplar hesaba katılmamıştır. Daha sonraki çalışmada sistem depolama yoluyla çalıştırılarak depolamanın enerji ve ekserji kayıpları da hesaba alınmalıdır.
- Şebekeden uzak uygulamalar için maliyet açısından daha avantajlı olan hibrid yenilenebilir enerji sistemlerinde maliyet analizlerin ön yatırım maliyetleri ile yapılması oldukça yanlış sonuçlar vermektedir. Yaşam döngüsü maliyet hesaplaması yapılması gerekmektedir



## **EK A TEZDE KULLANILAN YAZILIMLAR**

### **A.1 MATLAB SİMULİNK YAZILIMI**

Simulink, çok alanlı simülasyon ve model tabanlı dinamik sistem tasarımı platformudur. Etkileşimli grafiksel ortamı ve gelişmiş blok kütüphaneleri sayesinde, işaret işleme ve haberleşme gibi pek çok sürekli sistemi modelleyebilir ve uygulayabiliriz. Simulink; MATLAB ailesinin kullanıcılara, zaman domeni ile dinamik ve arayüzleri görsel sistem modellerinin kurulması, benzetimi ve çözümü konusunda hizmet sunan bir üründür. Simulink ile hazırlanan uygulamalar bir test ortamındaymışçasına sürekli veya ayırık zamanlı analiz edilebilir, analize bağlı tasarım ve geliştirme işlemleri gerçekleştirilebilir. Simulink birçok matematiksel ifadeden başlayarak; havacılık, haberleşme, elektrik, elektronik ve kontrol sistemleri, finansal, mekanik, kablosuz sistemler ile sinyal işleme, sanal gerçeklik, yüksek seviyeli gerçek zamanlı donanımsal çalışma, gömülü kontrol ve otomatik kod üretimi ile birim programlama gibi birçok özel alana yönelik blok kütüphaneleri içermektedir. Simulink ile modelleme, bir sistemin kağıt üstüne taslak çizimi yapılması kadar kolaydır. Simulink grafiksel kullanıcı arayüzü; hali hazırda barındırdığı çeşitli blok setleri ile “Sürükle ve Bırak” işlemine dayanan basit bir mantıkla, sistem elemanlarını ve sistemleri oluşturur. Sistem elemanlarının parametrelerini değiştirmek temel çift tıklama ile yapılabilmektedir. Sistem özellikleri de hazır kullanıcı arayüzleri ile belirlenmektedir. İstenildiği takdirde, kullanıcılar kendi bloklarını oluşturabilmekte ve kendi kütüphanelerini hazırlayabilmektedirler.

SIMULINK, gerçek dinamik sistemlerin modellenmesi, analiz edilmesi ve simülasyonu için kullanılan etkileşimli bir simülasyon ortamıdır. MATLAB'in nümerik, grafiksel ve programlama alanlarındaki tüm işlevselliğini koruyan bir blok şemaları arayüzü aracılığıyla çalışır. SIMULINK blok



```

Model {
  Name          "Exergy-PV-Hydrogen"
  Version       6.6
  MdlSubVersion 0
  GraphicalInterface {
    NumRootInports      0
    NumRootOutports     0xergy
    ParameterArgumentNames ""
    ComputedModelVersion "1.101"
    NumModelReferences  0
    NumTestPointedSignals 0
  }
  SavedCharacterEncoding "windows-1254"
  SaveDefaultBlockParams on
  SampleTimeColors      off
  LibraryLinkDisplay    "none"
  WideLines             off
  ShowLineDimensions    off
  ShowPortDataTypes     off
  ShowLoopsOnError      on
  IgnoreBidirectionalLines off
  ShowStorageClass      off
  ShowTestPointIcons    on
  ShowViewerIcons       on
  SortedOrder           off
  ExecutionContextIcon  off
  ShowLinearizationAnnotations on
  ScopeRefreshTime      0.035000
  OverrideScopeRefreshTime on
  DisableAllScopes      off
  DataTypeOverride      "UseLocalSettings"
  MinMaxOverflowLogging "UseLocalSettings"
  MinMaxOverflowArchiveMode "Overwrite"
  BlockNameDataTip      off
  BlockParametersDataTip off
  BlockDescriptionStringDataTip off
  ToolBar               on
  StatusBar             on
  BrowserShowLibraryLinks off
  BrowserLookUnderMasks off
  Created               "Wed Apr 09 18:03:17 2003"
  Creator               "Owner"
  UpdateHistory         "UpdateHistoryNever"
  ModifiedByFormat      "%<Auto>"
  LastModifiedBy       "Owner"
  ModifiedDateFormat    "%<Auto>"
  LastModifiedDate      "Thu Dec 17 23:58:58 2009"
  ModelVersionFormat    "1.%<AutoIncrement:101>"
  ConfigurationManager  "None"
  SimulationMode        "normal"
  LinearizationMsg      "none"
  Profile               off
  ParamWorkspaceSource  "MATLABWorkspace"
  AccelSystemTargetFile "accel.tlc"
  AccelTemplateMakefile "accel_default_tmf"
  AccelMakeCommand     "make_rtw"
  AccelVerboseBuild    off
  TryForcingSFcnDF     off
  RecordCoverage       off
  CovPath              "/"
}

```

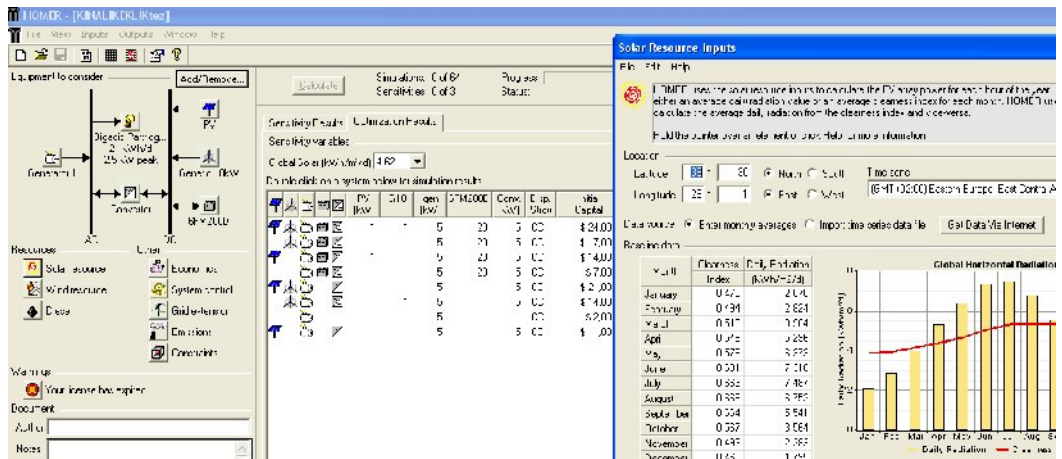
```

CovSaveName          "covdata"
CovMetricSettings    "dw"
CovNameIncrementing  off
CovHtmlReporting     on
covSaveCumulativeToWorkspaceVar on
CovSaveSingleToWorkspaceVar on
CovCumulativeVarName "covCumulativeData"
CovCumulativeReport  off
CovReportOnPause     on
ExtModeBatchMode     off
ExtModeEnableFloating on
ExtModeTrigType      "manual"
ExtModeTrigMode      "normal"
ExtModeTrigPort      "1"
ExtModeTrigElement   "any"
ExtModeTrigDuration  1000
ExtModeTrigDurationFloating "auto"
ExtModeTrigHoldOff   0
ExtModeTrigDelay     0
ExtModeTrigDirection "rising"
ExtModeTrigLevel     0
ExtModeArchiveMode   "off"
ExtModeAutoIncOneShot off
ExtModeIncDirWhenArm off
ExtModeAddSuffixToVar off
ExtModeWriteAllDataToWs off
ExtModeArmWhenConnect on
ExtModeSkipDownloadWhenConnect off
ExtModeLogAll        on
ExtModeAutoUpdateStatusClock on
BufferReuse          on
ProdHWDeviceType     "32-bit Generic"
ShowModelReferenceBlockVersion off
ShowModelReferenceBlockIO off
Array {
  Type          "Handle"
  Dimension     1
  Simulink.ConfigSet {
    $ObjectID    1
    Version      "1.2.0"
    Array {
      Type          "Handle"
      Dimension     7
      Simulink.SolverCC {
        $ObjectID    2
        Version      "1.2.0"
        StartTime    "0.0"
        StopTime     "3266"
        AbsTol       "1e-6"
        FixedStep    "auto"
        InitialStep  "auto"
        MaxNumMinSteps "-1"
        MaxOrder     5
        ConsecutiveZCsStepRelTol "10*128*eps"
        MaxConsecutiveZCs "1000"
        ExtrapolationOrder 4
        NumberNewtonIterations 1
        MaxStep       "auto"
      }
    }
  }
}

```

## A.2 HOMER YAZILIMI

HOMER Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL: National Renewable Energy Laboratory) tarafından geliştirilen, yenilenebilir hibrid enerji sistemleri için boyut optimizasyonu için kullanılan bir yazılımdır. Küçük güçlerde farklı yenilenebilir hibrid enerji sistemleri için en iyi verime sahip sistemin belirlenmesi için kullanılır. Yapılan analizde kullanılması planlanan sisteme ait elemanların birim maliyetleri veri olarak programda kullanılır. Ayrıca ekonomik analizi yaşam döngüsü maliyet analizine yapılması sebebiyle faiz oranı ve projenin ömrünün de programa tanımlanmış olması gerekir.

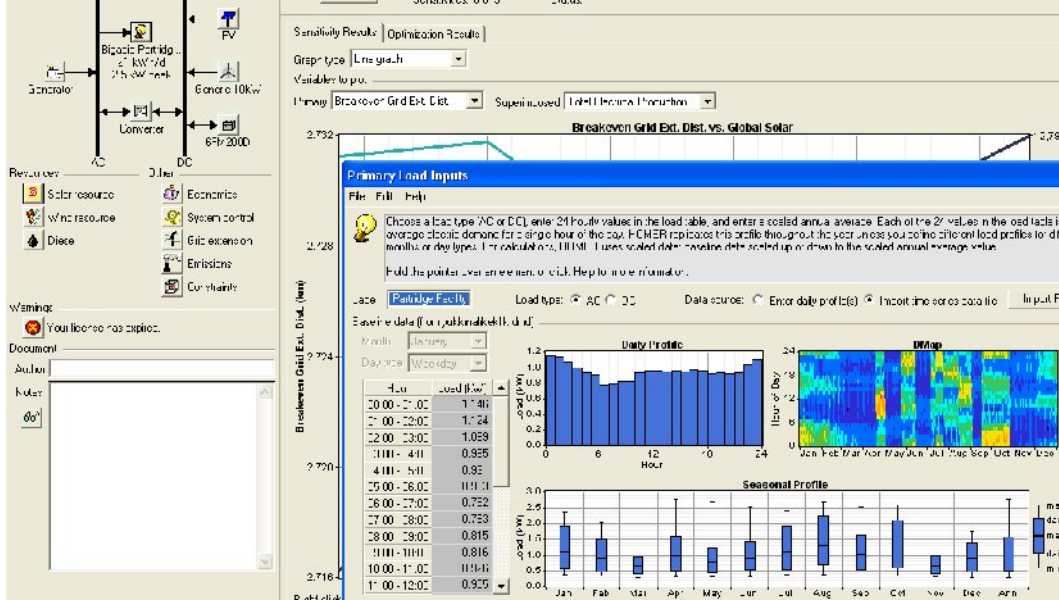


Şekil A.2 Homer programı veri giriş blokları.

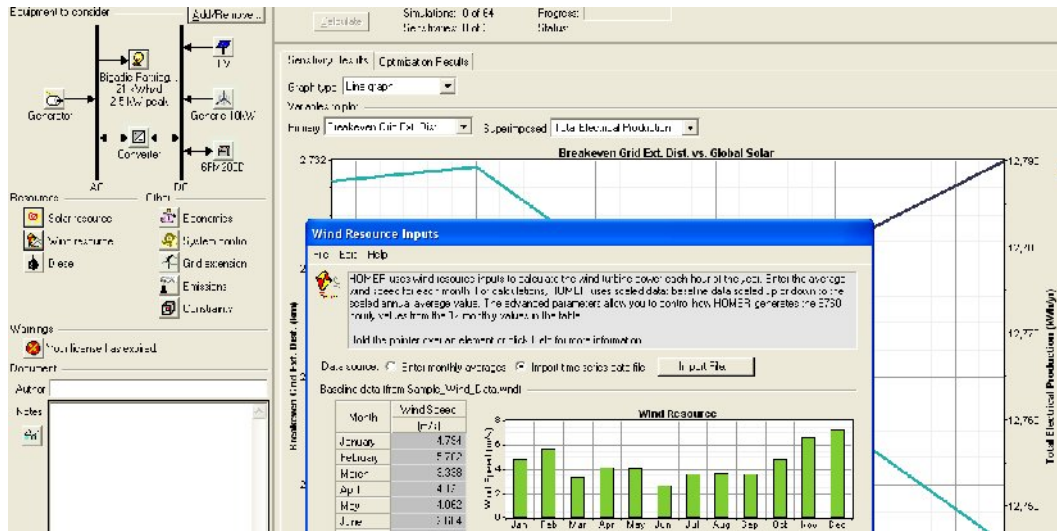
Ayrıca sistemin kullanılacağı lokasyona ait meteorolojik verilerin programa saatlik olarak tanımlanması gerekmektedir. Kullanılacak bu verilerin yanı sıra sistemin kurulacağı yere ait yük analizinin doğru yapılarak saatlik olarak programa girilmesi gerekir.

Yukarıda belirtilen değerler tanımlandığında HOMER programı yükün enerjisiz kalmayacağı ve de maliyeti en düşük seçeneği hesaplar. Ve diğer hibrid seçenekler ile birlikte çıktı olarak verir. Analizlerin maliyet boyutunun

yanı sıra performans ve emisyonlar açısından değerlendirilmesi de kolaylıkla yapılabilir.



Şekil A.3 Homer programı yük profili tanımlanması.



Şekil A.4 Homer programı rüzgar hız profili tanımlanması.

## 8. KAYNAKLAR

[1] British Petroleum (BP), Statistical Review of World Energy 2007, Becon Press, London, (2007), 6.

[2] International Energy Agency Report 2007 Statistics Web <http://www.iea.org/stats/>, (07.07.2010 tarihinde erişilmiştir).

[3] Yıllancı, A., Güneş-Hidrojenli bir Sistemin Kurulması ve Performansının Analizi, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, (2008).

[4] Loa M., Atmospheric Carbon Dioxide, NOAA/ESRL, [http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/co2\\_data\\_mlo.html](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/co2_data_mlo.html), (2008).

[5] Kükrer, B., Hidrojen Enerjisinin Gelişme Potansiyeli ve Türkiye Ekonomisi Açısından Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Eskişehir, (2007).

[6] Gülay, A.N., Yenilenebilir Enerji Kaynakları Açısından Türkiye'nin Geleceği ve Avrupa Birliği ile Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir, (2008).

[7] Atılğan, İ., "Türkiye'nin Enerji Potansiyeline Bakış", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 15,1, (2000), 31.

[8] European Wind energy (AWEA), Wind in power 2009 European statistics [www.ewea.org/](http://www.ewea.org/), (05.07.2010 tarihinde erişilmiştir).

[9] Bilen, K., Ozyurt, O., Bakırcı, K., Karanlı, S., Erdogan, S., Yılmaz, M., and Comaklı, O., "Energy production, consumption, and environmental pollution for sustainable development: A case study in Turkey", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, (2008), 1529.

[10] Ültanır, M.Ö., "21.Yüzyıla Giderken Türkiye'nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi, (1998) (<http://www.tusiad.org.tr> adresinden 19.04.2010 tarihinde erişilmiştir).

[11] Şenaktaş, B., Hidrojen Enerjisi, Üretimi ve Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2005).

[12] Durak M., Türkiyede İşletmedeki Rüzgar Enerji Santralleri. (TUREB) ([http://www.ruzgarenerjibirliigi.org.tr/index.php?option=com\\_docman&task=cat\\_viw&gid=57&Itemid=69](http://www.ruzgarenerjibirliigi.org.tr/index.php?option=com_docman&task=cat_viw&gid=57&Itemid=69) 10.06.2010 tarihinde erişilmiştir).

[13] International Energy Agency IEA, World Energy Outlook 2009, , Head of Publications Service, OECD/IEA, France, (2009).

[14] Marın, C., ve Yıldırım, U., Çevre Sorunlarına Çağdaş Yaklaşımlar, Beta Basım Yayın A.Ş, İstanbul, (2004).

- [15] Dinçer, I., "Technical, Environmental and Exergetic Aspects of Hydrogen Energy Systems", *International Journal of Hydrogen Energy*, 27, (2002), 265.
- [16] Gupta, A., Saini, R.P., and Sharma, M.P., "Design of an optimal hybrid energy system model for remote rural area power generation", ICEE.07 International Conference, Hong Kong, (2007), 1-6.
- [17] Nayar, C.V., Lawrance, W.B., and Phillips, S.J., "Solar/Wind/Diesel hybrid energy systems for remote areas", *Proceedings of IEEE*, (1989), 2029-2034.
- [18] Bakirtzis, A.G., and Gavanidou, E.S., "Optimum operation of a small autonomous system with unconventional energy sources", *Electric Power Systems Research*, 23, (1992), 93.
- [19] Akyüz, E., Bayraktar, M. ve Oktay, Z., "Hibrid yenilenebilir enerji sistemlerinin endüstriyel tavukçuluk sektörü için ekonomik açıdan değerlendirilmesi: Bir Uygulama", *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(2), (2009), 44.
- [20] Markvart, T., "Sizing of hybrid photovoltaic-wind energy systems", *Solar Energy*, 57(4), (1996), 277.
- [21] Borowy, B.S., and Salameh, Z.M., "Optimum photovoltaic array size for a hybrid wind– PV system", *IEEE Trans Energy Convers*, 9(3), (1994), 482.
- [22] Muselli, M., Notton, G., and Louche, A., "Design of Hybrid-Photovoltaic Power Generator, with Optimization of Energy Management", *Solar Energy*, 65(3), (1999), 143.
- [23] Diaf, S., Belhamel, D., Haddadi, M., and Louche, M., "A Methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/Wind system", *Energy Policy*, 35, (2007), 5708.
- [24] Chedid R, and Saliba Y., "Optimization and control of autonomous renewable energy systems", *Int J Energy Res*, 20, (1996), 609.
- [25] Wies, R.W., Johnson, R.A., Agrawal, A.N., and Chubb, T.J., "Simulink model for economic analysis and environmental impacts of a PV with diesel-battery system for remote villages", *Power Systems, IEEE Transactions*, 20(2), (2005), 692.
- [26] Özdamar, A., Özbalta, N., Akin, A., and Yildirim, E.D., "An Application of a Combined Wind and Solar Energy System in İzmir", *International Journal of Energy Research*, (2002).
- [27] Borowy, B.S., and Salameh, Z.M., "Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind–PV hybrid system", *IEEE Trans Energy Convers*, 11(2), (1996), 367.
- [28] Senjyu, T., Hayashi, D., Yona, A., Urasaki, N., and Funabashi, T., "Optimal configuration of power generating systems in isolated island with renewable energy", *Renewable Energy*, 32, (2007), 1917.
- [29] Ashok, S., "Optimised model for community-based hybrid energy system", *Renewable Energy*, 32, (2007), 1155.



- [30] Pradeep, K.K., and Mohan, K.K., "Alternative energy facilities based on site matching and generation unit sizing for remote area power supply," *Renewable Energy*, 32, (2007), 1346.
- [31] Kaldellis, J.K., Kavadias, K.A., and Koronakis, P.S., "Comparing wind and photovoltaic stand-alone power systems used for the electrification of remote consumers," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, (2007), 57.
- [32] Barton, J.P., and Infield, D.G., "A probabilistic method for calculating the usefulness of a store with finite energy capacity for smoothing electricity generation from wind and solar power", *Journal of Power Sources*, 162, (2006), 943.
- [33] Prasad, R.A., and Natarajan, E., "Optimization of integrated photovoltaic–wind power generation systems with battery storage," *Energy*, 31, (2006), 1943.
- [34] Yang, H.X., Burnett, J, and Lu, L., "Weather data and probability analysis of hybrid photovoltaic–wind power generation systems in Hong Kong", *Renewable Energy*, 28, 11, (2003), 1813.
- [35] Kashefi Kaviani, A., Riahya, G.H., and Kouhsaria, SH.M., "Optimal design of a reliable hydrogen-based stand-alone wind/PV generating system, considering component outages", *Renewable Energy*, 34, 11, (2009), 2380.
- [36] Ekren, O., Ekren, B.Y., and Özerdem, B., "Break-even analysis and size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage – A case study", *Applied Energy*, 86, 7-8, (2009), 1043.
- [37] Dufo-Lopez, R., and Bernal-Agustin, J.L., "Multi-objective design of PV-wind-diesel-hydrogen-battery systems", *Renewable Energy: An International Journal*, 33, 12, (2008), 2559.
- [38] Çelik, A.N., "Techno-economic analysis of autonomous PV-wind hybrid energy systems using different sizing methods," *Energy Conversion and Management*, 44, (2003),1951.
- [39] Protogeropoulos, C., Brinkworth, B.J., and Marshall, R.H., "Sizing and techno-economical optimization for hybrid solar photovoltaic/wind power systems with battery storage," *International Journal of Energy Research*, 21, (2007), 465.
- [40] Wichert, B., "PV-diesel Hybrid Energy Systems for Remote Area Power Generation - A Review of Current Practice and Future Developments", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1, 3, (1997), 209.
- [41] Lazou, A.A., and Papatsoris, A.D., "Economics of photovoltaic stand-alone residential households: A case study for various European and Mediterranean Locations", *Solar energy & Solar cells*, 62, (2000), 411.
- [42] Agbossou, K., Chahine, R., Hamelin, J., Laurencelle, F., Anouar, A., St-Arnaud, J.-M., and Bose, T. K., "Renewable energy systems based on hydrogen for remote applications", *Journal of Power Sources (Special Issue)*, 96, (2001), 168.
- [43] Khan, M.J., and Iqbal, M.T., "Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in Newfoundland", *Renewable Energy*, 30, (2005), 835.

- [44] Onar, O.C. , Uzunoğlu, M., and Alam, M.S., “Modeling, control and simulation of an autonomous wind turbine/photovoltaic/fuel cell/ultra-capacitor hybrid power system”, *Journal of Power Sources*, 185, 2, (2008), 1273.
- [45] Khan, M.J., and Iqbal, M.T., “Dynamic modeling and simulation of a small wind–fuel cell hybrid energy system”, *Renewable Energy*, 30, (2005), 421.
- [46] El-Shatter, T.F., Eskander, M.N., and El-Hagry, M.T., “Energy flow and management of a hybrid wind/PV/fuelcell generation system”, *Energy Conversion and Management*, 47, (2006), 1264.
- [47] Bechrakis, D.A., McKeogh, E.J., and Gallagher, P.D., “Simulation and operational assessment for a small autonomous wind–hydrogen energy system”, *Energy Conversion and Management*, 47, (2006), 46.
- [48] Ipsakisa, D., Voutetakisa, S., Seferlisa, P., Stergiopoulou, F., and Elmasides, C., “Power management strategies for a stand-alone power system using renewable energy sources and storage hydrogen”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, (2009), 7081.
- [49] Vosen, S.R., and Keller, J.O., “Hybrid Energy Storage Systems for Stand-Alone Electric Power Systems: Optimization of System Performance and Cost Through Control Strategies”. *International Journal of Hydrogen Energy*, 24, 12, (1999), 1139.
- [50] Chedid, R., Chaaban, F.B., and Shihab, R., “Simplified Electric Circuit Model for the Analysis of Hybrid Wind-Fuel Cell Systems”, *Power Engineering Society General Meeting*, Tampa, (2007).
- [51] Troncoso, E., and Newborough, M., “Electrolysers as a load management mechanism for power systems with wind power and zero-carbon thermal power plant”, *Applied Energy*, 87(1), (2010), 1.
- [52] Levene, J.I., Mann, M.K., Margolis, and R.M., Milbrandt, A., “An analysis of hydrogen production from renewable electricity sources”, *Solar Energy*, 81, (2007), 773.
- [53] Greinera, C.J., Korpås, M., and Holen, A.T., “A Norwegian case study on the production of hydrogen from wind power”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, (2007), 1500.
- [54] Shakyaa, B.D., Ayea, L., and Musgrave, P., “Technical feasibility and financial analysis of hybrid wind– photovoltaic system with hydrogen storage for Cooma”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 30, (2005), 9.
- [55] Aiche-Hamane, L., Belhamel, M., Benyoucef, B., and Hamane, M., “Feasibility study of hydrogen production from wind power in the region of Ghardaia”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, ( 2009 ), 4947.
- [56] Bilgen, E., “Domestic hydrogen production using renewable energy”, *Solar Energy*, 77, (2004), 47.

- [57] Kazmerski, L.L., and Broussard, K., "Solar Photovoltaic Hydrogen: The Technologies and Their Place in Our Roadmaps and Energy Economics", NREL 19th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, (2004).
- [58] Fishedick, M., Nitsch, J. and Ramesohl, S., "The role of hydrogen for the long term development of sustainable energy systems—a case study for Germany", *Solar Energy*, 78(5), (2005), 678.
- [59] HOMER V.2. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 617 Cole Boulevard, Golden, CO 80401-3393. URL: <http://www.nrel.gov/homer/>.
- [60] Bezerra P., Hille G., Siegle M., and Schott T., "Hybrid Systems for Decentral Electricity Generation:Lessons from a Brazilian-German Coperation", *Proceedings of the World Renewable Energy Conference* , Reading, (1991).
- [61] Seeling-Hochmuth, G., "Optimization of hybrid energy systems sizing and operational control, A thesis of the Degree of. Dr.-Ing., Kessel University, (1998).
- [62] Mills A., and Al-Hallaj S., "Simulation of Hydrogen-Based Hybrid Systems Using Hybrid2", *International Journal of Hydrogen Energy*, 29, (2004), 991.
- [63] Haque, R.U., Iqbal, M.T., and Quaicoe, J.E., "Sizing, dynamic modeling and power electronics of a hybrid energy system", *Electrical and Computer Engineering 06 Canadian Conference*, (2006), 1135.
- [64] Shaahid, S.M., and Elhadidy, M.A., "Economic analysis of hybrid photovoltaic–diesel–battery power systems for residential loads in hot regions. A step to clean future", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, (2008), 488.
- [65] Akyüz, E, Oktay, Z., and Dincer, İ., "The techno-economic and environmental aspects of a hybrid PV-diesel-battery power system for remote farm houses", *International Journal of Global Warming*, 1, 1-3, (2009), 392.
- [66] Ross, R.T., and Hsiao, T.L., "Limits on the yield of photochemical solar energy conversion", *Journal of Applied Physics*, 48, 11, (1977), 4783.
- [67] Landsberg, P.T.,and Markvart, T., "The carnot factor in solar cell theory", *Solid-State Electronics*, 42, 4, (1998), 657.
- [68] Würfel P., "Thermodynamic limitations to solar energy conversion", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 14, (2002), 18.
- [69] Sahin, A.D., and Dincer, İ., and Rosen, M.A., "Thermodynamic analysis of solar photovoltaic cell systems", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 91, (2007),153.
- [70] Skoplaki, E., Boudouvis, A.G., and Palyvos, J.A., "A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 92, (2008), 1393.
- [71] Joshi, A.S., Tiwari, A., Tiwari, G.N., Dincer, I., and Reddy, B.V., "Performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal (PV/T) (glass-to-glass) system", *International Journal of Thermal Sciences*, 48, (2009), 154.

- [72] Joshi, A.S., Dincer, I., and Reddy, B.V., "Thermodynamic assessment of photovoltaic systems", *Solar Energy*, 83, 8, (2009), 1139.
- [73] Farahat, S., Sarhaddi, F. and Ajam, H., "Exergetic optimization of flat plate solar collectors", *Renewable Energy*, 34, (2009), 1169.
- [74] Yilanci A. , Dincer I., and Ozturk H. K., "Performance analysis of a PEM Fuel cell unit in a solar- hydrogen System", *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, 24, (2008), 7538.
- [75] Koreneos, C., Spachos, N. and Moussiopoulos, N., "Exergy analysis of renewable energy sources", *Renewable Energy*, 28, (2003), 295.
- [76] Jia, G.Z., Wang, X.Y. and Wu, G.M., "Investigation on wind energy-compressed air power system", *Journal of Zhejiang University Science*, 5, 3, (2004), 290.
- [77] Goff, L.H., Hasert, U.F. and Goff, P.L., "A 'new' source of renewable energy: the coldness of the wind", *International Thermal Science*, 38, (1999), 916.
- [78] Sahin, A.D., Dincer, I. and Rosen, M.A., "Thermodynamic analysis of wind energy", *Int. J. Energy Research*, Vol. 30, (2006), 553.
- [79] Ozgener, O. and Ozgener, L., "Exergy and reliability analysis of wind turbine systems:a case study", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, (2007), 1811.
- [80] Ahmadi, A. and Ehyaei, M.A., "Exergy analysis of a wind turbine", *Int. J. Exergy*, 6, 4, (2009), 457.
- [81] Rosen, M.A., and Scott, D.S., "Exergy analysis of hydrogen production from heat and water by electrolysis", *Int J Hydrogen Energy*, 17, 3, (1992),199.
- [82] Ni, M., Leung, M.K.H., and Leung, D.Y.C., "Energy and Exergy analysis of hydrogen production by a proton exchange membrane and (PEM) electrolyzer plant", *Energy Conservation and Management*, 49, 10, (2008), 2748.
- [83] Kazim, A., "Exergy analysis of a PEM fuel cell at variable operating conditions", *Energy Conversion and Management*, 45,11-12, (2004), 1949.
- [84] Kazim A., "Exergoeconomic analysis of a PEM fuel cell at various operating conditions", *Energy Conversion and Management*, 46, 7-8, (2005), 1073.
- [85] Çengel, Y.A., and Boles, M.A., *Thermodynamics: An Engineering Approach*, McGraw-Hill, 5.Baskı, (2008).
- [86] Kroposki, B., "Renewable Electrolysis Integrated System Development and Testing", 2006 DOE Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program Review, (2006).
- [87] Vanhanen, J.P., "On the performance of improvements of small-scale photovoltaic hydrogen energy systems", PhD Thesis, Espoo, Finland, (1996).

- [88] Voss, K., Goetzberger, A., Bopp, G., Häberle, A., Heinzl, A. and Lehmberg, H., "The Self-sufficient Solar House in Freiburg- results of 3 years of operation", *Solar Energy*, 58, (1996), 17.
- [89] Galli, S. and M. Stefanoni , "Stand Alone Photovoltaic Hydrogen Energy System, SAPHYS., ENEA, 1337 (2000).
- [90] Schucan, T., Case studies of integrated Hydrogen Energy Systems, IEA, (2001).
- [91] Barthels, H., Brocke, W. A., Bonhoff, K. , Groehn, H. G. , Heuts, G. , Lennartz, M., Mai, H., Mergel, J. , Schmid L. and Ritzenhoff, P. , "Phoebus-Jülich:an Autonomous energy supply system comprising Photovoltaics, Electrolytic Hydrogen, Fuel Cell", *International Journal of Hydrogen Energy*, 23, 4, (1997), 295.
- [92] Szyszka, A., "Ten years of solar hydrogen demonstration project at Neunberg vorm Wald, Germany", *International Journal of Hydrogen Energy*, 23, 10, (1997), 849.
- [93] Agbossou, K., Kolhe, M.L., Hamelin, J., Bernier, E., and Bose, T.K., "Electrolytic hydrogen based renewable energy system with oxygen recovery and re-utilization", *Renewable Energy*, 29, (2004), 1305.
- [94] Ozturk, H. K. , Yilanci, A. , Atalay, O., and Dincer, I., "A Preliminary Assessment of a 5 kWp Solar Hydrogen System in Denizli, Turkey", *Proceedings of 3rd International Energy, Exergy and Environment Symposium, Portugal*, (2007).
- [95] Zouliasa, E.I. , Glockner R., Lymberopoulos N., Tsoutsos T., Vosseler I., Gavalda O., Mydske H.J., and Taylor P., "Integration of hydrogen energy technologies in stand-alone power systems analysis of the current potential for applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,10, (2006), 432.
- [96] Özgür, A., "Hidrojen Ekonomisine Doğru İstanbul", *Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 11, (2007), 283.
- [97] Şahin, S., Nükleer Hidrojen Üretimi, III. Ulusal Hidrojen Enerjisi Bildiri Kitabı, (2006), 123.
- [98] Ültanır, M.Ö., Hidrojenin Yakıt Olarak Kullanımı Ve Özellikleri, Çevre ve Enerji Kongresi, (1997).
- [99] Beşergil, B., Hidrojen. ([http://www.bayar.edu.tr/besergil/e\\_makaleleri](http://www.bayar.edu.tr/besergil/e_makaleleri) 10.06.2010 tarihinde erişilmiştir.)
- [100] Eroğlu, E., Şengül, E., Erdener, H., Gür, N., Baç, N., and Erkan, S., Sürdürülebilir Enerji ve Hidrojen, ODTU Yayıncılık, (2007).
- [101] Spiegel, C., PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB, Academic Press, (2008).
- [102] Kreutert, W., and Hofmannz, H., "Electrolysis: The Important Energy Transformer In A World Of Sustainable Energy", *International Journal of Hydrogen Energy*, 23, 8, (1998), 661.

- [103] Rajeshwar, K., McConnell, R., and Licht, S., Solar Hydrogen Generation: Toward a Renewable Energy Future, Springer, (2008).
- [104] Grigoriev, A., Porembsky, V.I., and Fateev, V.N., "Pure hydrogen production by PEM electrolysis for hydrogen energy". *International Journal of Hydrogen Energy*, 31, 2, (2006), 171.
- [105] Barbir, F., "PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources", *Solar Energy*, 78, (2005), 661.
- [106] Oi, T., and Sakaki, Y., "Optimum hydrogen generation capacity and current density of the PEM-type water electrolyzer operated only during the off-peak period of electricity demand". *Journal of Power Sources*, 129, 2, (2004), 229.
- [107] Hansen, L.H., Blaabjerg, F., Christensen, H.C., Lindhard, U., and Madsen, P.H., "Generators and Power Electronics Technology for Wind Turbines ", Industrial Electronics Society, 2001. IECON '01. The 27th Annual Conference of the IEEE, USA, (2001).
- [108] Vindmølleindustrien: Danish Wind Industry Association (Http:\\www.windpower.org 11.04.2008 tarihinde erişilmiştir.)
- [109] Heier S., Grid Integration of Wind Energy Conversion System (2nd ed.), John Wiley and Sons Ltd. 106-136 54-65, 230-245, (1998).
- [110] Durak, M., ve Özer, S., Rüzgar Enerjisi: Teori ve Uygulama, (2008).
- [111] Spera, D.A., Wind turbine Technology: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering, ASME Press, USA, (1998).
- [112] Golding, E.W, The Generation of Electricity by Wind Power, E & FN Spon, London, (1955).
- [113] Gasch, R., and Twele, J., Wind power plants Fundamentals, Design Construction and Operation, Solarpraxis AG., Berlin, (2002).
- [114] Fıratoğlu, Z.A., ve Yeşilata, B., "Lineer Elektriksel Yüke Bağlı PV Panellerin Optimizasyonu Ve Bölgesel Uygulanabilirliğinin Araştırılması", *Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 1, 1, (2003), 65.
- [115] Markvart, T. and Castaner. L., Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation, Elsevier Ltd., (2005).
- [116] Doğan, İ., Güneş Enerjisi Uygulamaları, Bilişim yayınları, (2006).
- [117] Demirtaş, M., Güneş ve Rüzgar Enerjisi Kullanılarak Şebekeyle Paralel Çalışabilen Bir Hibrit Enerji Santralinin Tasarımı ve Uygulaması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2008).
- [118] Kreith, F., and Goswami, D.Y., Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy, CRC Press, (2007).
- [119] RENI Renewable Insight Energy Industry Guides PV Power Plants 2010

- [120] Kaiser. R., "Optimized battery-management system to improve storage lifetime in renewable energy systems", *Journal of Power Sources*, 168, 1, (2007), 58.
- [121] Armenta, C., "Prediction of battery behavior in SAPV applications", *Renewable Energy*, 28, 11, (2003), 1671.
- [122] Salameh, Z.M., Cassacca, M.A., and Lynch, W.A., "A mathematical model for lead–acid batteries", *IEEE Transaction Energy*, 7, 1, (1992), 93.
- [123] Copetti, J.B., Chenlo, F., and Lorenzo, E., "A general battery model for PV system simulation", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 1, (1993), 283.
- [124] Guasch, D., and Silvestre, S., "Dynamic battery model for photovoltaic applications", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 11, (2003), 193.
- [125] Pascoe, P.E., and Anbuky, A.H., "A VRLA battery simulation model", *Energy Conversion and Management*, 45, 7-8, (2004), 1015.
- [126] Catherino, H.A., Burgel, J.F., Rusek, A., and Feres, F., "Modelling and simulation of lead–acid battery charging", *Journal of Power Sources*, 80, (1999), 17.
- [127] Daly, D., "20 MW battery power conditioning system for puerto rico electric power authority", *Proceedings of the Tenth Annual Battery Conference on Applications and Advances*, (1995), 233.
- [128] Taylor, P., "Update on the puerto rico electric power authority's spinning reserve battery system", *Proceedings of the Eleventh Annual Battery Conference on Applications and Advances*, (1996), 249.
- [129] Divya, K.C., and Østergaard, J., "Battery energy storage technology for power systems: An overview", *Electric Power Systems Research*, 79, (2009), 511.
- [130] Chaurey, C., and Deambi, S., "Battery storage for PV power systems: an overview", *Renewable Energy*, 2, 3, (1992), 227.
- [131] Balıkesir Valiliği internet sitesi, (<http://www.balikesir.gov.tr/pgae-blank1.asp?id=432> 03.07.2009 tarihinde erişilmiştir).
- [132] Rosenthal, A.L., "Evaluation of Hybrid Power System Alternatives: A Case Study", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 7, (1999), 183.
- [133] Teknik Grup, ([http://www.davis-tr.com/Vantage\\_Pro2.html](http://www.davis-tr.com/Vantage_Pro2.html) 08.08.2010 tarihinde erişilmiştir.)
- [134] PEM QL-150, ([http://www.ql-spe.com/en/goods\\_detail.php?gid=1](http://www.ql-spe.com/en/goods_detail.php?gid=1) 01.07.2010 tarihinde erişilmiştir).
- [135] ACS-750, ([http://www.allegromicro.com/en/Products/Part\\_Numbers/0750/](http://www.allegromicro.com/en/Products/Part_Numbers/0750/) 01.07.2010 tarihinde erişilmiştir)

- [136] Matlab Simulink MathWorks Company,  
([http://www.mathworks.com/academia/student\\_center/tutorials/](http://www.mathworks.com/academia/student_center/tutorials/) 10.01.2008 tarihinde erişilmiştir).
- [137] Kyocera KC-130 Data Sheet, Kyocera Inc,  
(<http://www.kyocerasolar.com/pdf/KC40T-KC130TM.pdf> 01.07.2010 tarihinde erişilmiştir.))
- [138] Öztürk, H.H., Akdeniz Bölgesinde Güneş Işınım Ekserjisi Değişimi, Yeksem (2005).
- [139] Dincer, I. and Sahin, A.Z., "A new model for thermodynamic analysis of a drying process", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, (2004), 645.
- [140] Dincer, I., and Rosen, M.A., Exergy: Energy Environment and Sustainable Development, Elsevier, (2007), p.13.
- [141] Dincer, I., "The role of exergy in energy policy making", *Energy Policy*, 30, (2002), 137.
- [142] De Soto, W. Klein, S. A. and Beckman. W. A., "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance", *Solar Energy*, 80, 1, (2006), 78.
- [143] Campbell. R.C., A circuit-based photovoltaic array model for power system studies, Proceedings of 39th North American Power Symposium (NAPS), (2007), 97.
- [144] Hansen, M.O.L., Aerodynamics of Wind Turbines (2nd Edition). Earthscan London, (2008).
- [145] Görgün. H., "Dynamic modelling of a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer", *International Journal of Hydrogen Energy*, 31, 1, (2006), 29.
- [146] Aybers, N. ve Şahin, B., Enerji Maliyeti, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul, (1995).
- [147] Okka, O., Mühendislik Ekonomisi, Nobel Yayın Dağıtım, (2000).
- [148] Güngör, A., Gaz Tahrikli ısı pompalı bantlı bir kurutma sisteminin performansının ekserjetik olarak değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2010).