



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

**KAYSERİ İLİ PINARBAŞI İLÇESİNDE ENERJİ ÜRETİM AMAÇLI
RÜZGAR-HİDROJEN HİBRİD ENERJİ SİSTEMİNİN
İNCELENMESİ**

**Hazırlayan
Muhammet ÇELİK**

**Danışman
Yrd. Doç. Dr. Gamze GENÇ**

Yüksek Lisans Tezi

**Ağustos 2011
KAYSERİ**

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

**KAYSERİ İLİ PINARBAŞI İLÇESİNDE ENERJİ ÜRETİM AMAÇLI
RÜZGAR-HİDROJEN HİBRİD ENERJİ SİSTEMİNİN
İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Muhammet ÇELİK**

**Danışman
Yrd. Doç. Dr. Gamze GENÇ**

**Bu çalışma; Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FBY-11-3518
kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Ağustos 2011
KAYSERİ**

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

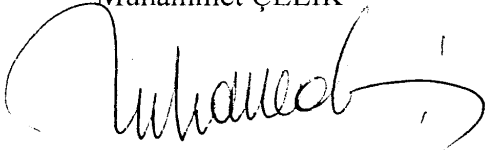
Adı-Soyadı: Muhammet ÇELİK

İmza : 

“KAYSERİ İLİ PINARBAŞI İLÇESİNDE ENERJİ ÜRETİM AMAÇLI RÜZGAR-
HİDROJEN HİBRİD ENERJİ SİSTEMİNİN İNCELENMESİ” adlı Yüksek Lisans /
Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne
uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan

Muhammet ÇELİK



Danışman

Yrd. Doç. Dr. Gamze GENÇ



Makine Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. İbrahim UZMAY

Yrd. Doç. Dr. Gamze GENÇ danışmanlığında **Muhammet ÇELİK** tarafından hazırlanan “**Kayseri İli Pınarbaşı İlçesinde Enerji Üretim Amaçlı Rüzgar-Hidrojen Hibrid Enerji Sisteminin İncelenmesi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

05/08/2011

JÜRİ:

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Gamze GENÇ
Üye : Prof. Dr. Hüseyin YAPICI
Üye : Doç. Dr. Necmettin ŞAHİN

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 16.08/2011. tarih ve 2011.128-07 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

16.08.2011



Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmalarım sırasında yardım ve desteklerini esirgemeyen değerli danışman hocam Sn. Yrd. Doç. Dr. Gamze Genç'e, hiçbir zaman desteğini esirgemeyerek değerli fikirleriyle çalışmalarımın çeşitli aşamalarına yön veren hocam Sn. Yrd. Doç. Dr. M. Serdar Genç'e ve maddi manevi olarak her zaman yanımda olan değerli dostum Arş. Gör. İlyas Karasu'ya ve Halil Hakan Açık'el'e teşekkür ederim.

Ayrıca sadece yüksek lisans çalışmasında değil, her konuda değerli fikirleri ve yardımlarıyla yanımda olan ve tecrübelerinden faydalandığım değerli hocam Sn. Prof. Dr. Hüseyin Yapıcı'ya teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına maddi destek veren Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje No: FBY-11-3518) teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında her türlü olanağı sağlayarak bana yardımcı olan aileme teşekkür ederim.

KAYSERİ İLİ PINARBAŞI İLÇESİNDE ENERJİ ÜRETİM AMAÇLI RÜZGAR-HİDROJEN HİBRİD ENERJİ SİSTEMİNİN İNCELENMESİ

Muhammet ÇELİK

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Ağustos 2011

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Gamze GENÇ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, Kayseri - Pınarbaşı ilçesinde yer alan bir küçükbaş hayvan çiftliğinin enerji ihtiyacının rüzgar-hidrojen hibrid enerji sistemi ile karşılanması araştırıldı. İlk olarak küçükbaş hayvan çiftliğinin enerji ihtiyacı belirlendi. Pınarbaşı ilçesinin rüzgar potansiyeline uygun olarak farklı nominal güçlerde 4 değişik rüzgar türbini ele alındı. Her bir türbinden farklı yüksekliklerde (50 m, 80 m ve 100 m) elde edilecek enerji miktarı, kapasite faktörleri ve enerji üretim maliyetleri belirlendi. Ele alınan türbinler arasından 800 kW nominal güce sahip rüzgar türbini seçildi. 3 farklı durum ele alındı. (i) Durum I: Küçükbaş hayvan çiftliğinin enerjisinin sadece şebeke-bağlantılı bir rüzgar sistemi ile karşılanması, (ii) Durum II: Küçükbaş hayvan çiftliğinin enerjisinin elektrik üretimi öncelikli amaç olarak rüzgar-hidrojen hibrid sistemi ile karşılanması, (iii) Durum III: Küçükbaş hayvan çiftliği enerjisinin hidrojen üretimi öncelikli amaç olarak rüzgar-hidrojen hibrid sistemi ile karşılanması. Ele alınan her bir durumda yıllık hidrojen üretim miktarı, yıl boyunca hidrojen tankında depolanan hidrojen, yakıt pilinden üretilen toplam enerji, şebekeye satılan ve şebekeden alınan enerji ve sistemin geri ödeme süreleri hesaplandı. Durum II ve Durum III için hidrojen üretiminde iki farklı durum olarak; (i) 120 kW tek elektrolizör sistemi, (ii) 40 kW'lık 3 adet elektrolizör sistemi kullanıldı. Elde edilen sonuçlar Durum II'de şebekeden çekilen enerji miktarının azaldığı ve yıllık karşılanan enerji yüzdesinin arttığını ve rüzgar-hidrojen hibrid enerji sisteminin daha etkin bir şekilde kullanıldığını ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar enerjisi; Hidrojen enerjisi; Hidrojen üretimi; Elektroliz

**INVESTIGATION OF WIND-HYDROGEN HYBRID SYSTEM FOR ENERGY
PRODUCTION IN KAYSERI - PINARBASI DISTRICT**

Muhammet ÇELİK

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M.Sc. Thesis, August 2011

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Gamze GENÇ

ABSTRACT

In this thesis, it is investigated to supply energy demand of a cattle farm in Kayseri-Pinarbasi district by using wind-hydrogen hybrid energy system. Firstly, energy demand of the farm was determined. 4 different wind turbines are considered in accordance with the region's wind potential. Amount of energy, capacity factors and electricity production costs for each turbines are calculated at different hub heights (50 m, 80 m and 100 m). 800 kW wind turbine is selected between considered turbines. Three cases are considered: (i) Case I: Supply of the energy of the farm by using a grid-connected wind energy system, (ii) Case II: Supply of the energy of the farm by using wind-hydrogen hybrid energy system by the priority of hydrogen production (iii) Case III: Supply of the energy of the farm by using wind-hydrogen hybrid energy system by the priority of producing electricity. In all cases, annual hydrogen production, hydrogen stored in the hydrogen tank throughout the year, total energy produced in the fuel cell, total energy sold to the network and bought from the network and amortization time are calculated. Two different hydrogen production cases are considered in the cases of Case-II and -III; (i) one electrolyser system (120 kW), (ii) three electrolysers system (40 kW + 40 kW + 40 kW). The results bring out that energy bought from network is reduced and percentage of annual energy of the farm is increased in the case of Case-II, and so wind-hydrogen hybrid energy system is used more efficiently.

Keywords: Wind energy; Hydrogen energy; Hydrogen production; Electrolysis

İÇİNDEKİLER

KAYSERİ İLİ PINARBAŞI İLÇESİNDE ENERJİ ÜRETİM AMAÇLI RÜZGAR- HİDROJEN HİBRİD ENERJİ SİSTEMİNİN İNCELENMESİ

	<u>Sayfa</u>
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK SAYFASI	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI.....	iii
KABUL VE ONAY SAYFASI	iv
ÖNSÖZ	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER.....	xiii
TABLOLAR LİSTESİ.....	xv
ŞEKİLLER LİSTESİ	xvi
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

ENERJİ KAYNAKLARI

1.1. Fosil Enerji Kaynakları.....	3
1.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları	3
1.3. Türkiye'nin Enerji İhtiyacı	5

2. BÖLÜM

RÜZGAR ENERJİSİ

2.1. Rüzgarın Oluşumu	7
------------------------------------	----------

2.2. Rüzgar Ölçümü	9
2.3. Rüzgar Potansiyelinin Belirlenmesi.....	11
2.4. Rüzgar Türbinleri	12
2.4.1. Yatay eksenli rüzgar türbinleri.....	12
2.4.2. Düşey eksenli rüzgar türbinleri	14
2.4.3. Eğik eksenli rüzgar türbinleri.....	15
2.5. Türkiye ve Dünyada Rüzgar Enerjisi ile İlgili Yapılan Çalışmalar	15

3. BÖLÜM

HİDROJEN ENERJİSİ

3.1. Hidrojen	21
3.2. Hidrojenin Fiziksel Özellikleri.....	22
3.3. Hidrojenin kimyasal özellikleri.....	23
3.4. Hidrojen üretim yöntemleri	25
3.4.1. Buhar Metan Reformasyonu ile Hidrojen Üretimi.....	26
3.4.2. Kömürün Gazifikasyonu ile Hidrojen Üretimi	27
3.4.3. Elektroliz Yoluyla Hidrojen Üretimi.....	28
3.4.4. Termokimyasal Yöntemle Hidrojen Üretimi.....	29
3.5. Hidrojenin Depolanması ve Taşınması	30
3.6. Hidrojenin Kullanım Alanları	31
3.7. Hidrojen Üretimi Üzerine Yapılmış Bazı Akademik Çalışmalar	32

4. BÖLÜM

RÜZGAR-HİDROJEN HİBRİD ENERJİ SİSTEMLERİ

4.1. Rüzgar- Hidrojen Hibrid Enerji Sistemlerinin Tanımı.....	34
4.2. Rüzgar-Hidrojen Hibrid Sistemleri Üzerine Yapılan Çalışmalar	37

5. BÖLÜM

TEORİK ANALİZ

5.1. Rüzgar Gücü Hesabı.....	39
5.2. Kapasite Faktörü.....	40
5.3. Rüzgar Hızının Yükseklikle Değişimi Hesabı.....	40
5.4. Farklı Rüzgar Hızları için Türbinden Üretilen Enerji Miktarı	41
5.5. Hidrojen Üretimi Hesabı	43
5.6 Yakıt Pili Harcanan Hidrojen Hesabı.....	44
5.7. Maliyet Analizi	45
5.7.1. Rüzgar Enerjisi Maliyeti	46
5.7.2. Hidrojen Üretim Maliyeti.....	47
5.7.3. Yakıt Pili Enerji Maliyeti	49

6. BÖLÜM

KAYSERİ İLİ PINARBAŞI İLÇESİNDE ENERJİ ÜRETİM AMAÇLI RÜZGAR-HİDROJEN HİBRİD ENERJİ SİSTEMİ

6.1. Giriş	50
------------------	----

6.2. Pınarbaşı'nın Yeri ve İklim Yapısı.....	50
6.3. Pınarbaşı İlçesinin Rüzgar Potansiyeli.....	51
6.4. Hayvan Çiftliğinin Enerji İhtiyacı.....	53
6.5. Ele Alınan Durumlar	54
6.5.1. Durum I: Küçükbaş Hayvan Çiftliğinin Enerji İhtiyacının Sadece Şebeke-Bağlantılı bir Rüzgar Sistemi ile İhtiyacının Karşılanması	54
6.5.2. Durum II: Küçükbaş Hayvan Çiftliği Enerji İhtiyacının Elektrik Üretimi Öncelikli Amaç Olarak Rüzgar-Hidrojen Hibrid Sistemi ile Karşılanması	54
6.5.3. Durum III: Küçükbaş Hayvan Çiftliği Enerji İhtiyacının Hidrojen Üretimi Öncelikli Amaç Olarak Rüzgar-Hidrojen Hibrid Sistemi ile Karşılanması	56

7. BÖLÜM

BULGULAR

7.1. Rüzgardan Elde Edilen Enerji.....	60
7.2. Durum I: Küçükbaş Hayvan Çiftliğinin Enerji İhtiyacının Sadece Şebeke-Bağlantılı bir Rüzgar Sistemi ile İhtiyacının Karşılanması	60
7.3. Durum II: Küçükbaş Hayvan Çiftliği Enerji İhtiyacının Elektrik Üretimi Öncelikli Amaç Olarak Rüzgar-Hidrojen Hibrid Sistemi ile Karşılanması.....	61
7.3.1. Rüzgar Enerjisi ve Maliyeti	61
7.3.2. Hidrojen Üretimi ve Maliyeti.....	62
7.3.2.1. 120 kW'lık tek elektrolizör sistemi	63
7.3.2.2. 40 kW'lık 3 adet elektrolizör sistemi	65

7.3.3. Yakıt pilinden elde edilen enerji	68
7.3.4. Şebekeden Çekilen Enerji Miktarı	69
7.4. Durum III: Küçükbaş Hayvan Çiftliği Enerji İhtiyacının Hidrojen Üretimi Öncelikli Amaç Olarak Rüzgar-Hidrojen Hibrid Sistemi ile Karşılanması.....	70
7.4.1. Rüzgar Enerjisi ve Maliyeti	70
7.4.2. Hidrojen Üretimi ve Maliyeti.....	71
7.4.2.1. 120 kW'lık tek elektrolizör sistemi	71
7.4.2.2. 40 kW'lık 3 adet elektrolizör sistemi	73
7.4.3. Yakıt Pilinden Üretilen Enerji Miktarı.....	76
7.4.4. Şebekeden Çekilen Enerji Miktarı	76

8.BÖLÜM

SONUÇ-TARTIŞMA VE ÖNERİLER

8.1. Değerlendirme	78
8.2. Sonuçlar ve Öneriler	80
KAYNAKÇA	81
ÖZGEÇMİŞ	

KISALTMALAR VE SİMGELER

<u>Sembol</u>	<u>Anlamı</u>	<u>Birimi</u>
v	Rüzgar Hızı	(m/s)
k	Ölçek Parametresi	--
c	Şekil Parametresi	--
λ	Kanat Uç Hız Oranı	--
γ	Yıl	--
d	Gün	--
P_{toplam}	Toplam Rüzgar Gücü	(W)
m	Kütle Akış Oranı	(kg/s)
V_r	Rüzgar Hızı	(m/s)
ρ	Yoğunluk	(kg/m ³)
A	Alan	m ²
η_t	Türbinin Teorik Verimi	--
C_p	Güç Faktörü	--
C_f	Kapasite Faktörü	--
P_n	Rüzgar Türbininin Nominal Gücü	(W)
E_p	Türbinden Yıllık Üretilen Enerji Miktarı	(kW _y)
z_s	Yüzey Pürüzlülük Katsayısı	--
F	Faraday Sabiti	--
m_{elek}	Elektrolizörden Üretilen Hidrojen Miktarı	(kg)
I_{elek}	Akım	(Ω)
η_i	Akım Verimi	--
V_{elek}	Elektrolizör Çalışma Voltajı	(V)
m_{yp}	Yakıt Pili İçin Gerekli Hidrojen Miktarı	(kg)
μ_{yp}	Faraday Verimi	--
η_{yp}	Yakıt Pilinin Verimi	--
M_{RES}	Rüzgar Enerji Sisteminin Toplam Maliyeti	(\$/kW)
M_{RT}	Rüzgar Türbini Maliyeti	(\$)

M_B	Batarya Maliyeti	(\$)
M_{IK}	İşçilik-Kurulum Maliyeti	(\$)
M_D	Diğer Maliyetler	(\$)
M_{ORES}	Rüzgar Enerji Sisteminin Özgül Maliyeti	(\$/kWh)
M_{IO}	İşletme Ve Onarım Maliyeti	(\$)
SDF	Sermaye Dönüşüm Faktörü	--
i	İskonto Oranı	--
l	Sistem Ömrü	(yıl)
e	Eskalasyon Oranı	--
M_{YYM}	Yıllık Yatırım Maliyeti	(\$)
M_E	Elektrik Maliyeti	(\$)
M_{IB}	İşletme Ve Bakım Maliyeti	(\$)
M_{OM}	Özgül Maliyet	(\$/kWh)
M_S	Şebekeye Satış Maliyeti	(\$)

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Yenilenebilir enerji kaynakları ve dönüşümleri.....	4
Tablo 3.1. Hidrojenin fiziksel özellikleri	23
Tablo 5.1. z_s katsayısı değerleri	41
Tablo 6.1. Küçükbaş hayvan çiftliği enerji ihtiyacı	53
Tablo 7.1. Rüzgar türbini karakteristikleri	60
Tablo 7.2. Şebeke yıllık alış-satış fiyatları ve geri ödeme süreleri	61
Tablo 7.3. Farklı türbin tiplerinin farklı yükseklik için hesaplanmış kapasite faktörü, üretilen enerji ve enerji maliyeti değerleri	62
Tablo 7.4. Farklı elektrolizör ve farklı yükseklik değerleri için yakıt pilinden elde edilen yıllık enerji miktarı (Durum II).	69
Tablo 7.5. Farklı elektrolizör durumları ve farklı yükseklik için şebekeden çekilen yıllık enerji miktarları (Durum II).....	69
Tablo 7.6. Farklı yükseklik ve farklı elektrolizör durumları için çiftliğin enerji ihtiyacının rüzgar-hidrojen sistemi ile karşılanan kısmı (Durum II).	70
Tablo 7.7. Farklı elektrolizör ve farklı yükseklik değerleri için yakıt pilinden elde edilen yıllık enerji miktarı.....	76
Tablo 7.8. Farklı elektrolizör durumları ve farklı yükseklik için şebekeden çekilen yıllık enerji miktarları	77
Tablo 7.9. Farklı yükseklik ve farklı elektrolizör durumları için çiftliğin enerji ihtiyacının rüzgar-hidrojen sistemi ile karşılanan kısmı	77
Tablo 8.1. Ele alınan her durum için elde edilen geri ödeme süreleri [yıl].....	80

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Dünya yenilenebilir enerji tüketim miktarları [2].	5
Şekil 2.1.	Kepçe Anemometre [6].	9
Şekil 2.2.	Kepçe, ultrasonik ve propeller anemometreler [8].	10
Şekil 2.3.	Rüzgar yön sensörü [7].	11
Şekil 2.4.	Yatay eksenli bir rüzgar türbini [9].	13
Şekil 2.5.	Darius Rüzgar Türbini [12].	14
Şekil 3.2.	Metan buhar reformasyonu [65].	26
Şekil 3.3.	Kömürün gazlaştırılması işlemi [66].	27
Şekil 3.4.	Bir PEM elektrolizörün çalışma prensibi.	29
Şekil 3.5.	Tek hücreli bir PEM yakıt pili.	32
Şekil 4.1.	Rüzgar enerjisi-hidrojen sistemi genel elemanları.	35
Şekil 4.2.	Şebeke bağlantılı rüzgar-hidrojen sistemi [80].	36
Şekil 4.3.	Şebekeden bağımsız rüzgar-hidrojen sistemleri [80].	37
Şekil 5.1.	Bir rüzgar türbini için güç eğrisi.	42
Şekil 5.2.	Bir rüzgar türbini için maliyet yüzdeleri.	46
Şekil 6.1.	Rüzgar-Hidrojen sistemi genel elemanları.	51
Şekil 6.2.	10m yükseklikte 2000-2006 yılları arası Pınarbaşı ilçesi için saatlik ortalama rüzgar hızı verileri [92].	52
Şekil 6.3.	Türkiye Rüzgar Atlası (yer düzeyinden 50 m yükseklikteki açık yüzeyler için rüzgar potansiyeli sınıf aralıkları) [92].	52

Şekil 6.4.	Durum II için sistem şeması.	55
Şekil 6.5.	Durum III için sistem şeması.	56
Şekil 7.1.	50 m yükseklik için rüzgar hızı verileri	58
Şekil 7.2.	80 m yükseklik için rüzgar hızı verileri	59
Şekil 7.3.	100 m yükseklik için rüzgar hızı verileri	59
Şekil 7.4.	50 m yükseklik için 120 kW tek elektrolizör sisteminde zamanla depoda biriken hidrojen miktarı.....	63
Şekil 7.5.	80 m yükseklik için 120 kW tek elektrolizör sisteminde zamanla depoda biriken hidrojen miktarı (Durum II).....	64
Şekil 7.6.	100 m yükseklik için 120 kW tek elektrolizör sisteminde zamanla depoda biriken hidrojen miktarı (Durum II).....	64
Şekil 7.7.	Yükseklığe bağlı olarak hidrojen üretim maliyetindeki değişim (Durum II)	65
Şekil 7.8.	50 m yükseklik için 40 kW'lık 3 adet elektrolizör sisteminde zamanla depoda biriken hidrojen miktarı (Durum III).....	66
Şekil 7.9.	80 m yükseklik için 40 kW'lık 3 adet elektrolizör sisteminde zamanla depoda biriken hidrojen miktarı	67
Şekil 7.10.	100 m yükseklik için 40 kW'lık 3 adet elektrolizör sisteminde zamanla depoda biriken hidrojen miktarı	67
Şekil 7.11.	Yükseklığe bağlı olarak hidrojen üretim maliyetindeki değişim (Durum II)	68
Şekil 7.12.	50 m yükseklik için 120 kW tek elektrolizör sisteminde zamanla depoda biriken hidrojen miktarı (Durum III)	71

Şekil 7.13. 80 m yükseklik için 120 kW tek elektrolizör sisteminde zamanla depoda biriken hidrojen miktarı (Durum III)	72
Şekil 7.14. 100 m yükseklik için 120 kW tek elektrolizör sisteminde zamanla depoda biriken hidrojen miktarı (Durum III)	72
Şekil 7.15. Yüksekliğe bağlı olarak hidrojen üretim maliyetindeki değişim (Durum III)	73
Şekil 7.16. 50 m yükseklik için 40 kW'lık 3 adet elektrolizör sisteminde zamanla depoda biriken hidrojen miktarı (Durum III)	74
Şekil 7.17. 80 m yükseklik için 40 kW'lık 3 adet elektrolizör zamanla depoda biriken hidrojen miktarı (Durum III)	74
Şekil 7.18. 100 m yükseklik için 40 kW'lık 3 adet elektrolizör sisteminde zamanla depoda biriken hidrojen miktarı (Durum III)	75
Şekil 7.19. 3 adet 40 kW'lık elektrolizör sistemi için yüksekliğe bağlı olarak hidrojen üretim maliyetindeki değişim (Durum III)	76
Şekil 8.1. Yıllık üretilen hidrojen miktarının yükseklikle değişimi.....	79

GİRİŞ

En temel tanımıyla enerji, iş yapabilme yeteneği olarak adlandırılmaktadır. Doğada olup biten herşeyin temelinde enerji vardır. İnsanların yaşamları boyunca gereksinim duydukları en temel ihtiyaç enerjidir. Enerjinin, ses, ışık, kimyasal, nükleer, elektrik, ışık, biyoenerji gibi birçok çeşidi vardır ve enerji, bu biçimler arasında dönüşüm yapabilir. İnsanların yaşamlarını sürdürebilmeleri için yaptıkları ve hâlihazırda yapmaya çalıştıkları her şey belirli enerji çeşitlerini kendileri için faydalı olacak bir enerji çeşidine çevirerek kullanmaları ve bu enerji ihtiyacını karşılamak içindir. Örneğin bir insanın yaşamını sürdürebilmesi için oksijen ve besin alması gerekir, fakat bunun temelinde hücrelerin enerji üretme ihtiyacı bulunmaktadır, hücreler alınan bu oksijen ve besinleri kullanarak kendi enerjilerini üretmektedirler. Bu örnek enerjinin hayattaki en önemli şey olduğunu göstermektedir.

Bir insanın kendi enerjisi için besin ve oksijen tüketmesi gerektiği gibi bir milletinde ayakta kalabilmesi için kendi enerji ihtiyacını karşılaması gerekir. Bu ihtiyaç dünyada politik birçok sorun oluşturmuş ve her millet kendi enerji ihtiyacını karşılayabilmek için enerji kaynakları arayışı içerisine girmişlerdir.

Her milletin enerji ihtiyacını karşılayabilmesi için belirli enerji kaynaklarından yararlanması gerekmektedir. Bu enerji kaynakları esas olarak yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları olarak iki gruba ayrılır.

Bugüne kadar enerji üretmek amacıyla kullanılan odun, kömür, petrol gibi kaynaklar yenilenemez enerji kaynakları içerisine alınır, çünkü bu kaynaklar belirli bir rezerve sahip ve bu rezerv bittiği anda bu kaynakların kullanımı son bulacaktır. Yapılan çalışmalarda göstermiştir ki yenilenemez enerji kaynaklarından olan fosil kaynaklı yakıtların rezervleri çok kısa bir süre içinde tükenecek ve enerji ihtiyacını karşılayamaz konuma gelecektir. Bu nedenle alternatif enerji kaynaklarına yönelmek gerekmektedir.

Bu alternatif enerji kaynakları; yenilenebilir enerji kaynakları olarak güneş, rüzgar, jeotermal, dalga, biyokütle, hidrojen vb. olarak bilinmektedir. Bu enerji kaynaklarının en önemli özelliği fosil kaynaklı yakıtlar gibi kısıtlı bir rezerve sahip olmamaları ve devamlı yenilenebilir olmalarıdır. Dünya üzerinde bu yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına geçiş için yapılmış ve yapılmakta olan birçok çalışma bulunmaktadır.

Her ülkenin artan nüfusun enerji talebini karşılayabilmesi amacıyla enerji sektörüne yönelik adımları olmaktadır. Fosil kaynaklı yakıtların sınırlı rezervlerinden dolayı bu enerji sektörü yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru yönelmiştir. Bu nedenle ülkemizin de yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yoğunlaşması gerekmektedir.

Bu nedenle, bu tez çalışmasında Kayseri ilinde bulunan Pınarbaşı bölgesi için kurulacak bir küçükbaş hayvan çiftliğinin enerji ihtiyacının rüzgar ve hidrojen enerjisi ile karşılanabilmesi amacıyla bir rüzgar-hidrojen hibrid sistemi kurulması düşünülmüştür.

Bu amaç doğrultusunda bölgenin rüzgar potansiyeline uygun olarak bir rüzgar türbini seçimi yapılmış ve bu rüzgar türbininden elde edilen enerji ile hidrojen üretimi yapmak amacıyla bir elektrolizör sistemi kullanılması düşünülmüş ve bu elektrolizör sisteminin farklı şekillerde kullanılmasıyla hidrojen üretim miktarlarındaki değişim ve maliyetler hesaplanmış ve daha sonra bu üretim miktarları doğrultusunda yakıt pilinden üretilecek enerji miktarı hesaplanarak bu sistemin çiftliğin yıllık enerji ihtiyacının ne kadarını karşılayacağı hesaplanmıştır.

1. BÖLÜM

ENERJİ KAYNAKLARI

1.1. Fosil Enerji Kaynakları

Bu kaynaklar kömür, petrol, doğalgaz gibi bugüne kadar enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karşılayan kaynaklar olup dünya üzerinde yaşamış organizmaların belirli basınç ve sıcaklıklarda yer altında binlerce yıl sonunda oluşmuş yakıtlardır. Günlük hayatta motorin, benzin, LPG, plastik gibi kullanım alanlarına sahiptir. Fakat fosil kaynaklı yakıtlar dünya üzerinde belirli bölgelerde yoğunlaşmış ve belirli bir rezerve sahip kaynaklardır. Bu kaynakların belirli bölgelerde yoğunlaşması nedeniyle günümüze kadar birçok politik kaynaklı sorunlar ortaya çıkmıştır. Ayrıca bu kaynakların rezervlerinin sınırlı olması nedeniyle tükenmesi söz konusudur. Artan dünya nüfusu, buna bağlı olarak ülkelerin enerji ihtiyaçlarının artması nedeniyle son yıllarda bu kaynakların tüketim oranları yükselmiş ve yükselmeye devam etmektedir. Bir başka ve en önemli sorun ise, bu kaynakların kullanımının çevreye olan etkileridir. Fosil kaynaklı yakıtlar organik yapıya sahip olduklarından dolayı, yanmaları sonucunda CO₂ ve CO gibi bileşikler oluşur ve bunların atmosferde birikmeleri sonucunda sera etkisi ve dolayısıyla küresel ısınma meydana gelir.

1.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Dünya'nın fosil enerji kaynaklarının tükendiği herkes tarafından kabul edilmiş ve dünya çapında ihtiyaç olan dizel, benzin ve kömür ihtiyacının gün geçtikçe artacağı ve doğal olarak artan ihtiyaca bağlı olarak bunların fiyatlarının da artacağı kaçınılmaz bir gerçektir. Aynı zamanda dünya üzerinde nükleer güç santrallerinin yaygınlaşması ve geliştirilmesi politik nedenlerle karşı çıkılan bir durumdur. Bu durum sonucunda yenilenebilir enerji kaynaklarının dünyanın gelecekteki fazla enerji ihtiyacını

karşılatabileceği düşünülmektedir. Hiçbir zararlı emisyon barındırmaması nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları çevre dostu bir enerji çeşididir. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynakları iklim değişikliğine karşı yapılan savaşta en önemli silahlardan biri olarak görülmektedir [1].

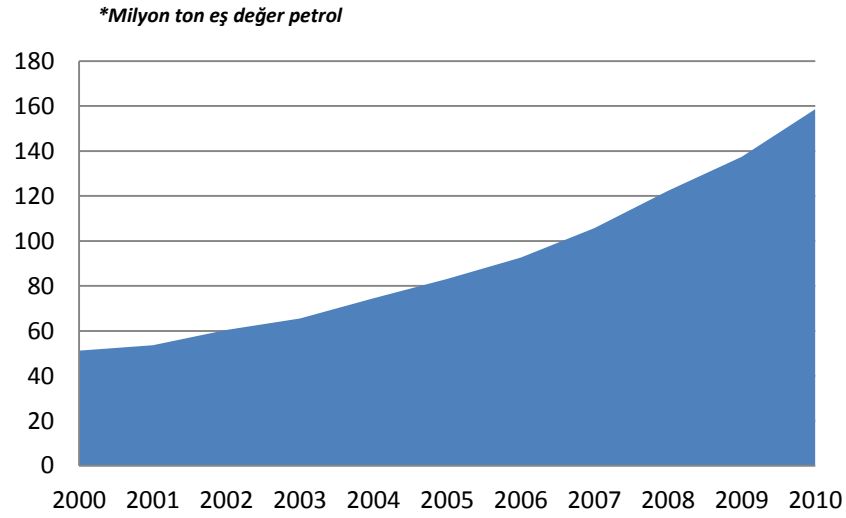
Yenilenebilir enerjinin ana kaynağı güneş ve buna bağlı olarak dünya ve aydır. Tablo 1.1’de birincil kaynakların listesi, doğal ve teknik dönüşüm metotları görülmektedir. Bunların hâlihazırdaki enerji ihtiyacına katkısı hidroenerji, rüzgar, güneş enerjisi ve biokütledir.

Su gücü yıllardır elektriksel güç istasyonları ve pompalı depolama sistemlerinde kullanılırken, büyük oranda su güç dönüşümünün kullanımı 1980’lerde başlamıştır. Yoğun teknik gelişimlerle birlikte hızlı bir şekilde MW boyutlarına ulaşmıştır. Güneş enerjisi fotovoltaik panellerle direkt olarak dönüşüm yapmakla birlikte termal kollektörler ve buhar üretiminde de kullanılmaktadır. Yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimi maliyetler açısından birbirleriyle rekabet içerisinde. Rüzgar enerji sistemleri uzun zamandır rakipsiz bir enerji üretim metodu iken, fotovoltaik enerji üretimi hala çok pahalı durumdadır.

Tablo 1.1. Yenilenebilir enerji kaynakları ve dönüşümleri

Birincil kaynak	Ortam	Doğal dönüşüm	Teknik dönüşüm
Güneş	Su	Evaporasyon, çökme, kaynama	Su güç istasyonları
	Rüzgar	Atmosferik hava akımı rüzgar hareketi	Rüzgar enerji dönüşümü Dalga gücü santralleri
	Güneş enerjisi	Okyanus akımı	Okyanus güç santralleri
		Yeryüzü ve atmosfer ısınması Solar radyasyon	Termal güç üniteleri, ısı pompaları Heliotermal dönüşüm, fotovoltaik dönüşüm
	Biyokütle	Biyokütle üretimi	Kojenerasyon santralleri
Yeryüzü	İzotop çürümesi	Jeotermal ısınma	Kojenerasyon santralleri
Ay	Gravitasyon	Gelgitler	Gelgit güç santralleri

Daha önce belirtildiği gibi dünya, fosil kaynaklı yakıt kullanımına son vermek için hızla yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru yönelmeye başlamıştır. 2010 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı %15.5 oranında bir büyüme göstererek dünya enerji tüketim miktarının %1.3'üne çıkmıştır [2]. Şekil 1.1'den de görüleceği üzere dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı 2000 yılında 51.2 milyon ton eşdeğer petrol (Mtoe) iken 2010 yılında bu değer 158.6 Mtoe olmuştur. Bu yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde biyokütle üretimi %14 büyüyerek 59 milyon ton olurken, jeotermal santraller %1.8 büyüyerek 10.9 GW kapasiteye ulaşmıştır. Aynı zamanda güneş enerjisi santralleri 2010 yılında %73 oranında bir büyüme gerçekleştirmiş, rüzgar enerjisi ise %24.6 oranında bir büyüme gerçekleştirmiştir [2].



Şekil 1.1 Dünya yenilenebilir enerji tüketim miktarları [2].

1.3. Türkiye'nin Enerji İhtiyacı

Gelişmekte olan ülkelerde olduğu gibi Türkiye'ninde nüfusu ve sanayisi gelişerek büyümektedir. Bunun sonucu olarakta enerji ihtiyacı günden güne artmaktadır. Bu ihtiyaç 2005 yılı itibariyle 162.5 GWh olup bu ihtiyacın %44.74'ü doğalgazdan,

%25.05'i kömürden, %25.11'i hidroelektrikten, %4.92'si petrolden, %0.09'u biyokütleden, %0.06'sı jeotermal ve %0.04'ü ise rüzgardan karşılanmaktadır [3]. Bu değerlerden görüleceği gibi Türkiye enerji ihtiyacının çok büyük bir kısmını fosil kaynaklı yakıtlardan karşılamakta ve bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarına çok önem vermesi gerekmektedir.

2. BÖLÜM

RÜZGAR ENERJİSİ

2.1. Rüzgarın Oluşumu

Yatay atmosferik hava hareketinin (rüzgar) birincil nedeni, yeryüzünün ve atmosferinin solar radyasyon nedeniyle ve yeryüzünün dönme hareketinden dolayı farklı sıcaklıklarda ısınmasıdır. Dünya, atmosferi üzerine gelen solar radyasyonun %43'ünü tekrar uzaya yansıtır, %17'sini kendi içerisinde emer ve kalan %40'ını yeryüzüne iletir ve bunun büyük kısmı da yeryüzü tarafından tekrar atmosfere yansıtılır. Güneşten gelen radyasyon kısa dalga boylarındadır (0.15-4 μm) ve kolayca atmosfer içerisinden geçer, oysa yeryüzünden yansıyan radyasyon daha uzun dalga boylarına sahiptir (5-20 μm) ve atmosferdeki su buharı tarafından kolayca absorbe edilir. Böylece yeryüzünden yansıyan radyasyon, yeryüzüne yakın olan atmosferin ısınmasında birincil derecede sorumludur. Isı ayrıca yeryüzünden atmosfere iletim ve taşınım ile transfer edilir.

Ortalama olarak, yeryüzü ve atmosferinden uzaya yansıtılan enerji miktarı absorbe edilen solar radyasyon miktarına eşit olmak zorundadır veya yeryüzü ve atmosferin sıcaklığı sürekli artmalı veya azalmalıdır. Takriben dik olan güneş ışınlarının yeryüzüne daha fazla gelmesiyle daha fazla solar radyasyon atmosfere iletilir. Böylece yıl boyunca tropikal bölgeler kutup bölgelerinden daha fazla güneş enerjisi alır. Termal enerjideki bu dengesizlik, tropikal bölgelerin giderek daha fazla ısınmasını ve kutup bölgelerinin de giderek daha fazla soğumasını önlemek için rüzgarlar ve okyanus akıntılarının oluşmasını sağlar. Buna ek olarak yeryüzünün homojen olmaması –kara, su, çöl, orman, kaya, kum, siyah balçık toprak gibi- farklı solar radyasyon emilimi ve farklı atmosfer yansıması oluşturarak atmosferik sıcaklık yoğunluk ve basınç farkları meydana getirir.

Bu farklar, rüzgar oluşumuna neden olur. Örneğin; bir kara ve kıyı şeridi boyunca olan su tarafından emilen ve yayılan radyasyon farkı kıyı esintileri ve rüzgarlarının en büyük nedenidir; dağlar ve vadiler arasındaki radyasyon emilim ve yayılım farkları da dağlık bölgelerde görülen aşağı ve yukarı eğimli esintilere neden olur. Dünya'nın dönme hareketi, Koriolis kuvvetleri denen havanın her parçasının hareket yönünü sağa doğru, güney yarımküredeki partikülün de sola doğru hareket etmesini sağlar. Atmosferin üst kısımlarında (600m üzeri) oluşan Jeostrofik rüzgârlar bu Koriolis kuvvetlerinin dengelenmesinden kaynaklanır ve basınç gradyanı farkları atmosferde dengesiz ısınmalara neden olur.

Dünyanın dönme hareketi ayrıca doğu-batı yönündeki her hava parçasığında bir açıl momentum oluşturur. Açıl momentumun korunumu, parçasığın ekvator dan kutuplara olan hareketindeki doğudan-batıya hızında bir artış meydana getirir. Sıcaklık bölgeleri içerisinde iki yarım kürede de bu genel akışa karşı olan batı rüzgarlarına neden olur.

Ekvatorial rüzgar kuşakları, alize rüzgarları, doğu rüzgarları, subtropik ve kutupsal jetler gibi diğer büyük ölçekli ve uzun vadeli rüzgarlar solar ısınma farkları ve dünya dönme hareketlerinin bir kombinasyonunun sonuçlarıdır. Bu rüzgarlı bölgeler, genel sirkülasyon bölgeleri olarak adlandırılır. Gerçekte bu bölgeler, bir yıldaki dünyanın rotasına bağlı olarak güneşe karşı olan pozisyonu nedeniyle oluşan değişimler nedeniyle olan mevsimsel etkilere ve su ve kara yüzeyleri gibi dengesiz bir fiziksel özellik dağılımından kaynaklanan jeografik etkiler nedeniyle çok karmaşıktır. Yüksek veya alçak basınç merkezleri, alt atmosferin ısınmasına ve soğumasına neden olarak kasırgalar dahil olmak üzere musonlar ve ekstrapolik siklonlara neden olur.

Zaman içinde rüzgar hızındaki uzun vadeli, yıllık, bir günlük ve kısa vadeli olmak üzere kategorilere ayrılabilir. Rüzgar hızındaki uzun vadeli değişimler bir yıldan fazla bir sürede gerçekleşir. Meteorolojistler genellikle verilen bir bölgede havanın veya iklimin uzun vadeli değerlerini tanımlamak için 30 yıllık verilere ihtiyaç duyulduğu ve güvenilir bir ortalama yıllık rüzgar hızı değeri elde etmek içinde en az 5 yıla ihtiyaç duyulduğu konusunda anlaşmışlardır.

Yıllık değişimler yaygın olarak dünya üzerindeki çoğu yerde gerçekleşen mevsimsel ya da aylık ortalama rüzgar hızlarındaki değişimleri belirtir. Örneğin Amerika'nın batı kısmının üçte biri için maksimum rüzgar hızları kış aylarında ve ilkbahar aylarında gerçekleşir.

Rüzgardaki büyük günlük ya da günün belirli bir saatindeki değişimler hem tropikal hem de sıcak enlemlerde gerçekleşir. Bu rüzgar hızı değişimleri dünya yüzeyindeki günlük radyasyon döngüsü boyunca oluşan farklı sıcaklıklar nedeniyle gerçekleşir [4].

2.2. Rüzgar Ölçümü

Bir rüzgar santralinin kurulması için gereken en temel adım, santralin kurulacağı bölgenin rüzgar potansiyelini belirlemektir. Bu rüzgar potansiyelini belirlemek içinse bölgede rüzgar ölçümleri yapılması gerekir. Bu rüzgar ölçümleri ülkemizde Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ) tarafından gerçekleştirilmektedir. Genellikle bu ölçümler 10m ve 30m yüksekliklerde olmak üzere 10 dakika aralıklarla saatlik olarak gerçekleştirilmektedir [5]. Bu ölçümler sayesinde bölgenin rüzgar potansiyeli, buna bağlı olarak kurulacak bir rüzgar türbinin üreteceği enerji miktarı hesaplanabilmektedir. Rüzgar ölçümlerinde Şekil 2.1'de verilen ve genellikle işletme ve kullanım açısından çok kolaylık sağlayan kepçe (cup) anemometreler kullanılmaktadır.



Şekil 2.1. Kepçe Anemometre [6]

Bu anemometreler Şekil 2.1’de görüldüğü gibi farklı yönlere bakan kepçelerden oluşmaktadır. Rüzgarın esmesiyle kepçeler dönerek rüzgarın hızını ölçer. Bu anemometreler yönden bağımsız bir şekilde rüzgar ölçümü yapabilmekte ve kullanımı basit bir yapıya sahiptir. Kepçe anemometreler dışında yaygın olarak kullanılan iki farklı anemometre tipi daha vardır. Bunlar ultrasonik ve propeller tipi anemometrelerdir.

Ultrasonik anemometreler, uçlarından yayılan ses dalgalarının diğer uçlara ulaşması sırasında geçen süreyi ölçerek rüzgar hızını hesaplamaktadır. Fakat bu anemometreler yeterince hassas olmamakla birlikte kalibre edilmeleri zordur ve çok güç harcamaktadırlar [7].

Propeller anemometreler ise kepçe anemometreler gibi üzerlerinde bulunan kanatlara rüzgarın etkisiyle dönme hareketi sayesinde hız ölçümü yapmaktadır ve yatay-dikey rüzgar hızlarını ölçebilmektedirler [8]. Şekil 2.2’de rüzgar ölçümünde kullanılan anemometreler gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Kepçe, ultrasonik ve propeller anemometreler [8].

Rüzgar potansiyeli belirlemek için gerekli olan bir diğer parametre de rüzgarın yönüdür. Bu nedenle rüzgar ölçüm istasyonlarında yön sensörleri de kullanılmaktadır. Bu sayede

elde edilen verilerle rüzgarın sene boyunca hangi yönlerden ne kadar sıklıkta eseceği de belirlenebilir. Genellikle yön sensörleri ölçüm direklerinde anemometreyi etkilememesi için 1.5 m aşağısına yerleştirilir ve windvane adı verilen rüzgar yön sensörleri kullanılır [7].



Şekil 2.3. Rüzgar yön sensörü [7].

2.3. Rüzgar Potansiyelinin Belirlenmesi

Bir bölgeye rüzgar enerji sistemi kurulmadan önce o bölgenin rüzgar dağılımı hakkında bilgi sahibi olunması gerekir. Bölgenin ortalama rüzgar değerleri, hangi hız, hangi yön ve hangi sıklıkta olacağı gibi bilgiler elde edildikten sonra bölgenin rüzgar potansiyelinin rüzgar enerjisi sistemi kurulmasına uygun olup olmayacağı hakkında bilgi sahibi olunabilir. Bir bölgenin rüzgar potansiyelini belirlemek amacıyla genellikle iki farklı istatistikî hesaplama yapılmaktadır. Bunlar;

- Weibull Dağılımı
- Rayleigh Dağılımı

olarak sıralanabilir. Weibull dağılım fonksiyonu aşağıdaki eşitlikle tanımlanır:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2.1)$$

Burada;

k: ölçek parametresi

c: şekil parametresi

v: rüzgar hızı

olarak tanımlanır.

Rayleigh dağılımı ise Weibull dağılım fonksiyonunun daha basitleştirilmiş hali gibi düşünülebilir. Rayleigh dağılım fonksiyonu Weibull dağılım fonksiyonundaki şekil parametresinin 2 olarak alınması ile elde edilebilir ve en önemli özelliği sadece rüzgar hızının bilinmesi ile rüzgar dağılımının elde edilebilmesidir [9]. Rayleigh dağılım fonksiyonu v rüzgar hızı ve v_m ortalama rüzgar hızı olmak üzere aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$f_R(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{v}{v_m}\right)^2\right] \quad (2.2)$$

2.4. Rüzgar Türbinleri

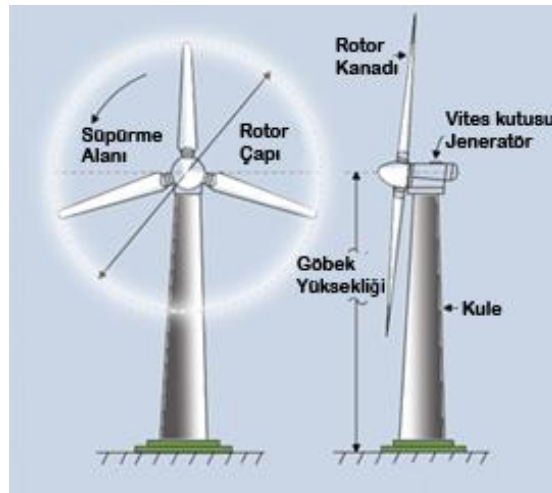
Rüzgar türbinleri rüzgar enerjisini, elektrik enerjisine çevirmek için kullanılan aygıtlardır. Kanatlar, dişli kutusu, jeneratör, kule gibi ana elemanlardan oluşur ve eksenlerine göre üçe ayrılır:

- Yatay eksenli rüzgar türbinleri
- Düşey eksenli rüzgar türbinleri
- Eğik eksenli rüzgar türbinleri

2.4.1. Yatay eksenli rüzgar türbinleri

Yatay eksenli rüzgar türbinleri kanatları yatay olarak yerleştirilmiş ve en yaygın olarak kullanılan rüzgar türbinleridir. Yatay eksenli bir rüzgar türbinin genel yapısı Şekil 2.4'te

gösterilmiştir. Türbinin kanatları rüzgara dik olarak yerleştirilmiştir. Ticari olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Çok düşük güçlerden başlayıp büyük güçlere kadar geniş bir yelpazede enerji üretimi yapabilen çeşitleri vardır. Bu türbinlerde kule yüksekliği artırılarak rüzgar enerjisinden daha etkin bir şekilde yararlanılabilir.



Şekil 2.4. Yatay eksenli bir rüzgar türbini [9].

Yatay eksenli rüzgar türbinleri farklı sayıda kanatlara sahip olabilirler, kanat sayısının azalmasıyla rotorun dönme hızı artar. Rüzgar hızının, türbin kanatlarının uç hızına bölünmesiyle kanat uç hız oranı (λ) elde edilir. Kanat uç hız oranına bağlı olarak kullanılan türbinler şu şekildedir [11] :

- $\lambda=1-5$ ise çok kanatlı
- $\lambda=6-8$ ise üç kanatlı
- $\lambda=9-15$ ise iki kanatlı
- $\lambda>15$ ise tek kanatlı

Günümüzde en yaygın kullanılan rüzgar türbinleri üç kanatlı türbinlerdir. Bu türbinlerin kanat uç hız oranları tek ve iki kanatlı türbinlere göre daha az olduğu için daha az

gürültü oluşturmaktadırlar ve dengeli bir kanat yapısına sahip oldukları için atalet momentlerinden oluşan titreşimlerin etkisi daha azdır. Tek ve iki kanatlı rüzgar türbinlerinde oluşan fazla titreşim ve gürültü nedeniyle tercih edilmemektedirler. Çok kanatlı rüzgar türbinleri rüzgar türbinlerinin ilk örnekleri olup kanat uç hız oranlarının düşük olması nedeniyle düşük hızlarda çalışmalarından dolayı tercih edilmemektedir.

2.4.2. Düşey eksenli rüzgar türbinleri

Düşey eksenli rüzgar türbinleri Şekil 2.5’ te gösterildiği gibi düşey olarak yerleştirilmiş kanatlara sahiptir. Rüzgarı her yönden alarak enerji üretebilirler, bu nedenle rüzgara karşı konumlanmak amacıyla yönlendirme mekanizmalarına gerek duymazlar. Fakat bu türbinler düşük rüzgar hızlarında çalışmaktadırlar. Kanatlarının büyüklüğü nedeniyle kule yüksekliğinin artırılmasıyla hem ağırlık hem de maliyet artmaktadır. Ağırlığın artmasıyla yüksek rüzgar hızlarında verimsiz çalışmaktadırlar.



Şekil 2.5. Darius Rüzgar Türbini [12].

DüŖey eksenli türbinlerin güç katsayıları düşük olduğu için yaygın olarak kullanılmazlar. Düşük rüzgar hızlarında kullanılmaları nedeniyle yatay eksenli rüzgar türbinlerine nazaran daha az enerji üretirler.

2.4.3. Eğik eksenli rüzgar türbinleri

Rüzgara karşı dik bir konumda değil, belirli bir açı yapan rüzgar türbinleridir. Yaygın olarak kullanılmamaktadır [10].

2.5. Türkiye ve Dünyada Rüzgar Enerjisi ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Bilgili vd. [14] ve Şahin vd. [15] Anadolu'nun güney kısmında bulunan Antakya, Samandağ, Karataş, Adana, Yumurtalık, Dört Yol ve İskenderun bölgeleri için rüzgar potansiyelini belirlemişlerdir. Bu çalışmalara göre seçilen bölgelerin yeterli rüzgar hızına sahip oldukları ve bu bölgelerde rüzgar çiftliklerinin kurulmasının uygun olacağı sonucuna varmışlardır. Bilgili ve Şahin [16] ve Şahin ve Bilgili [17] Türkiye'nin güney ve güneydoğu bölgeleri için rüzgar enerji yoğunluğunu hesaplamışlar ve baskın rüzgar yönleri, olasılık fonksiyonları, Weibull parametreleri, ortalama rüzgar hızları ve güç potansiyelleri yıllık, mevsimlik, aylık ve saatlik olarak belirlenmiştir. Bu verilere göre seçilen bölgelerin yeterli rüzgar potansiyeline sahip olduğu ve rüzgar türbinleri ile enerji üretiminin uygun olacağı belirtilmiştir. Ayrıca Belen-Hatay bölgesinin seçilen bölgeler içerisinde en uygun yer olacağı sonucuna varılmıştır. İlkılıç ve Türkbay [18] Türkiye'nin rüzgar potansiyelini değerlendirerek her bölge için yıllık ortalama rüzgar hızının 2.58 m/s ve yıllık rüzgar yoğunluğunun 25.82 W/m² olduğunu hesaplamışlar ve Türkiye'deki kurulma aşamasında olan ve kurulacak olan rüzgar enerjisi projelerinden bahsederek 2010 yılının sonuna kadar Türkiye'nin 1503.35 MW'lık rüzgar enerjisi üretim potansiyeline ulaşacağını belirtmişlerdir.

Erdođdu [19] rüzgar enerjisinin Türkiye’deki yerinden bahsederek elektrik üretimi, doğalgaz, hidro, kömür, biyokütle ve jeotermal enerjilerinden bahsetmişlerdir. Türkiye’nin rüzgar enerji potansiyeli OECD ülkeleri ile karşılaştırılmış ve 83000 MW teknik rüzgar enerji potansiyeli ile bu ülkeler içerisinde en yüksek potansiyele sahip ülke olduğu belirtilmiştir. Buna ek olarak Ođulata [20], Kaygusuz [21], Evrendilek ve Ertekin [22] ve Özgür [23], Türkiye’deki yenilenebilir enerji kaynaklarının durumundan bahsederek rüzgar enerjisi ile karşılaştırma yapmışlardır.

Akdağ ve Dinler [24] Weibull dağılımını elde etmek için güç yoğunluğu metodu ismiyle bir metod geliştirmişler ve bu metodun doğruluğunu belirlemek için Maden, Gökçeada, Çanakkale ve Bozcaada bölgeleri için Maksimum Olasılık, Moment ve Grafik metodları ile bir karşılaştırma yapmışlar ve bu yeni metodun daha uygulanabilir olduğu sonucuna varmışlardır.

Akdağ ve Güler [25] Türkiye’de yapılacak rüzgar enerji yatırımları ve maliyetleri üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada dünyadaki 2000 ve 2008 yılları arasında kurulmuş ilk on rüzgar türbin sistemleri üzerinde durulmuş ve Türkiye’de ki rüzgar enerjisi projelerinden bahsedilerek yeni rüzgar lisanslarıyla rüzgar enerji sisteminin 287 TWh ve kapasite faktörlerinin %41.9 seviyelerine çıkacağı tahmin edilmiştir. Buna ek olarak Türkiye’de kurulacak rüzgar türbinlerinin maliyetlerinin 1.73 ile 4.99 \$cent/kWh olacağı hesaplanmıştır. Güler [26] ve Kaygusuz [27] rüzgar enerjisinin Türkiye’deki ve dünyadaki yerinden ve elektrik üretim ücretlerinden bahsetmişlerdir. Türkiye’nin Avrupa ülkeleri içerisinde 88000 MW’lık teknik potansiyeli ile lider konumda bulunduğu fakat en düşük rüzgar enerjisi kullanım oranına sahip olduğu belirtilmiştir. Benzer olarak Alboyacı ve Dursun [28] ‘da Türkiye’deki rüzgar enerjisi potansiyelini

Avrupa ülkeleri ile karşılaştırmışlar ve Türkiye'deki rüzgar santrallerinin durumundan bahsetmişlerdir.

Karslı ve Geçit [29] Türkiye'nin güneyinde bulunan Nurdağı / Gaziantep bölgesinin rüzgar gücü potansiyelini değerlendirmişler ve ortalama rüzgar hızını 10 m yükseklik için 7.3 m/s ve ortalama güç yoğunluğunu da 222 W/m^2 olarak hesaplamışlardır. Akpınar ve Akpınar [30] Türkiye'nin doğusunda bulunan Maden-Elazığ bölgesinin rüzgar potansiyelini belirlemişler ve ortalama rüzgar hızlarının 5 ile 6 m/s arasında değiştiğini ve ortalama güç yoğunluğunu ise 244.65 W/m^2 olarak hesaplamışlardır. Dündar [31] Bandırma, Bodrum, Bozcaada ve Çeşme yörelerinin rüzgar potansiyellerini belirlemek için WASP paket programını kullanmışlar ve rüzgar potansiyeli değerlerini Bodrum için 1175 W/m^2 , Bozcaada için 529 W/m^2 ve Çeşme için 481 W/m^2 olarak hesaplamışlardır. Toklu [32] Elazığ şehrinin rüzgar karakteristiklerini belirlemek için bir çalışma yaparak bölgedeki rüzgar tipleri, rüzgar hızları ve yönleri gibi parametreleri belirlemiş ve rüzgar potansiyelini hesaplamış ve rüzgar gücü yoğunluğunun 9 W/m^2 ile 54 W/m^2 arasında değiştiğini hesaplamıştır. Ayrıca bir rüzgar türbini tasarımı da yapmıştır. Buna ek olarak benzer birçok çalışma da Kütahya ve Bilecik [33], Kayseri [34] ve Sivas [35] için yapılmıştır.

Özgener [36] Celal Bayar Üniversitesi Muradiye Kampüsü için bir rüzgar potansiyeli değerlendirme çalışması yapmıştır. Rüzgar dataları 2006 ve 2007 yılları arasında toplanmış ve elde edilen verilere göre bu bölgeye bir rüzgar türbini kurulmasının %14.1 kapasite faktörü olması nedeniyle ekonomik olmayacağı gözlenmiştir. Köse [37] ve Köse vd. [38] Kütahya Dumlupınar Üniversitesi kampüsü için kendi kurdukları rüzgar gözlem istasyonu vasıtasıyla bir rüzgar potansiyeli değerlendirmesi yapmışlardır. Çelik [39] İskenderun bölgesinin rüzgar potansiyel analizi yapmış ve bu analiz için 1 yıl

boyunca saatlik olarak ölçülmüş rüzgar dataları yardımıyla Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonlarını kullanmıştır. Bu çalışmada maksimum rüzgar hızlarının Haziran ayı için 3.38 m/s ve Temmuz ayı için 3.35 m/s olduğu gözlenmiş ve bu verilerin kullanılmasıyla Weibull dağılım fonksiyonunun Rayleigh dağılım fonksiyonundan daha iyi sonuçlar verdiği sonucuna ulaşılmıştır. Bir başka çalışmada Çelik [9] İskenderun bölgesinde ekonomik olarak uygun olan 0.6 ile 500 kW arasındaki nominal güçlere sahip rüzgar türbinlerinin elektrik maliyet analizlerini yapmış ve 500 kW güce sahip olan bir rüzgar türbininin elektrik maliyetinin \$0.15/kWh olacağını hesaplamıştır.

Özerdem ve Türkeli [40] İzmir Teknoloji Enstitüsü kampüsü için rüzgar yönü, türbülans yoğunluğu, rüzgar hızı gibi rüzgar karakteristiklerini incelemişler ve bu rüzgar karakteristiklerine uygun olacak 600 ve 1500 kW'lık rüzgar türbinleri için en uygun türbin sistemini belirlemişlerdir. Özerdem vd. [41] İzmir'deki bir rüzgar çiftliği için hem teknik hem de ekonomik bir fizibilite çalışması yaparak kWh başına maliyet ve geri ödeme değerlerini belirlemiştir.

Kocatepe vd. [42] Türkiye'de 10.2 MW güce sahip Bandırma, Balıkesir ve 30 MW güce sahip Bozcaada, Çanakkale bölgelerinde bulunan iki farklı rüzgar çiftliği için bir güç kalite analizi yapmışlardır. Bu analizde titreşim, salınım ve güç kalitesi incelenmiş ve bu rüzgar santrallerinin iletim şebekelerine orta seviyelerde negatif bir etki yaptıkları bulunmuştur. Mutlu vd. [43] Alaçatı bölgesinde bulunan bir rüzgar çiftliği için güç kalite analizi yapmışlardır. Rüzgar çiftliğinin güç kalitesini değerlendirmek için bu çiftliğin küçük bir modelini laboratuvar ortamında incelemişlerdir. Eskin vd. [44] Gökçeada bölgesinde bulunan Uğurlu, Çınaraltı, Aydıncık ve ulusal havacılık istasyonu için rüzgar potansiyelini değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada Gökçeada'nın rüzgar türbin sistemi kurulması için yeterli rüzgar potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir. Uçar ve

Balo [45] Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonlarını kullanarak Uludağ bölgesinin rüzgar potansiyeli değerlendirmesini yaparak maliyet analizlerini çıkartmışlardır. Çalışmada bölgenin 7.08 m/s ortalama rüzgar hızı hesaplanmış ve maliyetlerin 0.255 ile 0.306 \$/kWh arasında değiştiği gözlenmiştir. Uçar ve Balo [46] Türkiye'nin sahil bölgelerindeki rüzgar gücü potansiyelini hesaplamışlar ve her bölge için ortalama rüzgar hızı ve yoğunluğunu bularak 600 kW, 1500 kW, 2000 kW, 2500 kW güçlerinde rüzgar türbinleri için kapasite faktörlerini hesaplamışlardır. Önat ve Ersöz [47] Samandağ, Amasra ve Güney bölgelerinin rüzgar potansiyelini incelemişler ve buradaki rüzgar hızlarını elde etmek için ANFIS modelini kullanmışlardır. Bu çalışmaya göre seçilen bu bölgelerin rüzgar enerjisi açısından çok uygun bölgeler olduğu görülmüştür.

Gökçek vd. [48,49] Marmara bölgesinde bulunan Kırklareli şehri için bir rüzgar enerji potansiyel değerlendirmesi ve enerji maliyet analizi yapmışlardır. Çalışmalarında Kırklareli'nin yeterli rüzgar potansiyeline sahip olduğu ve seçmiş oldukları 2300 kW güce sahip rüzgar türbininin yıllık olarak iyi miktarda enerji üretebileceği ve 700 \$/kW spesifik maliyet için kWh saat başına elektrik enerji maliyetinin 5.54 cent olacağı hesaplanmıştır. Genç ve Gökçek [50] ve Gökçek ve Genç [51] İç Anadolu bölgesi için rüzgar potansiyeli ve bu bölgede kurulacak olan rüzgar enerji dönüşüm sistemleri için elektrik üretimi ve maliyetleri üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışma sonucunda seçilen bölgeler içerisinde Pınarbaşı yöresinin göze çarpan şekilde rüzgar enerji kullanımı için yeterli miktarda rüzgar potansiyeline sahip olduğu görülmüştür. Buna ek olarak 150 kW kapasiteye sahip olan rüzgar türbini sisteminin maksimum enerji çıkışının 30m yükseklikte 121 MWh/yıl olacağını ve maliyetinin 0.29 \$/kWh olacağı hesaplanmıştır.

Jowder [52], Bahreyn için 2003 ve 2005 yılları arasında ölçülmüş rüzgar değerlerini kullanarak bir rüzgar analizi yapmış ve 30 m – 60 m yükseklikler için farklı rüzgar

türbinleri için kapasite faktörlerini değerlendirmiştir. Fyrippis et al. [53] Yunanistan'ın Naxos adası için bir rüzgar enerji potansiyeli değerlendirmesi yapmışlar ve bölgenin ortalama yıllık rüzgar hızını 7.4 m/s ve ortalama güç yoğunluğunu ise 420 W/m² olarak hesaplamışlardır. Chang [54] Weibull parametrelerini belirlemek için kullanılan altı farklı metodun karşılaştırmasını yapmış ve maksimum olasılık metodunun daha doğru sonuçlar ortaya çıkardığı sonucuna varmıştır. Rehman et al. [55] Suudi Arabistan için bir rüzgar çalışması yapmış ve rüzgar dağılımı için Weibull parametrelerini belirleyerek şekil parametresinin 1.7 ve 2.7 arasında olduğunu, ölçek parametresinin de 3 ile 6 arasında olduğunu hesaplamıştır. Ilinca et al. [56] Quebec, Kanada ili için bir rüzgar değerlendirmesi yaparak bölge için 35 farklı yerde rüzgar çalışması yapmış ve bu bölgenin iyi bir rüzgar potansiyeline sahip olduğunu belirtmiştir. Keyhani et al. [57] İran'ın başkenti Tahran için bir rüzgar potansiyeli çalışması yapmış ve ölçek ve şekil parametrelerini hesaplamışlar ve bölgenin geniş ölçekli bir rüzgar enerji sistemi için uygun olmadığını belirlemişlerdir. Dahmouni et al. [58] Tunus için bir rüzgar çalışması yaparak ortalama mevsimsel rüzgar hızları, rüzgar güç yoğunlukları ve rüzgar hızı dağılımlarını belirlemişlerdir. Bu şekilde dünyanın birçok yerinde Nijerya [59], Mısır [60], Kanada [61], Suriye [62] örnek olmak üzere rüzgar potansiyeli çalışmaları yapılmıştır.

3. BÖLÜM

HİDROJEN ENERJİSİ

3.1. Hidrojen

Dünya çapındaki enerji ihtiyacı alarm verici bir oranda artmaktadır. Avrupa “Dünya Enerji Teknolojisi ve İklim Politikası Kurulu (WETO) ” dünya birincil enerji büyüme oranını 2000-2030 yılları için %1.8 olarak tahmin etmektedir. Artan enerji ihtiyacının büyük miktarı sera etkisi yapan ve zararlı emisyonlar yayan fosil kaynaklardan karşılanmaktadır. Bunların rezervleri tükenmek üzere fiyatları ve hızlı bir şekilde artmaktadır. Şu anda gelişmekte olan ülkelerin kişi başına yaydığı CO₂ miktarı sanayi ülkelerinin %20’si kadardır. Gelişmekte olan ülkeler için bu oran hızlı bir şekilde artmaktadır. 2030 yılında gelişmekte olan ülkelere yayılan CO₂ emisyonları dünya CO₂ emisyonunun yarısından fazlasını oluşturacaktır. Bunu engellemek için sanayi ülkelerinin yeni enerji sistemleri geliştirilmesine öncülük etmeleri gerekmektedir.

Enerji güvenliği önemli bir sorundur. Özellikle ham petrol olmak üzere fosil yakıtlar dünyanın sadece belirli bölgeleriyle sınırlanmış ve bunların temin edilmesi politik, ekonomik ve ekolojik faktörler ile kontrol edilmektedir. Bunun yerine yakıt üretimi, iletim ve dağıtım, enerji dönüşümü, enerji ekipmanları üreticilerine ve son kullanıcıya etkisini içerecek şekilde tüm enerji yaşam döngüsü düşünülerek hem enerji tedarigi hem de ihtiyacın karşılanması konusunda mantıklı ve uygulanabilir bir enerji stratejisi gerekmektedir. Uzun vadede bir hidrojen temelli ekonomi tüm bu sektörlerde etkili olacaktır.

Teknolojik gelişmeler ışığında taşıt ve donanım üreticileri, ulaştırma kuruluşları, enerji endüstrisi ve hatta ev halkları ciddi bir şekilde alternatif enerji kaynakları ve yakıtlarına ve daha verimli ve temiz teknolojilere –özellikle hidrojen ve yakıt pillerine- odaklanmış durumdadır.

Dünya nüfusunun, yüksek yaşam standartları ve daha iyi hava kalitesi ihtiyacının artması nedeniyle, geleceğin enerji ihtiyacının belirgin bir şekilde artacağı düşünülmektedir. Bu ihtiyacı karşılamak büyük çaba gerektirmektedir. Günümüzde dünya ulaşım ve ısınma (birincil enerji ihtiyacının 3'te 2'sini kapsar) enerji ihtiyacının çoğu petrol ve doğal gazdan karşılanmaktadır. Bu iki yakıt genel olarak sıvı ve gazların taşınmasının kolaylığı nedeniyle tercih edilmektedir. Maalesef, ulaşım ve ısınma için hidrokarbon yakıtların yanması tüm sera gazı emisyonları ve hava kirliliği emisyonlarının yarısından fazlasını oluşturur. Bu nedenle günümüz dünyası alternatif yakıtların geliştirilmesi zorunluluğu ile yüz yüzedir. Geçtiğimiz 40 yılda, çevrebilimciler ve bazı endüstriyel organizasyonlar hava kirliliği ve global ısınma problemlerinin çözümü olarak hidrojen yakıtını desteklemiştir. İdeal bir yakıt için gerekli olan kriterler, tükenmez olması, temiz olması, kolay elde edilmesidir (ve yabancı kontrol bağımsızlığı). Hidrojen tüm bu özellikleri sağlamaktadır ve hem ulaşım hem de ısınma uygulamaları için benzin, petrol, doğal gaz ve diğer yakıtlara karşı çevre dostu bir değişim olarak tüm dünya genelinde değerlendirilmekte ve destek verilmektedir.

Elektriğe benzer olarak hidrojen de yüksek verimli ve kullanımında sifıra yakın emisyon değerine sahip yüksek kaliteli bir enerji taşıyıcısıdır. Hidrojenin ulaşım, ısınma ve güç üretimi için kullanılarak şimdiki yakıtların yerine geçebileceği teknik olarak kanıtlanmıştır. Hidrojen, çeşitli malzemelerden başlayarak hem yenilenebilir hem de yenilenemeyen kaynaklardan üretilmeye kadar geniş ve farklı üretim metotlarına sahiptir.

3.2. Hidrojenin Fiziksel Özellikleri

Hidrojen atomu, iki yaygın izotopu bulunan ve sadece bir proton ve bir elektron içeren en hafif elementtir. Hidrojen atomları diğer çoğu molekülden daha küçük boyuta sahip H_2 molekülleri şeklinde bulunurlar. Moleküler formda hidrojen renksiz, kokusuz, tatsız ve havadan 14 kat daha hafif ve diğer herhangi bir gazdan daha hızlı yayılan bir

yapıdadır. Soğutmada hidrojen sıvı halde $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ve katı halde $-259\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de yoğunlaşır. Hidrojenin fiziksel özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Hidrojenin yoğunluğu 0.09 kg/m^3 'tür. Bu nedenle bilinen en hafif maddedir. Katı metalik hidrojen diğer katı elementlerden daha yüksek elektriksel iletkenliğe sahiptir. Ayrıca gaz formundaki hidrojen en yüksek ısı kapasitesine sahip elementlerden biridir (14.4 kJ/kgK).

Tablo 3.1. Hidrojenin Fiziksel Özellikleri

Özellik	Değer
Moleküler ağırlık	2.01594
$0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 1 atm.'de gaz halinin yoğunluğu	0.08987 kg/m^3
$-259\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de katı halinin yoğunluğu	858 kg/m^3
$-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de sıvı halinin yoğunluğu	708 kg/m^3
Erime sıcaklığı	$-259\text{ }^{\circ}\text{C}$
1 atm.'de kaynama sıcaklığı	$-253\text{ }^{\circ}\text{C}$
Kritik sıcaklık	$-240\text{ }^{\circ}\text{C}$
Kritik basınç	12.8 atm.
Kritik yoğunluk	31.2 kg/m^3
$-259\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de birleşme ısısı	58 kJ/kg
$-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de buharlaşma ısısı	447 kJ/kg
$25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de termal iletkenliği	$0.019\text{ kJ/(ms }^{\circ}\text{C)}$
$25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de viskozitesi	0.00892 sentipoise
Gaz halinin $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki ısı kapasitesi (C_p)	$14.3\text{ kJ/(kg}^{\circ}\text{C)}$
Sıvı halinin $-256\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki ısı kapasitesi (C_p)	$8.1\text{ kJ/(kg}^{\circ}\text{C)}$
Katı halinin $-259.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki ısı kapasitesi (C_p)	$2.63\text{ kJ/(kg}^{\circ}\text{C)}$

3.3. Hidrojenin kimyasal özellikleri

Normal sıcaklıklarda hidrojen, bazı etkilerle aktive edilmediği sürece nispeten reaktiftir. Aksine hidrojen atomu kimyasal olarak çok reaktiftir ve bu nedenle doğada kimyasal olarak serbest halde bulunmaz. Aslında moleküler hidrojenden atomik hidrojen elde etmek için çok yüksek sıcaklıklara gerek duyulmaktadır. Doğada hidrojenin büyük kısmı ya oksijenle ya da karbon atomlarıyla bileşik haldedir. Bu nedenle doğal bileşiklerden hidrojen elde etmek için enerji harcamak gerekir. Bu nedenle hidrojen bir

enerji taşıyıcısı olarak düşünölmek zorundadır, bu birincil enerji kaynaklarından enerji iletimi ve depolanması anlamına gelmektedir.

Atomik hidrojen oda sıcaklığında bile güçlü bir indirgen maddedir. Örneğin gümüş, bakır, kurşun, bizmut ve civa gibi birçok metalin oksitleri ve kloritleriyle serbest metal üretmek için reaksiyona girer. Nitratlar, nitritler ve sodyum ve potasyumun siyanitleri gibi bazı tuzları indirger. Hem metal hem de ametal birçok elementle NH_3 , NaH , KH ve PH_3 gibi hidritleri üretmek için reaksiyona girer. Sülfür bir dizi hidrit oluşturur, bunların en basiti H_2S 'tir. Oksijenle birleşerek atomik hidrojen, hidrojen peroksidi (H_2O_2) oluşturur. Organik bileşiklerle reaksiyona girerek karmaşık yapıdaki ürünleri oluşturur; örneğin etilenle reaksiyonunda C_2H_6 ve C_4H_{10} bieşiklerini oluşturur. Hidrojen nitrous oksit ve halojenler (özellikle florin ve klorin) ve doymamış hidrokarbonlar (asetilen gibi) gibi oksitleyicilerle yoğun egzotermik ısı ile şiddetli bir şekilde reaksiyona girer. Hidrojen ya yanma ya da elektrokimyasal dönüşüm prosesi ile enerji üretmek için reaksiyona girdiğinde, reaksiyon sonucunda su buharı oluşur. Oda sıcaklığında bu reaksiyon ölçülemeyecek kadar küçüktür, fakat platinyum veya elektrik kıvılcımı gibi katalizörlerle hızlandırılabilir.

Güvenlik bakış açısıyla, hidrojenin diğer konvansiyonel yakıtlarla bazı önemli özellikleri aşağıda verilmiştir:

- *Difüzyon:* Hidrojen havada diğer gaz yapısındaki yakıtlardan çok daha hızlı bir şekilde difüze olur. Havada $0.61 \text{ cm}^2/\text{s}$ difüzyon katsayısı ile hidrojenin hızlı yayılım oranı en büyük güvenlik özelliğine sahiptir.
- *Uçuculuk:* Hidrojen havada, metandan (normal şartlarda yoğunluğu 1.32 kg/m^3), propandan (4.23 kg/m^3) ve benzin buharından (5.82 kg/m^3) daha hızlı şekilde yükselir.
- *Renk, koku, tat ve toksiklik:* Hidrojen metan gibi renksiz, kokusuz, tatsız ve toksik olmayan bir yapıya sahiptir.
- *Yanıcılık:* Hidrojenin yanıcılığı konsantrasyon seviyesinin bir fonksiyonudur ve metan ya da diğer yakıtlardan daha fazladır. Hidrojen düşük görünürlükte alevle yanar. Hidrojenin hava, oksijen veya diğer oksitleyicilerle olan karışımlarının yanıcılık limitleri tutuşma enerjisi, sıcaklık, basınç, seyreltici varlığı, boyut ve ekipmanların konfigürasyonu, tesis veya aparatlar gibi özelliklere bağlıdır. Bir

karışım ya konsantrasyon seviyesini kendi bileşenleri ile ya alt yanıcılık limitinin aşağısına çekmek için ya da üst yanıcılık limitinin üzerine çıkarmak için seyreltilmiş olabilir. Hidrojenin oda koşullarında havadaki yanma limiti %4-75, metanın % 4.3-15 hacim ve benzinin % 1.4-7.6 hacim'dir.

- *Tutuşma enerjisi:* Konsantrasyonu yanma aralığı içerisinde olduğunda hidrojenin benzin için olan 0.24 mJ ya da metanın 0.28 mJ olan tutuşma enerjilerine karşılık olarak 0.02 mJ olan tutuşma enerjisinin çok küçük olması nedeniyle çok küçük bir miktarda enerji ile tutuşabilir.
- *Patlama seviyesi:* Hidrojen sınırlandırıldığı zaman geniş bir konsantrasyon aralığı içerisinde patlayıcıdır. Ancak sınırlandırılmadığı zaman diğer geleneksel yakıtlar gibi patlaması çok zordur.
- *Alev hızı:* Hidrojen diğer yakıtlardan daha hızlı bir alev hızına sahiptir. Benzin buharı 0.42 m/s, metan 0.38 m/s, hidrojen 0.38 m/s'dir.
- *Alev hızı:* Hidrojen-hava alevi metan-hava alevinden daha sıcaktır ve stokiyometrik şartlarda benzinden daha soğuktur (metan için 1917 °C ve benzin için 2307 °C karşılık olarak alev sıcaklığı 2207 °C'dir) [63].

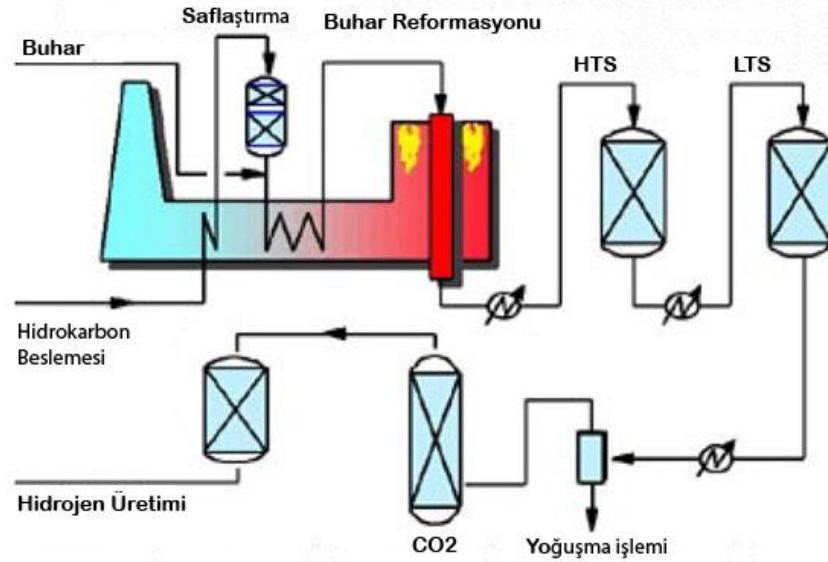
3.4. Hidrojen üretim yöntemleri

Daha önce belirtildiği gibi hidrojen doğada saf halde değil, bileşik halinde bulunmaktadır. Bu yüzden hidrojenin kullanılması için ilk olarak ayrıştırılması gerekmektedir. Bu nedenle birçok hidrojen ayrıştırma yöntemi bulunmaktadır. Şu anda üretilen hidrojenin büyük bir kısmı fosil kaynaklar yardımıyla yapılmaktadır. Fosil kaynakların yakın bir gelecekte tükeneceği öngörüldüğünden, hidrojenin yenilenebilir enerji kaynakları vasıtasıyla üretilmesi konusu üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

Günümüzde hidrojen üretimi geniş ve büyümekte olan bir endüstridir. Global olarak 2004 yılında yaklaşık 170 milyon ton petrole karşılık gelen 50 milyon ton hidrojen üretilmiştir. Ve bu üretim her yıl %10 civarında büyümektedir. 2005 yılındaki üretilmiş hidrojenin ekonomik değeri yaklaşık yılda 135 milyar dolar civarındadır. Şimdiki küresel hidrojen üretiminin %30'u doğal gazdan, %18'i kömürden ve %4'ü de elektrolizden olmaktadır [64].

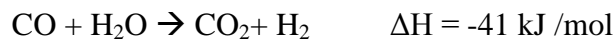
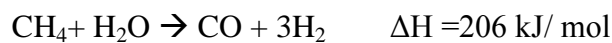
3.4.1. Buhar Metan Reformasyonu ile Hidrojen Üretimi

Günümüzde hidrojen yaygın olarak buhar metan reformasyonu adı verilen bir yöntemle üretilmektedir. Bu yöntem diğer hidrojen üretim yöntemlerine göre daha ucuz bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem iki aşamalı olarak gerçekleştirilir. İlk aşamada metan gazı, hidrojen (H₂) ve karbonmonoksitten (CO) oluşan bir sentez gazı oluşturmak için yaklaşık 800 ile 900 °C buhara tabi tutularak bir nikel (Ni) katalizör ile reaksiyona girer. İkinci aşamada ise birinci aşamada oluşan CO, su (H₂O) ile birleşerek hidrojen ve CO₂ oluşturur.

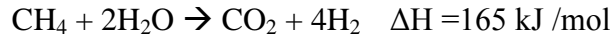


Şekil 3.2. Metan buhar reformasyonu [65].

Bu hidrojen üretim metodunda aşağıdaki reaksiyonlar gerçekleştirilerek hidrojen üretimi yapılmaktadır.



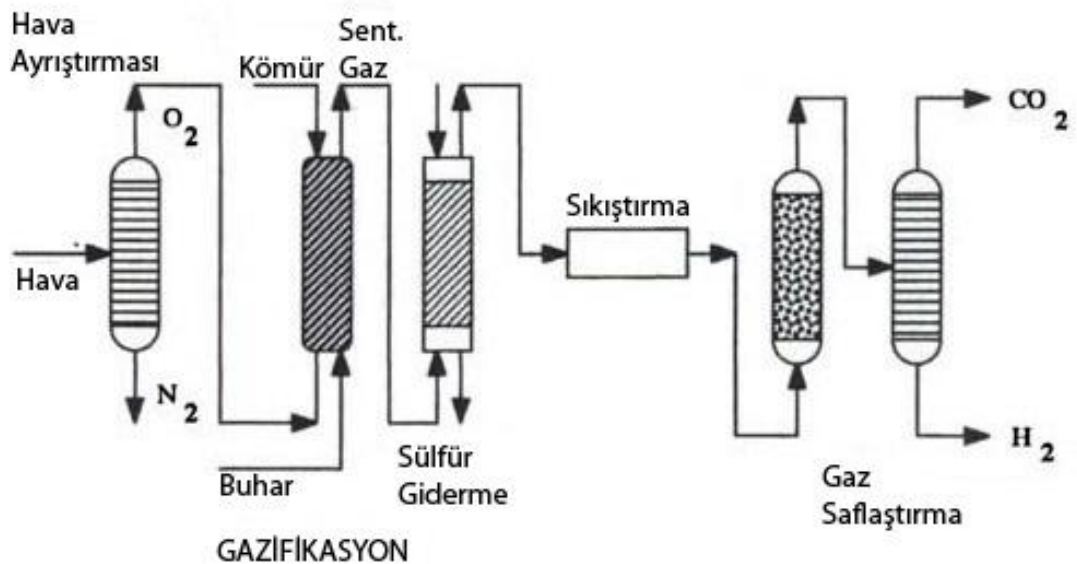
Toplam reaksiyon:



Bu yöntemde %70 verimle hidrojen üretimi yapılabilmektedir. Fakat yüksek sıcaklıklara çıkılması gerekmesi ve üretim sırasında doğal gaz gibi bir fosil kaynaklı yakıt kullanımına gerek duyması nedeniyle, ayrıca işlem sonucunda çevre kirliliğine neden olduğu bilinen karbondioksit ortaya çıkması nedeniyle temiz bir yöntem değildir.

3.4.2. Kömürün Gazifikasyonu ile Hidrojen Üretimi

Diğer bir hidrojen üretim metodu, kömürün gazifikasyonu (gazlaştırılması) metodudur. Bu yöntemde toz haline getirilmiş kömür, yüksek basınç altında yaklaşık 900 °C sıcaklığa çıkarılarak oksijen ve buhara tabi tutularak oksidasyona uğratılır. Bu esnada kömürden karbon molekülleri ayrışmaya başlayarak CO, H₂ ve diğer gaz bileşenlerinin oluşmasını sağlayan reaksiyonlarda gerçekleşmeye başlar. Bu yöntemde üretilen hidrojen miktarı buhar metan reformasyonu metodunda üretilenden daha fazla olmasına karşın, açığa çıkan CO₂ miktarı da daha fazla olduğu için bu üretim metodu da temiz bir hidrojen üretim metodu değildir.



Şekil 3.3. Kömürün gazlaştırılması işlemi [66].

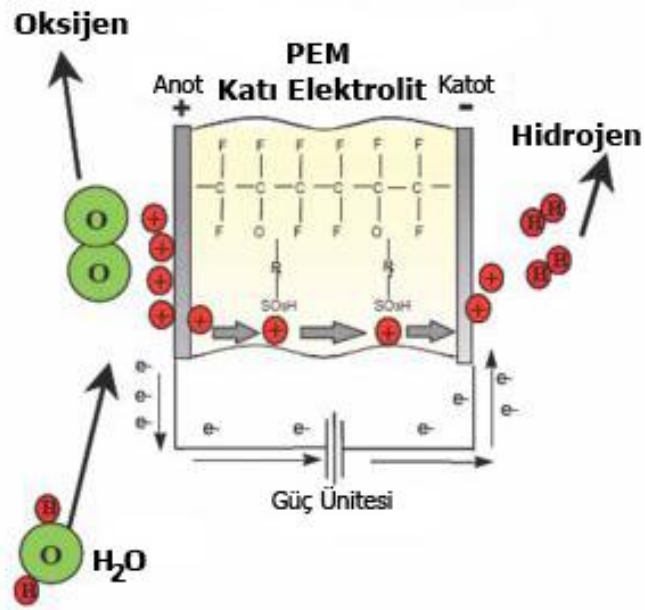
3.4.3. Elektroliz Yoluyla Hidrojen Üretimi

Elektroliz işlemi, suyun içerisine doğru akım gönderilmesi yardımıyla hidrojen ve oksijene ayrılması işlemidir ve bu en basit hidrojen üretim yöntemidir.

Suyu hidrojen ve oksijen moleküllerine ayırmak için elektrolizörler kullanılmaktadır. En gelişmiş iki elektrolizör tipi vardır: Alkalın elektrolizörler ve PEM elektrolizörler. Alkalın elektrolizörler endüstride en sık kullanılan elektrolizörlerdir. Özellikle yakıt hücresi uygulamalarında korozif elektrolit buharı nedeniyle genellikle fazladan saflaştırma üniteleri gerektirmesine rağmen %99 saflıkta hidrojen çıkışı vardır. Genel olarak sıvı elektrolit olarak ağırlıkça %25-30 potasyum hidroksit çözeltisi kullanılır. Bu elektrolizör ile hidrojen üretimi verimi %80'dir. Bu elektrolizörün dezavantajı yüksek sıcaklıklarda sıvı elektrolitin yüksek korozif etkisi olması ve bunun sonucu olarak düşük elektrolizör ömrüne sahip olmasıdır [67].

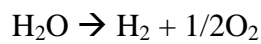
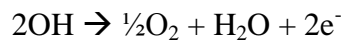
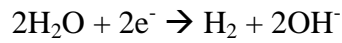
PEM elektrolizörler üzerine birçok araştırma ve geliştirme yapılmış olmasına rağmen membranın yüksek fiyatı, yüksek saflıkta su gerektirmesi ve yapısal malzemelerin yüksek fiyatları nedeniyle bu elektrolizörlerin kullanımı şu an için sınırlanmaktadır. Fakat bu yüksek maliyetlere karşın PEM elektrolizörlerin birçok avantajları bulunmaktadır. Bu elektrolizörler %99.999 saflıkta hidrojen ve oksijen üretimi yapmaktadır. Buna ek olarak alkalın elektrolizörler için gerekli olan saflaştırma işlemleri yapılmaksızın üretilen hidrojen yakıt hücrelerinde kullanılabilir. PEM elektrolizörleri 300 bar basınca kadar çalışabilmektedir. Yapılan çalışmalarda en verimli elektroliz işleminin 80°C'de, 1.556 hücre voltajı ve 1 A/cm² akım yoğunluğunda %95.1 verimle yapıldığı rapor edilmiştir. Bir PEM elektrolizörün çalışma prensibi Şekil 3.4'te şematik olarak gösterilmiştir [67].

Şekil 3.4'ten görüldüğü gibi bir PEM elektrolizör, bir anot ve katot içerisine yerleştirilmiş katı elektrolitten oluşmaktadır. Elektrolizörün anot kısmına gönderilen su içerisindeki hidrojen atomları, anot üzerinden geçerken ayrılarak, oksijen anot kısmından dışarı verilir, katı elektrolitin içinden geçen hidrojen ise katot kısmından dışarı verilerek hidrojen üretimi tamamlanmış olur.



Şekil 3.4. Bir PEM elektrolizörün çalışma prensibi.

Hidrojen üretimi sırasında aşağıdaki reaksiyonlar gerçekleşir.

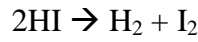
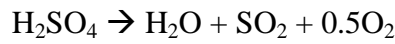
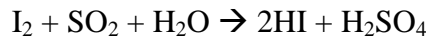


Elektroliz yoluyla hidrojen üretimi için gerekli olan enerjinin yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmesi fikri, son zamanlarda çok popüler bir konu haline gelmiştir. PEM elektrolizörlerin yenilenebilir enerji kaynaklarına entegrasyonunun kolaylığı, düşük çalışma sıcaklığı ve yüksek saflıkta hidrojen üretimine imkân sağlaması nedeniyle PEM elektrolizörler rüzgâr, güneş santralleri gibi yenilenebilir enerji santralleri içerisinde kullanılmaya başlanmıştır.

3.4.4. Termokimyasal Yöntemle Hidrojen Üretimi

Termokimyasal olarak suyun ayrıştırılması işlemi hidrojen üretimi için kullanılan ve içerisinde endotermik ve ekzotermik reaksiyonlar barındıran bir yöntemdir [58]. Bu yöntem geniş ölçekli hidrojen üretimi yapılmasına olanak sağlayan bir yöntem olup iki

veya daha fazla ara bileşiklerin kapalı bir döngü içerisinde bazı kimyasal ve fiziksel işlemler sonucunda suyun hidrojen ve oksijenine ayrıştırılması olarak tanımlanmaktadır [68]. Literatürde 200'ün üzerinde termokimyasal çevrim bulunduğu belirtilmiştir [69]. Bunlardan birkaçı, bakır klorin (Cu-Cl), seryum klorin (Ce-Cl), bakır sülfat (Cu-SO₄) ve iyodin sülfür (I-S) olarak sıralanabilir. Örnek olarak bir I-S termokimyasal çevriminde hidrojen üretimi sırasında aşağıdaki reaksiyonlar gerçekleşir:



Reaksiyonlardan da görüleceği gibi I₂ ve SO₂ bir döngü şeklinde kullanılıp tekrar üretilmektedir. Bu şekilde kapalı bir döngü içerisinde bu reaksiyonlar gerçekleştirilerek hidrojen üretimi gerçekleştirilmektedir. Termokimyasal çevrimlerde yüksek sıcaklıklara ulaşılması gerekmektedir. Yukarıda verilen iyodin sülfür termokimyasal çevriminde ikinci reaksiyon için 900 ve 1000 °C arasında bir sıcaklık gerekmektedir [70]. Bu hidrojen üretim yöntemi ile buhar metan reformasyonunda olduğu gibi çevreye zararlı emisyonlar salınmaması nedeniyle temiz bir hidrojen üretimi yapmak mümkündür fakat belirtildiği gibi bu yöntemle hidrojen üretimi için yüksek sıcaklıklar gerekmektedir. Bu yöntemin nükleer reaktörlerde kullanılması ile geniş ölçekte hidrojen üretimi yapılabilmektedir.

3.5. Hidrojenin Depolanması ve Taşınması

Hidrojenin üretilmesi kadar depolanması da önemli bir konudur. Hidrojenin güvenilir ve etkin bir şekilde depolanması için birçok çalışma ve yöntem geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam edilmektedir.

Genel olarak 3 ana hidrojen depolama yöntemi bulunmaktadır. Bunlar;

- Fiziksel olarak depolama (sıkıştırma, metal hidrit, kriyojenik sıvı ve karbon nanofiberler)
- Kimyasal olarak depolama (sodyum borohidrit, metanol, amonyak ve alkali metal hidritler)

- Yeni geliştirilen metodlar (amminex tabletler, solar çinko üretimi, alkali metal hidrit karışımı vb.)

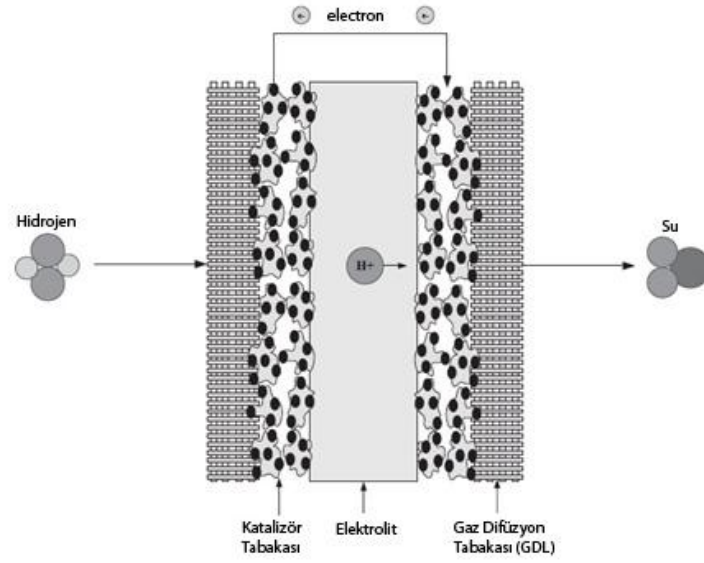
Günümüzde taşıt uygulamaları, küçük ve orta ölçekli uygulamalar için volumetrik ve gravimetrik olarak verimsiz olmalarına karşın kullanımının basit olması nedeniyle basınçlı tanklar tercih edilmektedir. Bu uygulamalar için ayrıca sıvılaştırılmış hidrojen kullanımı da yapılabilmektedir. Fakat hidrojenin sıkıştırılması için kullanılacak tank ve yardımcı ekipmanları gravimetrik ve volumetrik olarak verimli olmalarına karşın çok pahalı durumda olduğu için kullanımları daha sınırlıdır. Hidrojenin metal hidritlerde depolanması ise kimyasal bir reaksiyon gibi görünmesine karşın fiziksel bir depolama tekniği olup, hidrojen bir sünger tarafından emilmiş gibi absorbe edilerek depolanır fakat depolama tankları çok ağır olmaktadır [71].

3.6. Hidrojenin Kullanım Alanları

Hidrojen sanayi, evsel uygulamalar, taşıtlar, uzay endüstrisi gibi birçok yerde kullanılmaktadır. Özellikle enerji sektöründe fosil kaynaklı yakıtların zararlı emisyonlarını barındırmaması ve sınırsız bir kaynağa sahip olması nedeniyle yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanımı yaygınlaşmaya başlamış ve yakıt pillerinde kullanılmaya başlanmıştır. Hidrojeni yakıt olarak kullanan araçlar üretilmeye başlanmış ve birçok prototip ortaya konulmuştur.

Yakıt pili teknolojisinin gelişmesi ile hidrojenin yoğunlukla bu alanda kullanılması düşünülmektedir. Yakıt pilleri, elektroliz işleminin tersini gerçekleştirerek hidrojen ve oksijeni birleştirmek suretiyle elektrik ve su meydana getiren elektrokimyasal bir aygıttır.

Basit bir PEM yakıt pili Şekil 3.5'te görüldüğü gibi iki elektrot arasında yerleştirilmiş bir membrandan meydana gelir. Anot kısmından giren hidrojen gaz difüzyon tabakası üzerinden geçerken Membran Elektrot Grubu (MEA) üzerinde iyonlarına ayrılarak H^+ iyonları membran içerisinden geçerek katot tarafına geçer. Bu esnada açığa çıkan elektronlar ise devreyi dışardan tamamlayarak katot kısmına geçer. Bu elektron akımı sırasında elektrik açığa çıkar. Katot kısmına gelen elektron, H^+ iyonu ve oksijen birleşerek su meydana gelir.



Şekil 3.5. Tek hücreli bir PEM yakıt pili.

Geliştirilmiş olan bir çok yakıt pili bulunmaktadır. Bunlar PEM yakıt pilleri, Katı oksit yakıt pilleri (SOFC), Alkali Yakıt Pilleri (AFC), Fosforik Asit Yakıt Pilleri (PAFC), Erimiş karbonat yakıt pilleri (MCFC) ve doğrudan metanollü yakıt pilleri (DMFC) olarak sıralanabilir.

3.7. Hidrojen Üretimi Üzerine Yapılmış Bazı Akademik Çalışmalar

Hidrojen konusu başlı başına çok geniş bir konu olup üretimi, elektrolizör yapısı, depolanması, taşınması, yakıt pilleri ve içten yanmalı motorlarda kullanımı ve daha birçok farklı konulara ayrılmış ve bu konularda yapılmış birçok çalışma mevcut olup bu bölümde hidrojen üretimi hakkında yapılmış bazı akademik çalışmalardan bahsedilecektir.

Günümüzde hidrojen üretiminin %95'lik bir kısmı buhar reformasyonu ve kısmi oksidasyon yöntemleri ile üretilmektedir [72]. Bu kadar büyük bir kullanım alanı olduğu için bu yöntemlerdeki verimi artırmak ve daha etkin bir şekilde, çevreye olan zararlarının azaltılarak hidrojen üretimi yapmak amacıyla farklı çalışmalar yapılmaktadır. Bu bağlamda, Saxena et al. [73] buhar metan reformasyonu için sodyum hidroksit kullanarak farklı bir reaksiyon üzerine çalışmışlar ve bu metot ile katalizör kullanımı gerekliliği ve sıcaklığın azalması gibi avantajları olduğunu belirtmişlerdir.

Ding ve Alpay [74] buhar metan reformasyonunda nikel tabanlı katalizörlerin adsorbentlerle karıştırılarak daha iyi bir adsorbsiyon sağlamışlar ve metan dönüşümünde dikkate değer bir artış gözlemlemişlerdir. Barelli et al. [75] yine reaksiyonların daha verimli bir şekilde olması ve CO₂'in giderilmesi için bir sorbent kullanımını araştırmışlardır.

Hidrojen nükleer reaktörlerde yüksek miktarlarda üretim kapasitesi ile üretilebilir. Bu bağlamda Genç [76], bir füzyon reaktöründe hidrojen üretim potansiyeli araştırması yapmış ve 426 kg/s üretim potansiyeli olduğunu belirlemiştir. Özışık vd. [77] erimiş tuz füzyon üreticinin yüksek nötronik performansı ile 40 kg/s'ye kadar hidrojen üretebileceğini belirlemişlerdir.

Graf et al. [78] hibrid-sulfur termokimyasal çevrimi ile metal oksit tabanlı termokimyasal çevrim arasında bir ekonomik analiz yaparak hidrojen üretim maliyetlerini araştırmış ve hibrid-sülfür çevriminde hidrojen üretim maliyetlerinin 3.9-5.6 €/kg olurken metal oksit tabanlı çevrimde 2.1-6.8 €/kg arasında değiştiğini hesaplamışlardır. Gonzales et al. [79] hidrojen üretim amaçlı hibrit bir bakır oksit-bakır sülfat çevriminin analizini yapmışlar ve farklı metodlar kullanarak proses verimlerini hesaplamışlardır.

Atlam et al. [80] Fotovoltaik panel bağlantılı bir elektrolizör sistemi için bir optimizasyon çalışması yaparak elektrolizör boyutunu fotovoltaik panellere göre uygun hale getirmek amacıyla bir metod uygulamışlardır. Akyüz vd. [81] bir PV-elektrolizör sisteminde hidrojen üretim potansiyelini hesaplayarak PV sisteminin m²'si başına 2.97 kg hidrojen üretimi olduğunu belirlemişlerdir. Joshi et al. [82] solar termal ve PV hidrojen üretimi metodları arasında bir karşılaştırma yapmışlar ve solar termal hidrojen üretiminin ekserji verimliliğinin PV modüllere göre daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır.

4. BÖLÜM

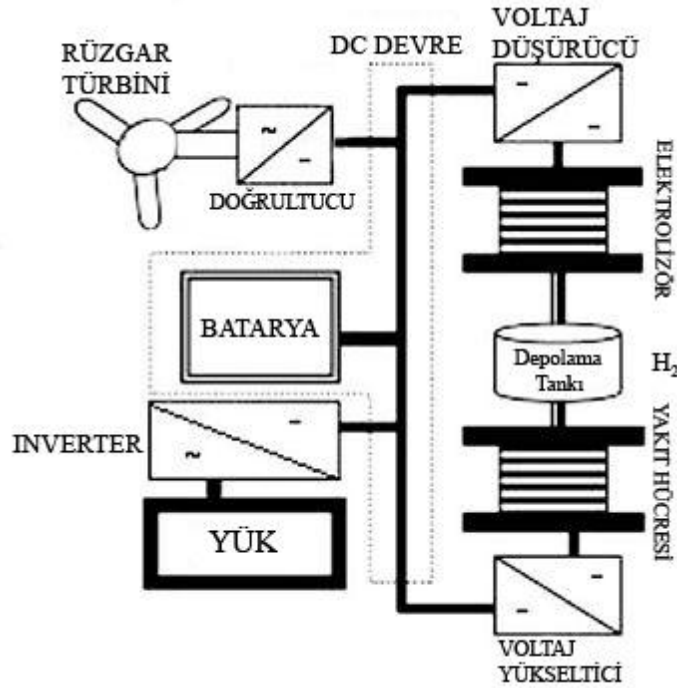
RÜZGAR-HİDROJEN HİBRİD ENERJİ SİSTEMLERİ

4.1. Rüzgar- Hidrojen Hibrid Enerji Sistemlerinin Tanımı

Rüzgar-hidrojen hibrid enerji sistemleri, rüzgar türbininden elde edilen elektrik enerjisini suyun elektrolizinde kullanarak hidrojen üretimi gerçekleştiren sistemlerdir. Bilindiği gibi rüzgar enerjisi sürekli bir enerji kaynağı olmayıp, değişken rüzgar hızları için farklı enerji miktarları söz konusudur. Bu durumda rüzgardan elde edilen enerjinin direkt olarak ihtiyaç duyulan mekana gönderilmesi durumunda, rüzgarın olmadığı zamanlarda üretilen enerji olmayacağı için mekanın enerji ihtiyacını karşılayamama gibi bir durum söz konusu olacaktır. Bu yüzden sisteme bir enerji depolayıcı eleman (batarya) veya bir elektrolizör sistemi konularak elde edilen enerjinin daha verimli bir şekilde ihtiyacı karşılaması sağlanabilmektedir. Örneğin rüzgardan elde edilen enerjinin ihtiyaçtan fazla olması durumunda elektrolizör yardımıyla hidrojen üretimi yapılarak, rüzgarın kesildiği zamanlarda elde edilen hidrojenin yakıt pillerine gönderilmesi ile enerji üretimi sağlanarak ihtiyaç duyulan mekanda kullanılması sağlanabilir.

Rüzgar ve hidrojen sistemleri genel olarak, rüzgar türbini, elektrolizör, hidrojen ve oksijen depolama tankları, yakıt hücresi, AC ve DC yükler, güç şartlandırma elemanları ve çeşitli sensörlerden oluşur. Bu sistemde, yük talebi için uzun vadeli enerji, elektrolizör yardımıyla elektrolitik hidrojen üretimi ile yapılır. Depolanmış hidrojen daha sonra yakıt hücresi yardımıyla elektrik üretiminde kullanılır.

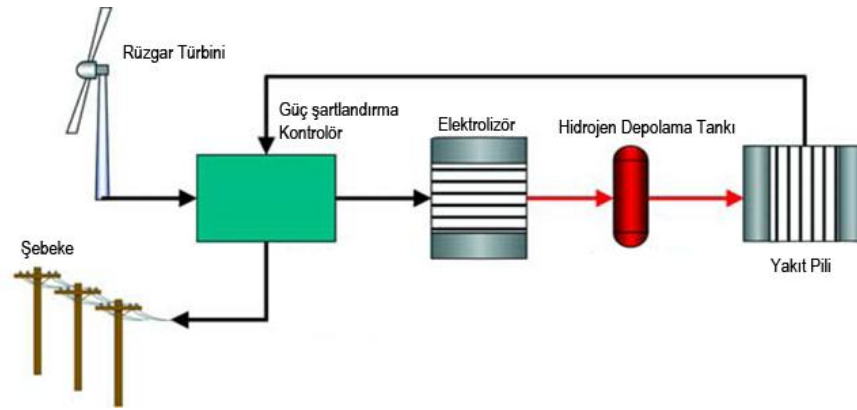
Şekil 4.1’de bir rüzgar enerjisi-hidrojen sisteminin tüm bileşenleri gösterilmiştir. Genel olarak sistem şu şekilde çalışır: Rüzgar türbininden elde edilen enerji doğrultucu gibi elemanlarla dönüştürülerek ya bataryayı şarj etmek için kullanılır ya da elektrolizör elemanına gönderilerek suyun elektroliz edilip hidrojen ve oksijenine ayrıştırılması ve elde edilen hidrojenin, hidrojen kompresörleri yardımıyla tank içerisinde depolanması ve daha sonra bu depolanan hidrojenin yakıt hücresinde kullanılması ile elektrik elde edilmesi şeklinde çalışır. Şebeke bağlantılı enerji sistemlerinde üretilen enerji, ihtiyaç fazlası olması durumunda şebekeye verilebilir.



Şekil 4.1. Rüzgar enerjisi-hidrojen sistemi genel elemanları.

Rüzgar- hidrojen enerji sistemleri şebekeden bağımsız ve şebeke bağlantılı olmak üzere iki farklı şekilde kurulabilir.

Şekil 4.2’de şebeke bağlantılı bir rüzgar-hidrojen enerji sistemi elemanları görülmektedir.

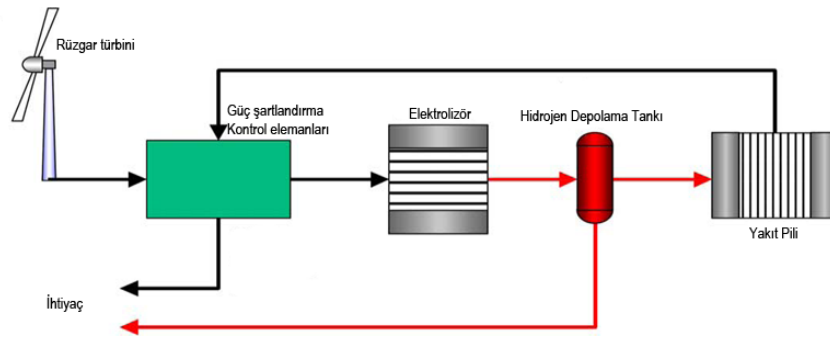


Şekil 4.2. Şebeke bağlantılı rüzgar-hidrojen sistemi [80].

Şekil 4.2’den de görüleceği gibi şebeke bağlantılı bir rüzgar-hidrojen enerji sisteminde rüzgar türbini, güç şartlandırma elemanı, elektrolizör, hidrojen tankı ve yakıt pili elemanları bulunmaktadır. Bu sistemde enerji yönetimi şu şekilde gerçekleştirilir:

- Rüzgar türbininden elde edilen enerjinin ihtiyaç duyulan enerjiden büyük olması durumunda fazla enerji elektrolizöre gönderilir.
- Elektrolizörden elde edilen hidrojen, hidrojen depolama tankına gönderilerek depolanır.
- Rüzgar türbininden elde edilen enerjinin ihtiyaç duyulan enerjiden az olması durumunda yakıt pili vasıtasıyla depolanmış hidrojen kullanılarak enerji üretilir ve mekanın enerji ihtiyacı karşılanır.
- Rüzgar türbininden enerji elde edilmiyorsa ve depolama tankında hidrojen bulunmuyorsa gereken enerji şebekeden karşılanır.
- Rüzgar türbininden elde edilen enerjinin çok az ve depolama tankında yeterli hidrojen olmayışından dolayı yakıt pilinden elde edilen enerjinin de çok az olması durumunda gereken enerji şebekeden karşılanır.

Şekil 4.3’de şebekeden bağımsız rüzgar-hidrojen enerji sistemi görülmektedir.



Şekil 4.3. Şebekeden bağımsız rüzgar-hidrojen sistemleri [80].

Bu sistemin şebeke bağlantılı sistemden tek farkı şebekeden enerji alışı-verişinde bulunmamasıdır.

4.2. Rüzgar-Hidrojen Hibrid Sistemleri Üzerine Yapılan Çalışmalar

Geer et al. [84] rüzgar enerjisi ile hidrojen üretimi ve bu hidrojenin toplu taşımacılıkta kullanılması konusunda bir fizibilite çalışması yapmışlardır. 1.5 MW rüzgar türbini ve 72 kW elektrolizör ile bir otobüs sisteminin, 252 kW'lık elektrolizör ile de üç otobüs sisteminin hidrojeninin üretilebileceği ve bunların maliyetlerinin 3.33-3.55 \$/kg ve geri ödeme süresinin de sırasıyla 5.7 ve 12 yıl olacağı hesaplanmıştır. Honnery ve Moriatry [85] gelecekteki enerji ihtiyacını karşılayabilmek amacıyla global rüzgar/hidrojen sistemi kullanımı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada yeryüzü üzerinde km^2 başına 2 MW'lık bir türbin kurulması ve buradan elektrik üretimi yapılması ve yerel hidrojen istasyonları ile bağlantılı olup hidrojen üretimi yapılması düşünülmüştür. Rüzgar türbinleri ile yıllık 516 EJ enerji üretilebileceği ve hidrojen üretimi için de 116 EJ enerji harcanacağı hesaplanmıştır. Rodriguez et al. [86] Cordoba, Ajantin bölgesi için bir rüzgar-hidrojen sistemi ve bu sistemden elde edilen hidrojenin bölgedeki taşımacılık için kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada bölgenin yıllık benzin tüketim miktarı ve maliyeti, bölgenin rüzgar karakteristikleri ve hidrojen üretim miktarı ve maliyetleri hesaplanmış ve elektrik üretim maliyetinin 50 \$/MWh'in altına inmesi durumunda taşımacılıkta hidrojen kullanımının benzin ile rekabet edebilir duruma gelebileceği sonucuna varılmıştır.

Agustin ve Lopez [87], İspanya’da kurulu 7 adet 2.5 MW güce sahip rüzgar çiftliği için bir entegre edilmiş bir hidrojen sistemi için saatlik enerji yönetimi çalışması yapmışlardır. Sistemde elde edilen hidrojen ile günün belirli saatlerinde elde edilen hidrojen yakıt pili vasıtasıyla enerjiye çevrilerek şebekeye satılmaktadır. Bu çalışma sonunda bölge için kurulacak bir rüzgar hidrojen sisteminin ekonomik olabilmesi için yakıt pilinden elde edilen enerjinin satış fiyatlarının 171 c€/kWh değerlerinde olması gerektiği hesaplanmıştır.

Bechrakis et al. [88] 10 odalı bir otel için enerji ihtiyacı hesabını yaparak bu ihtiyacı karşılayacak bir rüzgar türbini-hidrojen sistemi tasarlamışlardır. Sistemde 20 kW’lık bir rüzgar türbini kullanarak optimum elektrolizör boyutu seçimi yapmışlar ve 6 kW elektrolizör ve 10 kW yakıt pili kullanarak otelin enerji ihtiyacının rüzgarsız günlerde de karşılanabileceği sonucuna varmışlardır.

5. BÖLÜM

TEORİK ANALİZ

5.1. Rüzgar Gücü Hesabı

Rüzgardan elde edilebilecek rüzgar enerjisi, rüzgarın kinetik enerjisinin bir fonksiyonudur ve m kütle akış oranı (kg/s), V_r rüzgar hızı (m/s) olmak üzere şu şekilde ifade edilebilir:

$$P_{toplam} = (m \cdot Vr^2)/2 \quad (5.1)$$

Buradaki m, kütle akış oranı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$m = \rho \cdot A \cdot Vr \quad (5.2)$$

Burada ρ rüzgar yoğunluğu (kg/m^3) ve A rüzgarın etkidiği alan (m^2) olarak ifade edilir. Bu değer, (5.1) denkleminde yerine yazılırsa,

$$P_{toplam} = (\rho \cdot A \cdot V^3)/2 \quad (5.3)$$

şeklinde bir denklem elde edilir. (5.3) no'lu denklemden görüleceği gibi, rüzgardan elde edilecek güç, rüzgar hızının küpüyle doğru orantılıdır. Örneğin; rüzgar hızının 1 m/s'den, 2 m/s'ye artması durumunda rüzgar gücü 8 birim artacaktır.

Burada elde edilen (5.3) denklemi, rüzgardan elde edilebilecek toplam güçtür, fakat rüzgar gücünü mekanik enerjiye dönüştürme esnasında bu toplam gücün tamamı kullanılamaz. Bu durumda rüzgardan elde edilecek maksimum güç formülü devreye girmektedir. Bu formül, Denklem (5.4)'teki gibi ifade edilir:

$$P_{maks} = (8 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3)/27 \quad (5.4)$$

Denklem (5.4)'ün, Denklem (5.3)'e oranı rüzgar türbinin teorik verimini vermekte ve aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$\eta_t = P_{maks}/P_{toplama} = \frac{8}{27} \cdot 2 = \frac{16}{27} = 0.5926 \quad (5.5)$$

Elde edilen bu değere C_p güç faktörü veya Betz limiti denir ve rüzgarın toplam gücünün maksimum %59.26'sının mekanik enerjiye çevrilebileceğini ifade eder. Bu durumda rüzgar gücü hesabında aşağıdaki denklem kullanılır:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \quad (5.6)$$

5.2. Kapasite Faktörü

Kapasite faktörü (C_f), bir türbinin kapasitesinin ne kadarını kullandığını ifade eden bir terim olup, türbinin nominal gücünün, maksimum kapasitede çalışması durumunda elde edeceği güce oranı olarak tanımlanır ve aşağıdaki formül ile ifade edilir:

$$C_f = E_p / (P_n \cdot 8760) \quad (5.7)$$

Burada;

E_p : Türbinin bir yılda ürettiği enerji (kWh/y)

P_n : Türbinin nominal gücü (kW)

Denklemin payda kısmında bulunan ifade, türbinin bir yıl boyunca her saat (365x24) nominal güçte çalışması durumunu ifade etmektedir. Bu denklem, diğer bir ifade ile rüzgar türbininin bir bölgeye kurulması durumunda kapasitesinin ne kadarını kullanacağı şeklinde de tanımlanabilir.

5.3. Rüzgar Hızının Yükseklikle Değişimi Hesabı

Bölüm (5.1)'de bahsedildiği gibi rüzgardan elde edilecek güç, rüzgar hızının küpüyle doğru orantılıdır. Yükseklik arttıkça, yeryüzünden kaynaklanan sürtünme kuvvetlerinin azalması nedeniyle rüzgar hızı da artmaktadır. Bu yüzden rüzgar türbini kurulumu

sırasında, rüzgardan daha verimli bir şekilde yararlanabilmek amacıyla rüzgar türbini kule yüksekliğinin artırılması olumlu bir sonuç verecektir. Fakat meteorolojik ölçümler standart olarak 10 m yükseklikte yapıldığından bu yükseklikte elde edilen ortalama rüzgar hız değerlerinin daha yüksek bir konumda hangi değerleri alacağını hesaplamak gerekmektedir. Bu hesaplama yöntemi logaritmik sınır tabaka profili olarak adlandırılır ve aşağıdaki formül kullanılarak gerçekleştirilebilir [86].

$$v = v_0 \left(\frac{\ln(z/z_s)}{\ln(z/z_0)} \right) \quad (5.8)$$

Bu denklemde;

v : belirlenen yükseklikteki rüzgar hızı (m/s)

v_0 : hız ölçümünün yapıldığı yükseklikteki rüzgar hızı (m/s)

z : hızı hesaplanacak olan yükseklik (m)

z_0 : hız ölçümünün yapıldığı yükseklik (m)

z_s : yüzey pürüzlülük katsayısı

ifade etmektedir. z_s , yüzey pürüzlülük katsayısı farklı yeryüzü şekilleri için tablo halinde aşağıda verilmiştir:

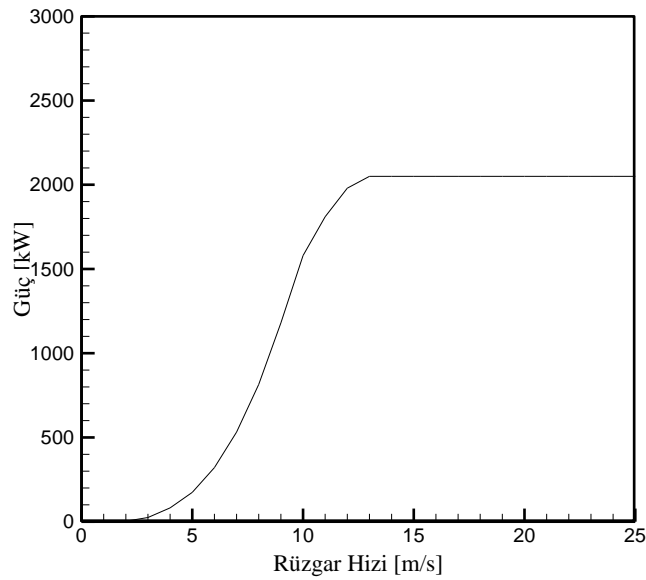
Tablo 5.1 z_s katsayısı değerleri

Yeryüzü şekli	z_s
Büyük ova, geniş çayır	0.15
Orman	0.5
Makilik arazi	0.3
Şehir içi	1.0

5.4. Farklı Rüzgar Hızları için Türbinden Üretilen Enerji Miktarı

Bir rüzgar enerjisi sisteminde kurulacak rüzgar türbinlerinin, bölgenin rüzgar potansiyeline göre hangi rüzgar hızında ne kadar enerji üretebileceği ve bu bölge için kapasite faktörlerinin ne olacağı hakkında önceden bilgi sahibi olunması gerekmektedir. Bu nedenle bölge için geçerli olan her rüzgar hızı için türbinin üreteceği enerji miktarı

ve kapasite faktörü rüzgar türbini güç eğrilerinden belirlenebilir. Bu sayede seçilen bir rüzgar türbininin bölge için uygun bir türbin olup olmadığı belirlenebilir. Türbini üreten firma, deneysel olarak belirli rüzgar hızlarında türbinin ürettiği enerji miktarlarını ölçerek bunları bir tablo veya grafik şeklinde müşterilerine sunmaktadır. Bu sayede rüzgar türbinin her rüzgar hızı için üreteceği enerji miktarı hesabı yapılabilir. Örnek olması açısından bir Enercon E-82 2000 kW rüzgar türbini için güç eğrisi Şekil 5.1’de verilmiştir.

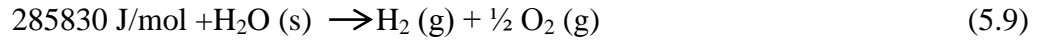


Şekil 5.1. Bir rüzgar türbini için güç eğrisi.

Şekil 5.1’den görüldüğü gibi rüzgar türbini 2 m/s rüzgar hızından itibaren enerji üretmeye başlamakta, 13 m/s hızı ve daha büyük hızlarda sabit olarak 2000 kW enerji üretmektedir. Rüzgar türbini 25 m/s üzerinde iken çalışmayı durdurmaktadır. Rüzgar türbininin enerji üretmeye başladığı hıza başlama hızı, maksimum kapasitesine çıktığı rüzgar hızına nominal hız ve enerji üretmeyi durdurduğu hıza ise durma hızı denilmektedir.

5.5. Hidrojen Üretimi Hesabı

Sudan hidrojen ayrıştırılması işlemi endotermik (ısı alan) bir işlemdir. Reaksiyonun gerçekleşmesi için reaksiyon ısı, ΔH kadar bir ısının verilmesi gerekmektedir. Elektroliz işlemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:



Düşük sıcaklıklarda suya elektrik verilmesi durumunda su hidrojen ve oksijenine ayrışır. Suyun ayrışması için iki elektrot arasındaki çalışma voltajının, minimum ayrışma voltajından büyük olması gerekmektedir. Bu durum şöyle ifade edilebilir:

$$V_H = \frac{-\Delta H}{2F} = \frac{285.84}{2 \cdot 96487} = 1.48 \text{ [V]} \quad (5.10)$$

Bu denklemde;

ΔH : hidrojenin üst ısıl değeri

F: Faraday sabiti, 96487

ifade etmektedir. Bu şu anlama gelmektedir; suyun elektroliz yoluyla hidrojen ve oksijenine ayrışması için minimum 1.48 V gerilim uygulanması gerekir [89].

Faraday kanununa göre bir elektroliz işleminde bir saatte üretilen hidrojen miktarı aşağıdaki formülle tanımlanır:

$$m_{elek} = (3600 \cdot I_{elek} \cdot N_{elek} \cdot \eta_i) / 2F \text{ [mol/h]} \quad (5.11)$$

Denklemde;

m_{elek} : hidrojen miktarı

I_{elek} : akım

N_{elek} : elektrolizör hücre sayısı

F: Faraday sabiti

η_i : akım verimi

ifade eder. 313.15 K sıcaklığındaki η_i , akım verimi aşağıdaki formülle tanımlanır:

$$\eta_i = 96.5 \exp\left(\frac{0.09}{I_{elek}} - \frac{75.5}{I_{elek}^2}\right) \quad (5.12)$$

Akım verimi genellikle %99'un üzerinde bir değere sahip olduğu için 1 olarak alınabilir.

Elektrolizör gücü, P_{elek} ;

$$P_{elek} = I_{elek} \cdot V_{elek} \cdot N_{elek} \quad (5.13)$$

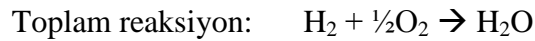
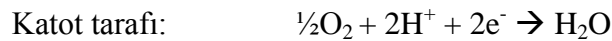
olarak ifade edilebileceğinden dolayı Denklem 5.11 elektrolizörün nominal gücüne bağlı olarak şu şekilde tekrar düzenlenebilir:

$$m_{elek} = (3600 \cdot P_{elek})/2 \cdot V_{elek} \cdot F \text{ [mol/h]} \quad (5.14)$$

Bu durumda 1 kW nominal güce sahip bir elektrolizörden bir saatte üretilecek hidrojen miktarı elektrolizör çalışma voltajı (V_{elek}) değerinin 2 olması halinde 9.33 mol/saat olacaktır [69].

5.6. Yakıt Pilinde Harcanan Hidrojen Hesabı

Daha önce belirtildiği gibi bir PEM yakıt pili anot ve katot arasına yerleştirilmiş katı bir elektrolitten oluşur. PEM yakıt pilinin çalışması sırasında sırasıyla anot ve katot kısımlarında aşağıdaki reaksiyonlar gerçekleşir:



Anot tarafından görüldüğü gibi PEM yakıt pilinin enerji üretmeye başlaması için hidrojen gerekmektedir. Bir PEM yakıt pilinde 1 kW enerji üretmek için gerekli hidrojen miktarı aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$m_{yp} = (3600 \cdot I_{yp} \cdot N_{yp})/2 \cdot F \cdot \mu_{yp} \text{ [mol/h]} \quad (5.15)$$

Bu denklemde;

m_{yp} : yakıt pili için gereken hidrojen miktarı,

I_{yp} : çıkış akımı,

N_{yp} : yakıt pili hücre sayısı,

μ_{yp} : Faraday verimi

ifade etmektedir. Bir PEM yakıt pilinin verimi (V_{yp}) yakıt pilinin voltajı olmak üzere;

$$\eta_{yp} = (\mu_{yp} \cdot V_{yp} \cdot 100) / 1.48 \quad [\%] \quad (5.16)$$

şeklinde ifade edilir.

PEM yakıt pilinin gücü, akım, voltaj ve yakıt pili hücrelerinin çarpımı olarak tanımlanır ve formülü aşağıdaki gibidir:

$$P_{yp} = I_{yp} \cdot V_{yp} \cdot N_{yp} [W] \quad (5.17)$$

Bu durumda Denklem (5.15), PEM yakıt pilinin gücüne bağlı olarak aşağıdaki şekilde düzenlenebilir [69]:

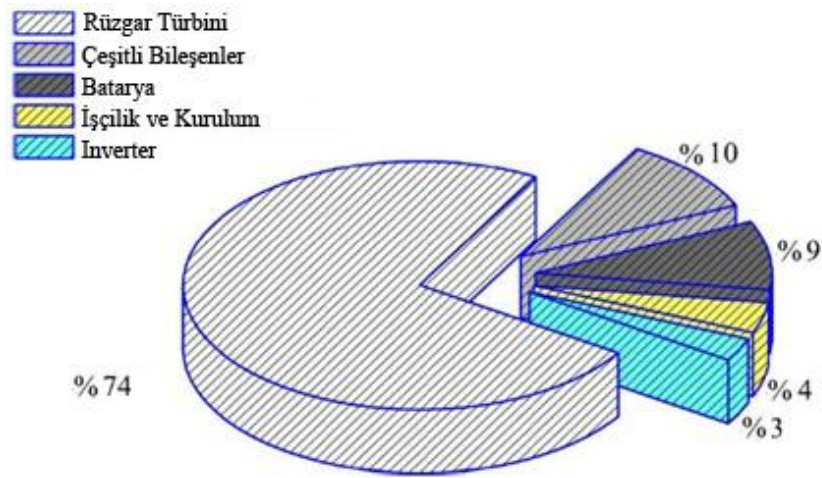
$$m_{yp} = (3600 \cdot P_{yp}) / 2 \cdot V_{yp} \cdot F \quad [mol/h] \quad (5.18)$$

5.7. Maliyet Analizi

Rüzgar-hidrojen sisteminde, rüzgar türbininden elde edilen elektrik maliyeti, hidrojen üretim maliyeti, sistemin kurulum maliyeti, işletme-bakım ve onarım maliyetleri gibi değerleri, sistem ömrü, eskalasyon oranı, iskonto oranları gibi faktörleri dikkate alarak gerçekçi bir maliyet analizi yapılmasını sağlayan kademelendirilmiş enerji maliyeti modeli kullanılmıştır. Bu tez kapsamında rüzgar enerji maliyeti, elektroliz maliyeti ve yakıt pili maliyeti adı altında 3 farklı bölüm şeklinde bir maliyet analizi yapılacaktır.

5.7.1. Rüzgar Enerjisi Maliyeti

Rüzgar enerjisi maliyeti hesaplanırken, türbinin nominal gücüne bağlı olarak yıllık enerji üretim miktarı, türbin maliyeti, yatırım maliyeti, batarya, inşaat ve kurulum maliyeti, işletme ve bakım maliyeti gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Bu faktörlerin toplam rüzgar türbini maliyetinin içerisindeki yüzdeleri şekilde verilmiştir [51].



Şekil 5.2. Bir rüzgar türbini için maliyet yüzdeleri.

Şekil 5.2'den görüldüğü gibi bir rüzgar enerjisi sisteminde toplam maliyetin yüzde 74'lük bir kısmı sadece rüzgar türbinine harcanmakta, kalan %26'lık kısım ise kurulum ve işçilik, invertör, batarya ve diğer bileşenler (çeşitli bağlantı elemanları, kablolar, vb.) tarafından harcanmaktadır.

Bu bilgiler ışığında bir rüzgar enerji sistemi için toplam maliyet hesaplanırken bu faktörlerin toplamı şeklinde bir formül yazılabilir:

$$M_{RES} = M_{RT} + M_B + M_{IK} + M_D = M_{ORES} \cdot P_N \text{ [\$]} \quad (5.19)$$

Denklemden sırasıyla M_{RES} , M_{RT} , M_B , M_{IK} , M_D , M_{ORES} ve P_N rüzgar enerji sisteminin toplam maliyeti, rüzgar türbini maliyeti, batarya maliyeti, işçilik-kurulum maliyeti, diğer maliyetler (bağlantı kabloları, kontrol panelleri, vb.), rüzgar enerji sisteminin

özellik maliyeti ve rüzgar türbininin nominal gücünü tanımlamaktadır. Rüzgar enerji sisteminin özgül maliyeti, rüzgar türbininin nominal gücüne bağlı olarak değişmektedir. 10 ile 20 kW arasındaki nominal güce sahip rüzgar enerji sisteminin maliyeti 2200 ile 2900 \$/kW arasında değişirken; 20 ile 200 kW arası için 1500-2300 \$/kW; 200 kW ve üzerin için ise 1000-1600 \$/kW arasında olmaktadır [90].

Denklem 5.19'u sistem ömrü, iskonto oranı ve eskale edilmiş işletme ve onarım maliyetleri de düşünülerek, kademelendirilmiş enerji maliyeti (KEM) modeline uygun şekilde olmak üzere aşağıdaki gibi düzenlenebilir:

$$KEM = \frac{M_{RT}SDF_{RT} + M_B SDF_B + M_{IK} SDF_{IK} + M_D SDF_D + M_{IO}}{E_T} \text{ [$/kWh]} \quad (5.20)$$

Denklemden;

SDF: sermaye dönüşüm faktörü,

M_{IO} : işletme ve onarım maliyeti,

E_T : toplam enerji üretim miktarı

ifade etmektedir. Sermaye dönüşüm faktörü (SDF), bir bileşenin maliyetini sistem ömrü içinde değişen yıllık maliyeti sabit hale getirmek amacıyla kullanılmaktadır ve aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$SDF = ((1 + i)^l \cdot i) / ((1 + i)^l - 1) \quad (5.21)$$

Burada i ve l değerleri, sırasıyla iskonto oranı ve sistem ömrünü ifade etmektedir. Denklem 5.19'da ifade edilen M_{IO} işletme ve onarım maliyeti eskale edilerek sistem ömrü boyunca işletme ve onarım için gereken maliyet değeri e , eskalasyon oranını ifade etmek üzere aşağıdaki gibi hesaplanabilir [51] :

$$M_{IO} = \frac{M_{IO}}{i-e} [1 - (1 + e)^l (1 + i)^{-l}] \text{ [$/y]} \quad (5.22)$$

5.7.2. Hidrojen Üretim Maliyeti

Bir rüzgar-hidrojen sisteminde üretilen hidrojenin ne kadar maliyetli olduğu önemli bir konudur. Bilindiği üzere hidrojen üretim metotlarından en ucuzu buhar metan

reformasyonu iken en pahalısı şu anda elektroliz yöntemidir. Buhar metan reformasyonu ile hidrojen üretimi için doğal gaz gerekmektedir. Doğal gaz ise fosil kaynaklı bir yakıt olduğu için hem tükenme sorunu ile karşı karşıyadır; hem de bu metot ile hidrojen üretimi sonrasında çevreye CO₂ gazı salındığı için temiz bir üretim metodu değildir. Ayrıca bu yöntemde 800-900 °C sıcaklık seviyelerine çıkılması gerektiğinden dolayı kompleks sistemlere ihtiyaç duymakta ve bu da hiç pratik olmamaktadır.

Elektroliz yönteminde ise, hidrojen üretiminde düşük sıcaklıklarda hidrojen üretimi yapılabilmektedir. Ayrıca hidrojen üretimi sonrasında çevreye hiçbir zararlı emisyon salınmaması nedeniyle çok temiz bir metottur ve hidrojen üretimi için kompleks sistemlere gerek yoktur. Fakat elektrolizör ünitelerinin şu an için pahalı olması nedeniyle maliyetleri yüksek seviyelerdedir. Bu maliyetlerin, hidrojen ekonomisine geçiş süresi boyunca daha aşağı seviyelere ineceği düşünülmektedir.

Hidrojen üretim maliyetleri hesaplanırken, rüzgar enerjisi maliyetlerinde kullanılan kademelendirilmiş enerji maliyeti modeli burada kademelendirilmiş hidrojen maliyeti modeli olarak ifade edilerek kullanılacak olup, bu model ile hidrojen üretimi maliyetini (M_{H_2}) hesaplamak için, elektroliz sisteminin yıllık yatırım maliyeti (M_{YYM}), elektrik maliyeti (M_E) ve işletme-bakım maliyeti (M_{IB}) toplamının hidrojen üretim miktarına (m_{H_2}) bölünmesi ile hidrojen üretim maliyeti bulunabilir. Bu maliyet hesabı denklem ile ifade edilecek olursa;

$$M_{H_2} = \frac{M_{YYM}SDF_{YYM} + M_E + M_{IB}}{m_{H_2}} \quad [\$ / kg H_2] \quad (5.23)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem 5.23'de görüleceği gibi rüzgar enerjisi maliyeti yapılırken, yatırım maliyeti (M_{YYM}) sermaye dönüşüm faktörü (SDF) kullanılarak sistem ömrüne bağlı hale getirilmiştir. Elektrolizörün yıllık yatırım maliyeti, elektrolizörün özgül maliyeti (M_{OM}) ile nominal gücünün (P_N) çarpımı ile bulunabilir.

$$M_{YYM} = M_{OM} \cdot P_N \quad [\$] \quad (5.24)$$

Elektrolizörün özgül maliyeti yaklaşık 1000-1500 \$/kW arasında değişmektedir [65].

Ele alınan duruma bağlı olarak eğer hidrojen üretimi yapılırken, rüzgar türbininden gelen fazla enerji şebekeye satılacaksa, bu durum hidrojen üretim maliyetinin

düşürmeye yönelik bir adım olarak şebekeye satış maliyeti (M_S) hidrojen üretim maliyetinden çıkarılabilir. Bu durumda Denklem 5.23 aşağıdaki halini alır [91]:

$$M_{H_2} = \frac{M_{YYM}SDF_{YYM} + M_E + M_{IB} - M_S}{m_{H_2}} \text{ [$/kg } H_2\text{]} \quad (5.25)$$

5.7.3. Yakıt Pili Enerji Maliyeti

PEM yakıt pilinden üretilen enerjinin maliyeti de hidrojen üretim maliyeti ile benzer şekilde yapılabilir. Hidrojen üretiminde geçerli olan elektrik maliyeti, yakıt pilinde hidrojen maliyeti olarak, üretilen hidrojen miktarı ise üretilen enerji miktarı (E_T) olarak değiştirilebilir. PEM yakıt pili için geçerli olan kademelendirilmiş enerji maliyeti modeli aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$M_{YP} = \frac{M_{YYM}SDF_{YYM} + M_{H_2} + M_{IB}}{E_T} \text{ [$/kWh]} \quad (5.26)$$

6.BÖLÜM

KAYSERİ İLİ PINARBAŞI İLÇESİNDE ENERJİ ÜRETİM AMAÇLI RÜZGAR-HİDROJEN HİBRİD ENERJİ SİSTEMİ

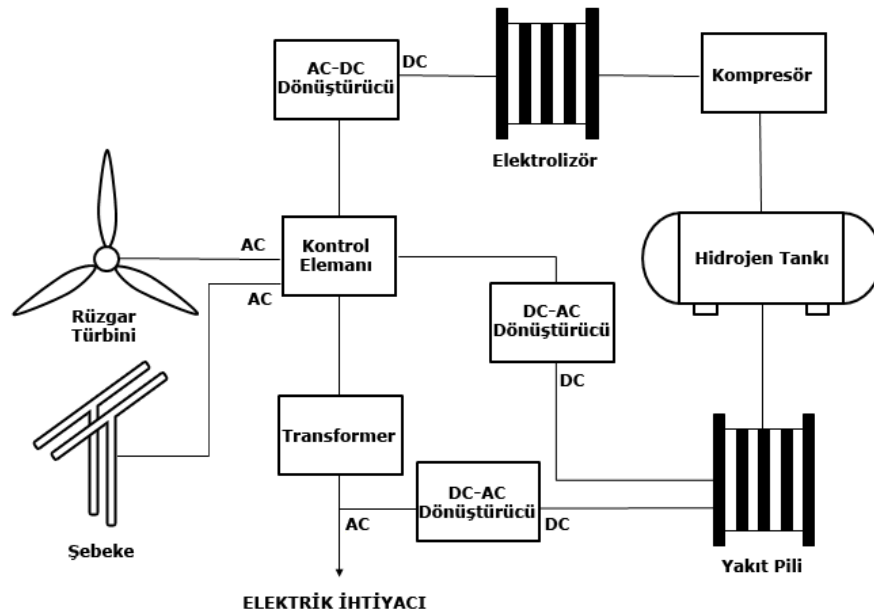
6.1. Giriş

Bu çalışmada Pınarbaşı ilçesinde bulunan bir küçükbaş hayvan çiftliğinin enerji ihtiyacını rüzgar enerjisi ve rüzgardan elde edilen hidrojen kullanarak karşılamak amaçlanmıştır. Bu nedenle ilk olarak bölgenin iklim yapısı, rüzgar potansiyeli, hayvan çiftliğinin enerji ihtiyacı, enerji ihtiyacını karşılayacak türbin, bu enerjiden hidrojen üretimi için elektrolizör ve üretilen hidrojenin tekrar enerjiye çevrilmesi için gerekli olan yakıt pili güçleri belirlenecektir. Daha sonra ise üretilen enerji miktarı, hidrojen miktarı ve bunların maliyet analizleri yapılacaktır. Bu sistemde 4. Bölümde bahsedildiği rüzgar-hidrojen enerji sistemi elemanları olarak rüzgar türbini, elektrolizör, yakıt pili, hidrojen tankı ve çeşitli kontrol elemanları kullanılmıştır. Ele alınan sistemde bulunan elemanlar Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Sistemdeki enerji yönetimi ise Bölüm 6.5'de anlatılmıştır.

6.2. Pınarbaşı'nın Yeri ve İklim Yapısı

Pınarbaşı 38°43' enlem ve 36°24' boylamlarında, Kayseri şehrinin bir ilçesi olup merkezden 95 km uzaklıktadır. Bozkır bir yapıya sahip olan bölge, Temmuz ve Ağustos aylarında özellikle etkili olan kuzeydoğu rüzgarları nedeniyle yazın sıcak ve kurak, kışın ise güneydoğu rüzgarları nedeniyle de uzun süren soğuk bir iklim yapısına sahiptir. Kış aylarının bu denli uzun ve soğuk geçmesi nedeniyle tarımcılık fazla gelişmemiştir. Tarımcılığın verimli bir şekilde yapılamamasından dolayı, bölge halkı

hayvancılığa yönelerek, hayvan yetiştiriciliği sayesinde geçimlerini sağlamaktadır. Bu nedenle Pınarbaşı bölgesinde hayvan yetiştirme çiftliklerinin önemli bir yeri vardır.

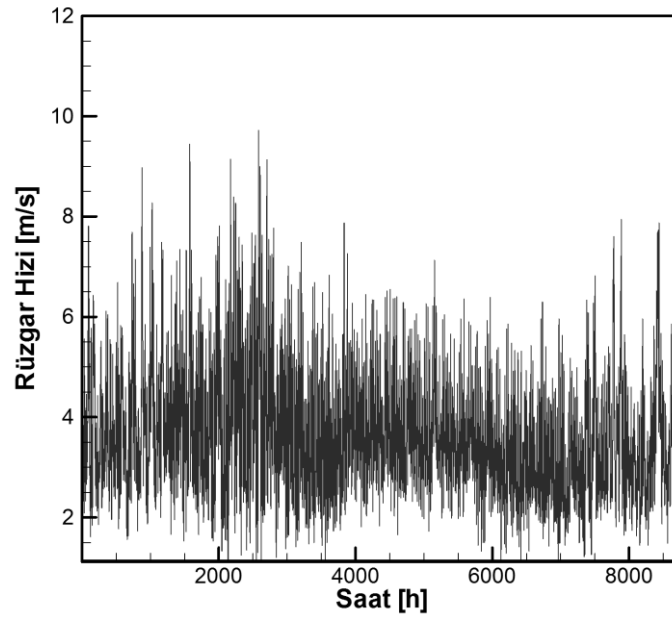


Şekil 6.1. Rüzgar-hidrojen sistemi genel elemanları.

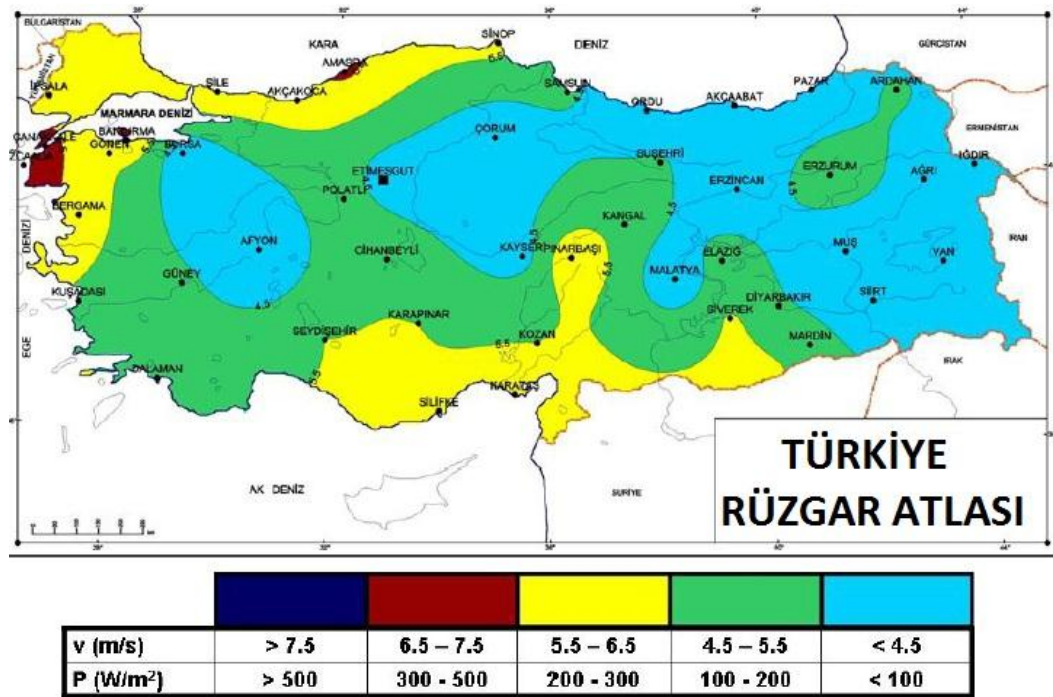
6.3. Pınarbaşı İlçesinin Rüzgar Potansiyeli

Pınarbaşı bölgesi, rakım olarak yüksek bir seviyede bulunması nedeniyle iyi bir rüzgar potansiyeline sahiptir. Yapılan çalışmalarda Pınarbaşı bölgesinin rüzgar enerjisinden yararlanmak için yeterli rüzgar potansiyeline sahip bir bölge olduğu sonucuna varılmıştır [51].

Devlet Meteoroloji İşleri (DMİ) Genel Müdürlüğü tarafından yapılmış rüzgar ölçümleri bölgenin rüzgar enerji santralleri için uygun bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir [92]. DMİ Genel Müdürlüğü'nün 2000 ve 2006 yılları arasında 10m yükseklikte saatlik ölçtüğü ortalama rüzgar hızının değişimi Şekil 6.2'de verilmiştir. Bu ölçümler göstermiştir ki, bölgenin rüzgar hızı ortalama 4.60 m/s civarındadır [50]. Şekil 6.3'de verilen Türkiye rüzgar atlası haritasında da görüleceği gibi İç Anadolu Bölgesi'nde bulunan Pınarbaşı ilçesi değerlendirilebilir bir rüzgar potansiyeline sahiptir.



Şekil 6.2. 10m yükseklikte 2000-2006 yılları arası Pınarbaşı ilçesi için saatlik ortalama rüzgar hızı verileri [92].



Şekil 6.3. Türkiye Rüzgar Atlası (yer düzeyinden 50 m yükseklikteki açık yüzeyler için rüzgar potansiyeli sınıf aralıkları) [92].

6.4. Hayvan Çiftliğinin Enerji İhtiyacı

Bir küçükbaş hayvan çiftliğinde enerji ihtiyacının büyük bir kısmı, ortamın havalandırılması ve aydınlatılması için gerekli olan fan ve aydınlatma sistemleri ile yem besleme sistemleri tarafından harcanmaktadır. Pınarbaşı ilçesinde ele alınan çiftlikte de fan, aydınlatma sistemi ve yem besleme sistemi, enerji ihtiyacının çok büyük bir kısmını kaplamakta olup, enerji ihtiyacı bu üç bileşene göre belirlenip hesaplama yapılacaktır. Tablo 6.1’de ele alınan çiftliğin enerji ihtiyacı verilmiştir.

Tablo 6.1. Küçükbaş hayvan çiftliği enerji ihtiyacı

Cihaz	Sayı	Nominal Güç (kW)	Toplam Güç (kW)	Çalışma Süresi (h)	Günlük Harcanan Enerji (kWh/d)	Yıllık Enerji Tüketimi (MWh/y)
Fan	80	1.5	120	24	2880	1051.2
Lamba	500	0.02	10	16	160	58.4
Yem Besleme Ünitesi	7	0.5	3.5	5	17.5	6.4
Toplam					3057.5	1116

Tablo 6.1’den de görüldüğü gibi 80 adet fan ve 500 adet aydınlatma için gerekli lamba ve yem besleme ünitesi kullanılmış ve bunların harcadığı enerji miktarı yıllık 1.116 GWh/yıl olmuştur. Rüzgar hızı daha önceden belirtildiği gibi sabit bir enerji üretimi sağlamaz, kesintili bir enerji sunmaktadır. Bunun anlamı bir saat içerisinde üretilen enerji, ikinci saat sonunda aynı miktarda üretilemez, rüzgar hızının değişimi ile üretilen enerji miktarı değişir. Bu nedenle rüzgar türbininden elde edilen enerji miktarının günlük olarak değil, saatlik olarak hesaplanması durumunda daha verimli bir enerji yönetimi yapılabilmesi mümkün olur. Bu bağlamda günlük ihtiyaç olan 3057.5 kW değeri 24 saate bölünürse ortalama 127 kW’lık bir enerji ihtiyacını saatlik olarak karşılamak gerekecektir.

6.5. Ele Alınan Durumlar

Bu çalışmada çiftliğin enerji ihtiyacını karşılamak için üç farklı durum ele alınmıştır.

6.5.1. Durum I: Küçükbaş Hayvan Çiftliğinin Enerji İhtiyacının Sadece Şebeke-Bağlantılı bir Rüzgar Sistemi ile İhtiyacının Karşılanması

Durum I'de mekanın enerji ihtiyacı için kullanılması düşünülen elektrolizör sisteminin avantajı veya dezavantajının ne olacağını belirlemek için mekanın enerji ihtiyacının sadece rüzgar türbini ve şebekeden karşılanması durumu incelenmiştir. Durum I için kullanılan enerji yönetimi;

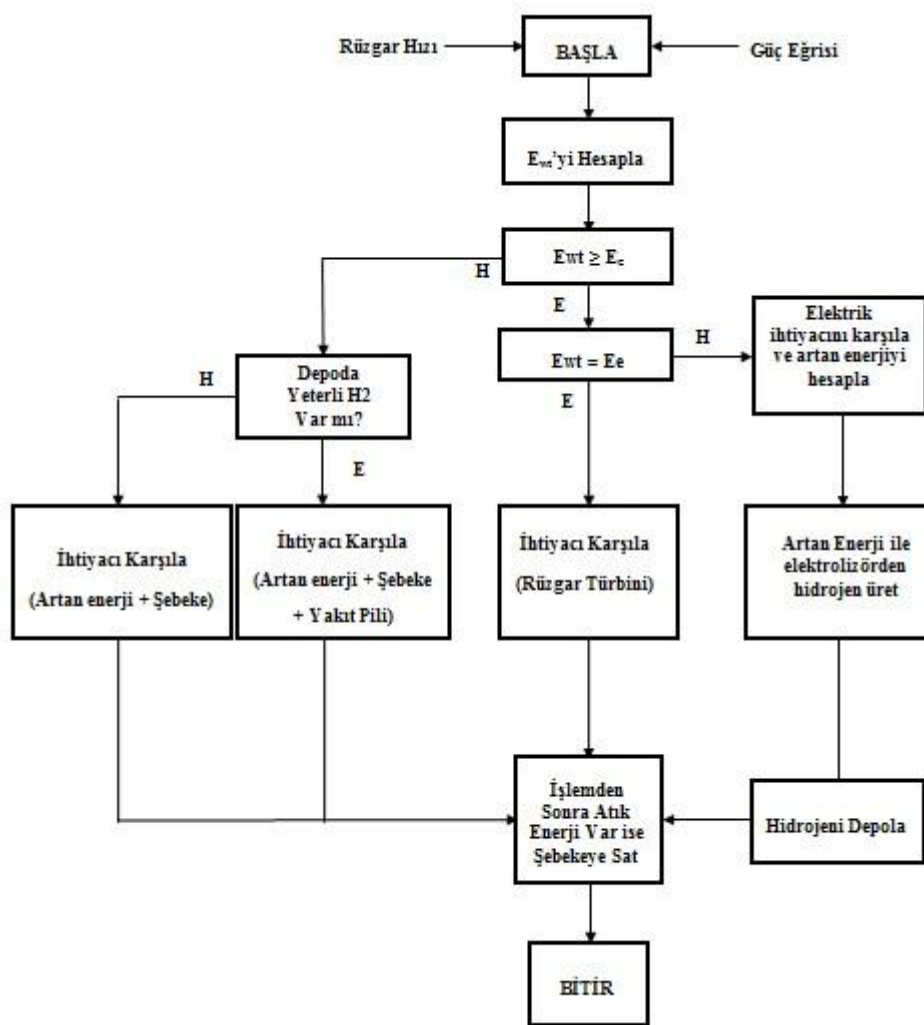
- Rüzgar türbininden elde edilen enerji mekanın enerji ihtiyacından fazla ise, mekanın enerji ihtiyacı karşılanır.
- Rüzgar türbininden elde edilen enerji mekanın enerji ihtiyacından az ise, şebekeden alınan enerji ile birlikte ihtiyaç karşılanır.
- Türbinden enerji elde edilemiyor ise, ihtiyaç doğrudan şebekeden karşılanır.

6.5.2. Durum II: Küçükbaş Hayvan Çiftliği Enerji İhtiyacının Elektrik Üretimi Öncelikli Amaç Olarak Rüzgar-Hidrojen Hibrid Sistemi ile Karşılanması

Durum II'de öncelikli amaç, mekanın enerji ihtiyacının karşılanması olarak düşünülmüş ve bu durum için farklı rüzgar türbinleri (800, 900, 2000, 3000 kW) ve farklı kule yükseklikleri (50 m, 80 m, 100 m) için mekanın enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Ele alınan bu durum için 40 kW'lık 3 adet elektrolizör kullanılarak hidrojen üretimi, üretim maliyeti hesaplanarak, 120 kW'lık tek bir elektrolizör kullanılması durumu ile karşılaştırma yapılmıştır. Bu durum için enerji yönetimi şu şekilde düşünülmüş ve Şekil 6.4'te şematik olarak verilmiştir:

- Rüzgardan elde edilen enerji, mekanın saatlik enerji ihtiyacından fazla ise üretilen enerji doğrudan mekana gönderilerek ihtiyaç karşılanır.
- Türbinden üretilen enerji ile ihtiyacın karşılanması sonrasında artan enerji olması durumunda, artan enerji elektrolizör gücünden büyük ise hidrojen üretimi gerçekleştirilir; eğer elektrolizör gücünden küçük ise bu fazla enerji şebekeye satılır.

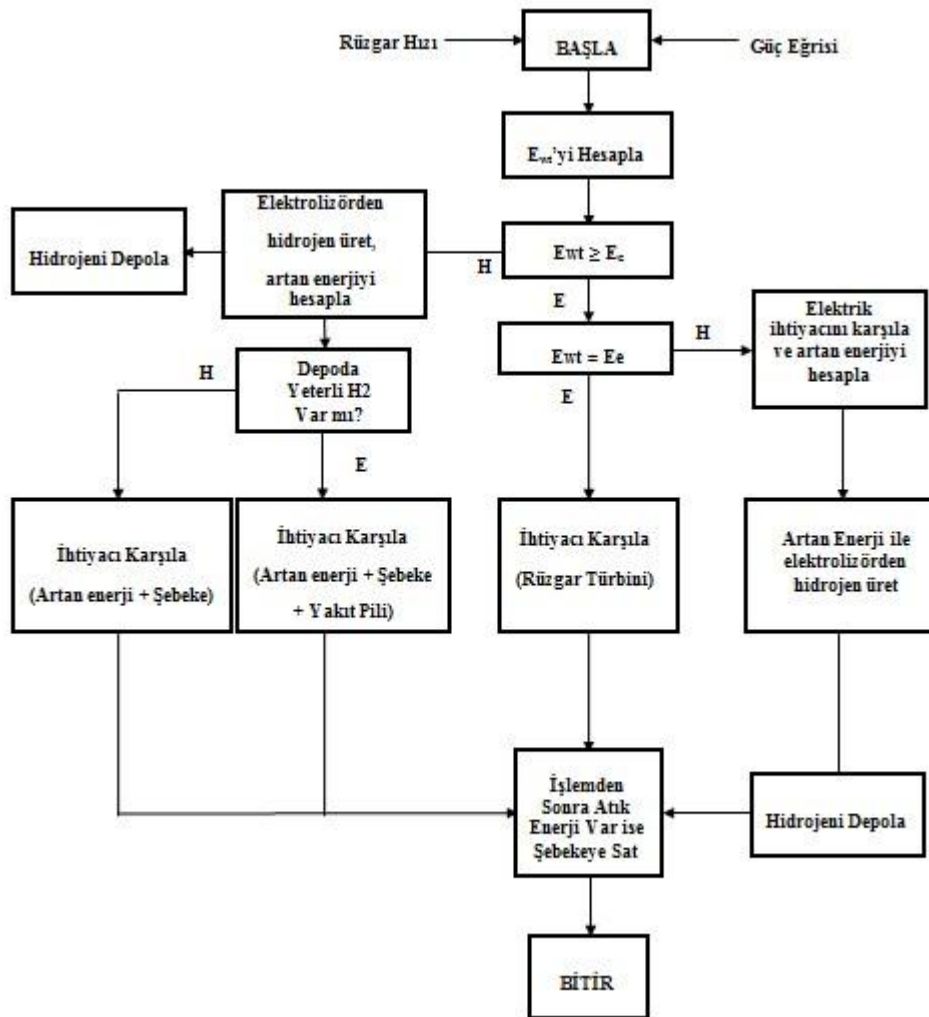
- Türbinden enerji üretilmiyor ise hidrojen tankında yakıt pili için gerekli hidrojen varsa yakıt pili çalışarak mekanın enerji ihtiyacı karşılanır; eğer yeterli hidrojen yoksa ihtiyaç şebekeden karşılanır.
- Rüzgar türbininden elde edilen enerji, mekanın enerji ihtiyacından küçük ise, elde edilen enerjiye şebekeden alınan enerji ile birleştirilerek mekanın enerji ihtiyacı karşılanır.



Şekil 6.4. Durum II için sistem şeması.

6.5.3. Durum III: Küçükbaş Hayvan Çiftliği Enerji İhtiyacının Hidrojen Üretimi Öncelikli Amaç Olarak Rüzgar-Hidrojen Hibrid Sistemi ile Karşlanması

Durum III'te öncelikli amaç hidrojen üretimi olarak düşünülüp 50, 80 ve 100 m rüzgar türbini yükseklikleri için rüzgar potansiyeline göre farklı rüzgar türbinlerinden (800, 900, 2000, 3000 kW) üretilecek enerji miktarı belirlenerek hidrojen üretimi yapılarak mekanın enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanılacaktır. Ele alınan bu durumda hidrojen üretim miktarının artırılması ve hidrojen üretim maliyetlerinin düşürülmesi amacıyla 120 kW elektrolizör gücü, 40 kW'lık 3 adet elektrolizör kullanılması durumu incelenip, bir adet 120 kW elektrolizör kullanılması durumundaki hidrojen üretim miktarı ve maliyeti ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.5. Durum III için sistem şeması.

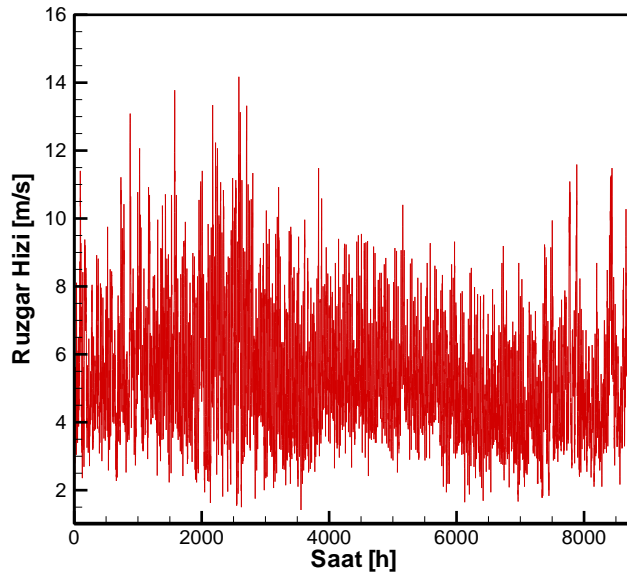
Şekil 6.5'te şematik olarak gösterildiği gibi ele alınan bu durum için enerji yönetimi şu şekilde yapılmıştır:

- Rüzgar türbininden elde edilen enerji, saatlik enerji ihtiyacından büyükse ilk olarak mekanın enerji ihtiyacı karşılanır.
- Mekanın enerji ihtiyacı karşılandıktan sonra kalan enerji elektrolizör gücünden fazla ise, hidrojen üretimi için elektrolizör sistemine gönderilerek hidrojen üretilir. Hidrojen üretimi yapıldıktan sonra yine artan enerji kalması durumunda bu enerji şebekeye satılır.
- Rüzgar türbininden enerji elde edilemediği durumda, eğer hidrojen tankında yeterli hidrojen varsa yakıt pili vasıtasıyla mekanın enerji ihtiyacı karşılanır.
- Rüzgar türbininden enerji üretilmediği ve hidrojen tankında yeterli hidrojenin de bulunmadığı durumda, mekanın enerji ihtiyacı şebekeden karşılanır.
- Rüzgar türbininden elde edilen enerji ile mekanın enerji ihtiyacının karşılanmasından sonra kalan enerji, elektrolizör gücünden düşük ise artan enerji şebekeye satılır.

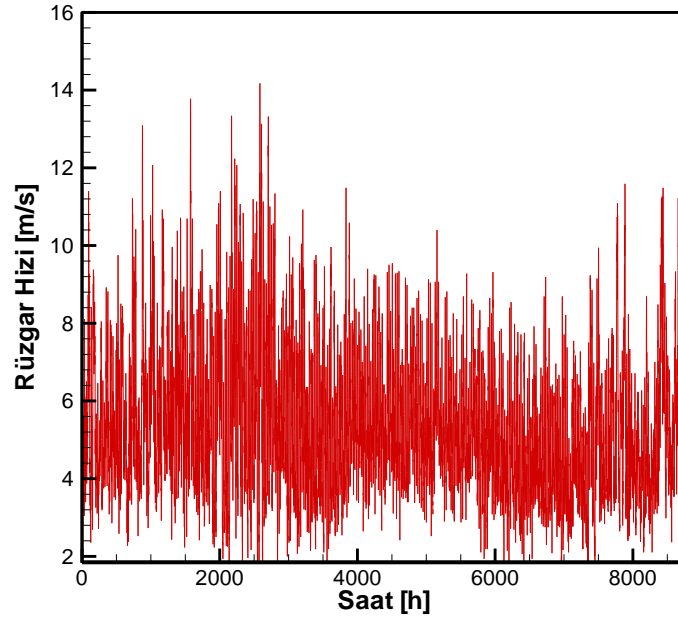
7. BÖLÜM

BULGULAR

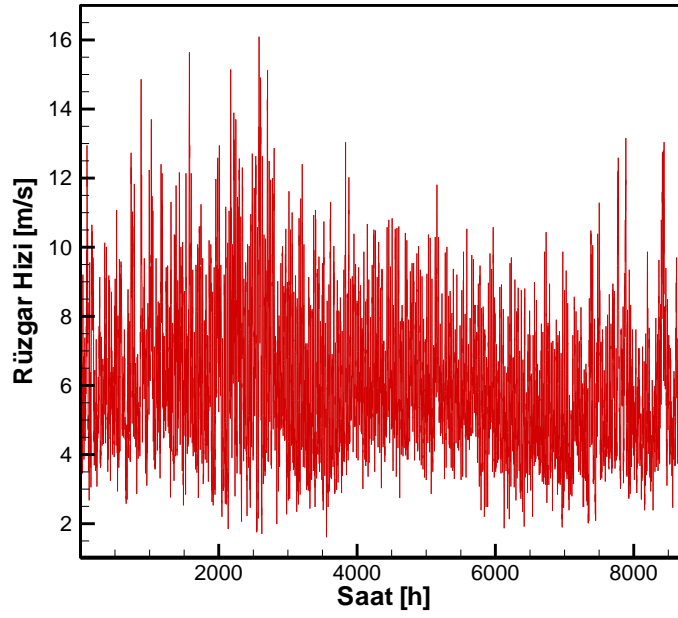
Bu çalışmada Pınarbaşı bölgesi için Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nün 2000-2006 yılları arasında yapmış olduğu saatlik rüzgar ölçümleri sonucunda elde edilen ortalama rüzgar hızı verileri kullanılmıştır. Bölüm 6.3'te verilen 10 m yükseklik için elde edilmiş olan rüzgar hızları, 5. Bölümde bahsedilen 5.8 denklemi ile 50, 80 ve 100 m yüksekliklere enterpole edilmiş ve rüzgar enerjisinden daha etkin bir şekilde yararlanılmıştır. Şekil 7.1-7.3'te sırasıyla 50, 80 ve 100 m yükseklikler için elde edilmiş yıllık ortalama rüzgar hızı verileri gösterilmiştir. 10 m yükseklikte ortalama yıllık rüzgar hızı 3.66 m/s iken, ortalama rüzgar hızları 50 m yükseklik için 5.34 m/s, 80 m için 5.83 m/s ve 100 m için 6.07 m/s'dir. Bu şekilde yüksekliğe bağlı olarak rüzgar hızının değişimi ile üretilecek enerji miktarına uygun bir türbin kule yüksekliği belirlenebilir.



Şekil 7.1. 50 m yükseklik için rüzgar hızı verileri.



Şekil 7.2. 80 m yükseklik için rüzgar hızı verileri.



Şekil 7.3. 100 m yükseklik için rüzgar hızı verileri.

7.1. Rüzgardan Elde Edilen Enerji

Bu çalışmada optimum rüzgar türbininin belirlenmesi amacıyla 4 adet rüzgar türbini (800 kW, 900 kW, 2000 kW ve 3000 kW) seçilerek karşılaştırılmıştır. Seçilen rüzgar türbinlerinin karakteristikleri Tablo 7.1’de verilmiştir.

Tablo 7.1. Rüzgar türbini karakteristikleri

Türbin Karakteristiği	E-48 800 kW	E-44 900 kW	E-82 2000 kW	E-101 3000kW
Nominal Güç (kW)	800	900	3000	3000
Göbek Yüksekliği (m)	50	45	78	99
Rotor Çapı (m)	48	44	82	101
Süpürme Alanı (m ²)	1810	1521	5281	8012
Başlama Hızı (m/s)	3	3	2	2
Durma Hızı (m/s)	28	28	28	28

7.2. Durum I: Küçükbaş Hayvan Çiftliğinin Enerji İhtiyacının Sadece Şebeke-Bağlantılı bir Rüzgar Sistemi ile İhtiyacının Karşlanması

Durum I’de sistemin sadece rüzgar enerjisi-şebeke etkileşimi yardımıyla çalıştığı düşünülmüş ve enerji yönetimi mantığı önceki bölümde verilmiştir ve bu bölümde elde edilen rüzgar hızına bağlı olarak türbinlerden üretilen enerjiye bağlı olarak şebekeden alınan enerji ve atık enerji gibi konular üzerinde durularak elde edilen sonuçlar verilecektir.

Bölüm 6.5.1’de bahsedilen bu durum için enerji yönetimi mantığına uygun olarak yapılan hesaplamalar sonucunda yıllık şebekeye satılan enerji fiyatı, şebekeden alınan enerji fiyatı ve geri ödeme süresi tablosu Tablo 7.2’te verilmiştir.

Tablo 7.2. Şebeke yıllık alış-satış fiyatları ve geri ödeme süreleri

	50 m			80 m			100 m		
	Satılan Enerji (TL)	Alınan Enerji (TL)	Geri Ödeme Süresi (yıl)	Satılan Enerji (TL)	Alınan Enerji (TL)	Geri Ödeme Süresi (yıl)	Satılan Enerji (TL)	Alınan Enerji (TL)	Geri Ödeme Süresi (yıl)
800 kW	33514	95946	8.4	52378	78432	6.7	62765	70834	6
900 kW	31061	103336	10.1	50877	86271	7.9	62381	78785	7.1
2000 kW	189292	37722	8.4	264792	25834	6.7	303923	21413	6.1
3000 kW	327611	26005	8.8	449924	16913	7	512629	13785	6.3

Tablo 7.2'den görüldüğü gibi rüzgar türbini gücünün artmasıyla birlikte üretilen enerji miktarının artması şebekeden alınan enerjinin azalması anlamına gelmektedir. Bu da şebekeye ödenen ücretin azalması anlamına gelmekte aynı zamanda şebekeye satılan enerjinin de artması demektir. Bu da dolaylı olarak rüzgar türbini maliyetlerinin azalmasını sağlayarak sistemin kendini geri ödeme süresini de azaltmaktadır.

Örneğin bölgeye kurulacak bir 800 kW'lık rüzgar türbini 100 m yükseklikte 7.4 yıl içerisinde kendini amorti ederek kara geçmeyi sağlayacaktır. Rüzgar türbini gücünün artmasıyla geri ödeme sürelerinin artması da rüzgar türbini kurulum maliyetlerinin giderek daha fazla olması nedeniyle enerji üretiminden elde edilen kazancın maliyetler karşısında yetersiz kalmasından kaynaklanmıştır.

7.3. Durum II: Küçükbaş Hayvan Çiftliği Enerji İhtiyacının Elektrik Üretimi Öncelikli Amaç Olarak Rüzgar-Hidrojen Hibrid Sistemi ile Karşlanması

7.3.1. Rüzgar Enerjisi ve Maliyeti

Durum II için düşünülen 4 farklı nominal güce sahip rüzgar türbinlerinin farklı yüksekliklerde ürettikleri enerji, kapasite faktörleri ve enerji üretim maliyetleri incelenecektir. Bilindiği üzere türbin kule yüksekliğinin artması ile türbine etkiyen rüzgar hızı artar. Bu da türbinin kapasite faktörü ve üreteceği enerji miktarının artmasını sağlarken üretilen enerji maliyetinin de düşmesini sağlar. Bu ise rüzgardan daha etkin bir şekilde yararlanılması anlamına gelir. Tablo 7.3'de farklı türbin tiplerinin farklı

yükseklik için hesaplanmış kapasite faktörü, üretilen enerji ve enerji maliyeti değerleri verilmiştir.

Tablo 7.3. Farklı türbin tiplerinin farklı yükseklik için hesaplanmış kapasite faktörü, üretilen enerji ve enerji maliyeti değerleri

Türbin Tipi	50 m			80 m			100 m		
	C _f	Enerji (MWh)	C _{elc} (\$/kWh)	C _f	Enerji (MWh)	C _{elc} (\$/kWh)	C _f	Enerji (MWh)	C _{elc} (\$/kWh)
E-48 800 kW	0.13	914	0.1702	0.17	1189	0.1308	0.19	1329	0.1170
E-44 900 kW	0.10	850	0.1841	0.14	1131	0.1546	0.16	1282	0.1365
E-82 2000 kW	0.15	2714	0.1432	0.19	3497	0.1111	0.22	3894	0.0998
E-101 3000 kW	0.16	4095	0.1424	0.20	5309	0.1098	0.23	5923	0.0984

Tablo 7.3'ten görüldüğü gibi her türbin için yüksekliğin artmasıyla kapasite faktörü ve üretilen enerji miktarı artarken enerji maliyeti azalmıştır. Bu duruma uygun olarak en yüksek güce sahip olan 3000 kW rüzgar türbininde 100 m yükseklikte en düşük enerji üretim maliyeti ve en yüksek kapasite faktörü elde edilmiştir. Fakat bir rüzgar türbini seçiminde sadece bu değerlerin dikkate alınması yetmemektedir. Bu değerlerin yanında rüzgar türbininin ilk kurulum maliyeti, kurulacak bölgenin enerji ihtiyacıyla arasındaki denge gibi unsurlarında dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle ilk kurulum maliyeti açısından düşük bir değere sahip olan 800 kW rüzgar türbinin 100 m yükseklikte üreteceği enerji miktarı, kapasite faktörü ve enerji değerlerinin de uygun olacağı düşünülmüş ve bundan sonraki hesaplamalarda 800 kW rüzgar türbini kullanılmıştır. Sistemden elde edilen rüzgar gücüne bağlı olarakta elektrolizörden hidrojen üretimi ve yakıt pilinden enerji üretimi için 40 kW yakıt pili ve 120 kW elektrolizör kullanılmıştır.

7.3.2. Hidrojen Üretimi ve Maliyeti

Sistemde yakıt pilinin ihtiyacı olan hidrojenin üretilmesi amacıyla 120 kW'lık elektrolizör sisteminin devreye alınacağı Bölüm 6.1'de bahsedilmiştir. Bu elektrolizör sistemi için iki durum düşünülmüştür. Bunlar;

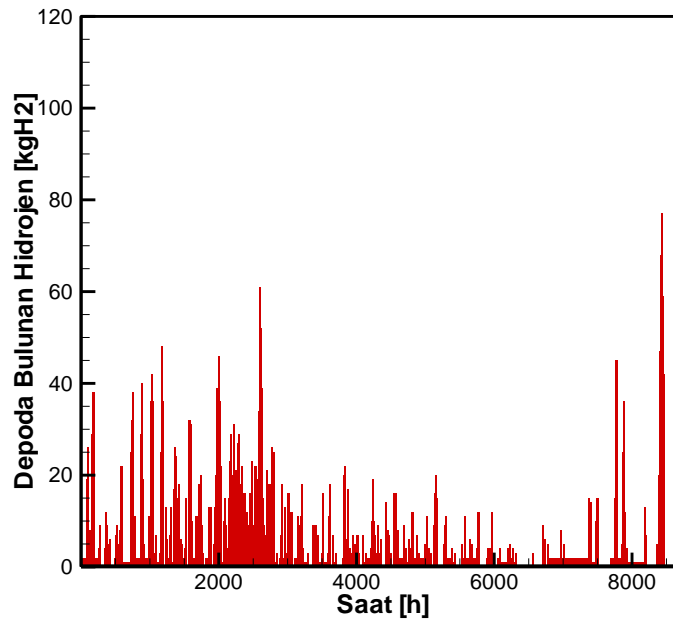
- 120 kW'lık tek elektrolizör sistemi

- 40 kW'lık 3 adet elektrolizör sistemi

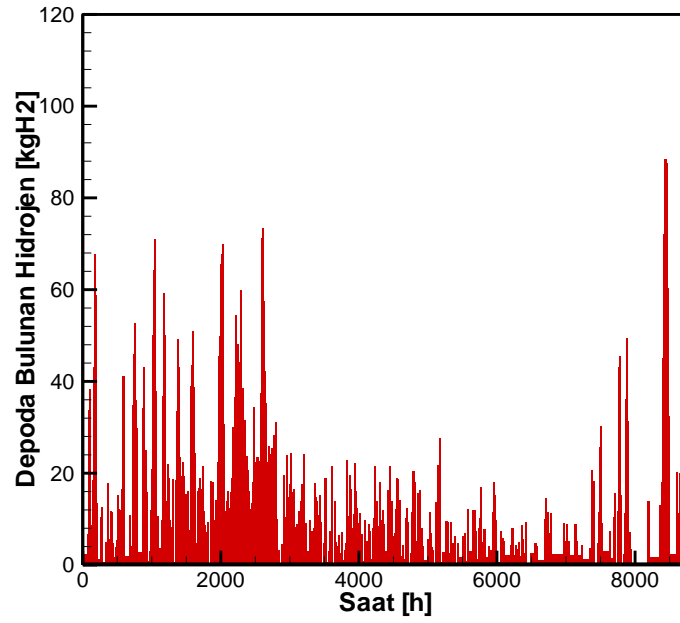
Bu iki durum için farklı yüksekliklerde yıllık hidrojen üretim miktarı ve hidrojen üretim maliyetleri hesabı yapılmıştır.

7.3.2.1. 120 kW'lık tek elektrolizör sistemi

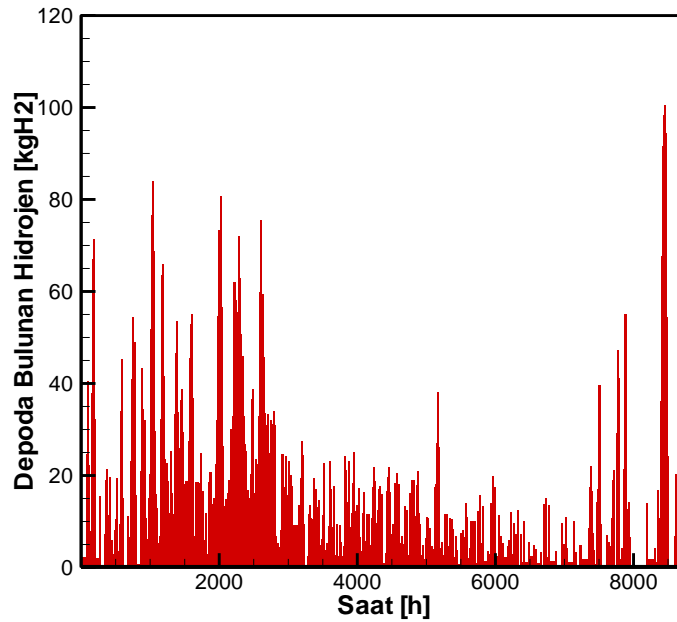
Durum II için düşünülen tek elektrolizör sistemi için hidrojen üretim miktarlarına bağlı olarak zamanla depoda biriken hidrojen hesabı yapılmış ve farklı yükseklikler için hesaplanan değerler Şekil 7.4-7.6'da verilmiştir. Bu grafiklerden görüldüğü gibi Durum II için öncelikli amacın mekânın enerji ihtiyacını karşılamak olduğu ve ihtiyaç için kullanılan enerjiden artan kısım ile hidrojen üretimi yapıldığı için ele alınan önceki durumdan daha düşük bir hidrojen üretimi gerçekleşmiştir.



Şekil 7.4. 50 m yükseklik için 120 kW tek elektrolizör sisteminde zamanla depoda biriken hidrojen miktarı (Durum II).



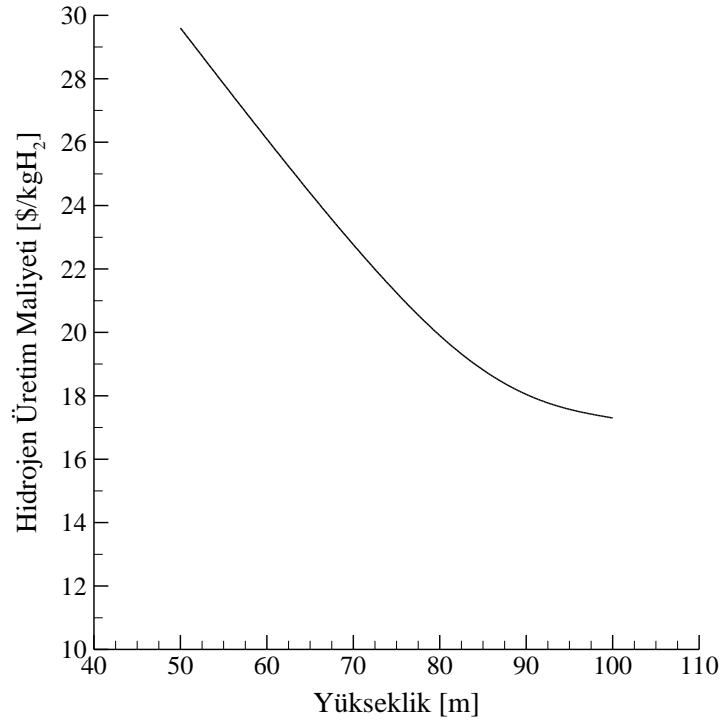
Şekil 7.5. 80 m yükseklik için 120 kW tek elektrolizör sisteminde zamanla depoda biriken hidrojen miktarı (Durum II).



Şekil 7.6. 100 m yükseklik için 120 kW tek elektrolizör sisteminde zamanla depoda biriken hidrojen miktarı (Durum II).

Yapılan hesaplamalar sonucunda hidrojen üretim miktarları 50 m yükseklik için maksimum 77.4 kgH₂, 80 m yükseklik için maksimum 88.4 kgH₂ ve 100 m için ise maksimum 100.4 kgH₂ olmuştur.

Yıllık hidrojen üretim miktarları 50 m yükseklikte 2.1 tonH₂, 80 m yükseklikte 3.3 tonH₂ ve 100 m yükseklikte ise 3.8 tonH₂ olarak hesaplanmıştır. Bu üretim miktarları sonucunda hidrojen maliyetlerine bakılacak olursa 50 m yükseklikteki hidrojen üretim maliyeti 29.6 \$/kgH₂ iken 80 m yükseklikte 19.9 \$/kgH₂ ve 100 m yükseklikte ise 17.3 \$/kgH₂ olarak hesaplanmış ve Şekil 7.7’de gösterilmiştir.



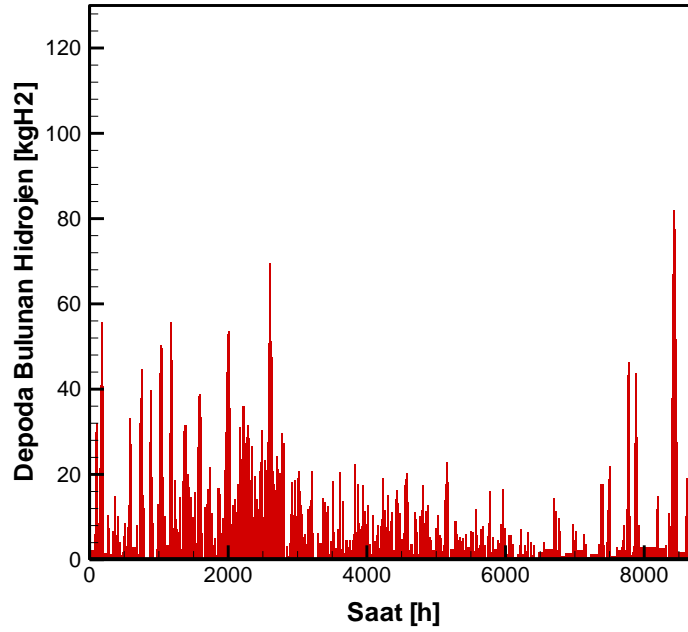
Şekil 7.7. Yüksekliğe bağlı olarak hidrojen üretim maliyetindeki değişim (Durum II).

7.3.2.2. 40 kW’lık 3 adet elektrolizör sistemi

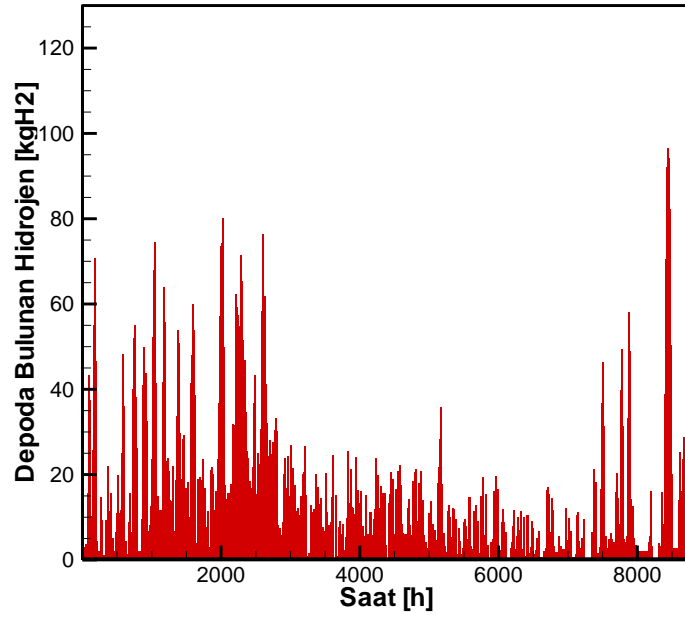
120 kW’lık tek elektrolizör sistemi kullanılması yerine 3 adet 40 kW nominal güce sahip elektrolizörün ele alınması durumunda da H₂ üretim miktarları ve maliyetleri de

araştırılmıştır. Bu şekilde elektrolizör nominal gücünün düşük tutulması ile düşük rüzgar hızlarında da hidrojen üretimi yapılabileceği açıktır. Hidrojen üretim miktarının artmasıyla hidrojen üretim maliyetlerinin değişimi de açıkça görülebilecektir. Bu durum için elde edilen hesaplar doğrultusunda 3 farklı yükseklik için zamanla depoda biriken hidrojen üretim miktarları Şekil 7.8-7.10'da verilmiştir.

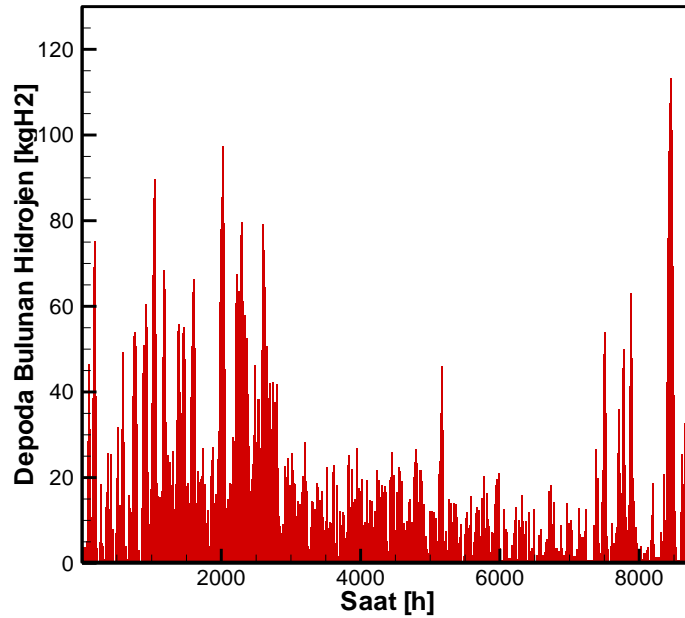
Yapılan bu hesaplamalar sonucunda 50 m yükseklik için depoda biriken hidrojen miktarı maksimum 82 kgH₂ olurken 80 m için bu değer 96.5 kgH₂ ve 100 m için 113.2 kgH₂ olmuştur. Yıllık üretilen toplam hidrojen miktarları ise 50 m yükseklik için 2.9 tonH₂, 80 m yükseklik için 4.1 tonH₂ ve 100 m yükseklik içinse 4.8 tonH₂ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.8. 50 m yükseklik için 40 kW'lık 3 adet elektrolizör sisteminde zamanla depoda biriken hidrojen miktarı (Durum II).

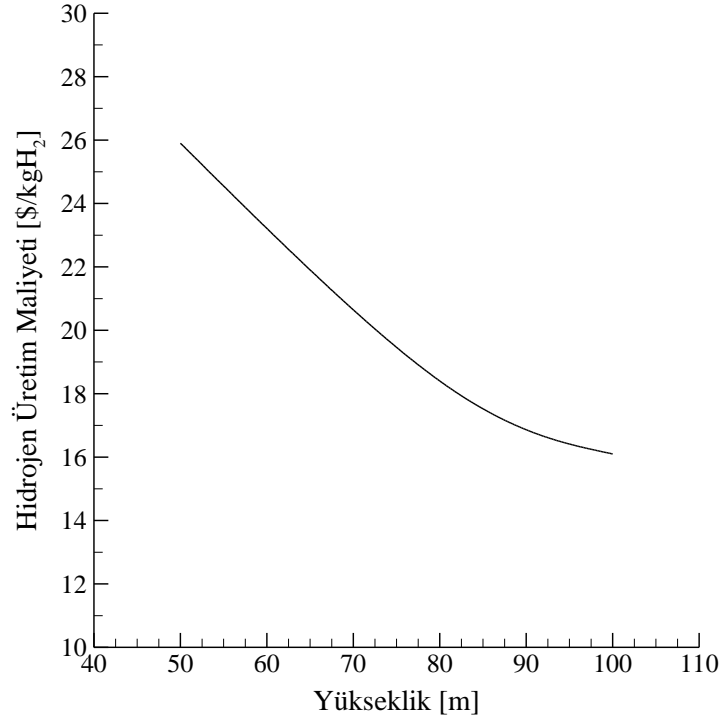


Şekil 7.9. 80 m yükseklik için 40 kW'lık 3 adet elektrolizör sisteminde zamanla depoda biriken hidrojen miktarı (Durum II).



Şekil 7.10. 100 m yükseklik için 40 kW'lık 3 adet elektrolizör sisteminde zamanla depoda biriken hidrojen miktarı (Durum II).

Bu durum için hesaplanan hidrojen üretim maliyetleri ise 50 m yükseklikte 25.9 \$/kgH₂, 80 m yükseklikte 18.4 \$/kgH₂ ve 100 m yükseklikte 16.1 \$/kgH₂ olarak belirlenmiş ve Şekil 7.11’de grafik şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 7.11. Yüksekliğe bağlı olarak hidrojen üretim maliyetindeki değişim (Durum II).

7.3.3. Yakıt pilinden elde edilen enerji

Sistemde kullanılacak yakıt pilinin çalışma süresi, üretilen hidrojen miktarına bağlı olarak artacak veya azalacaktır. Farklı elektrolizör sistemleri için üretilen hidrojen miktarları ele alındığında yakıt pilinden üretilen yıllık enerji miktarı değerleri Tablo 7.4’te verilmiştir. Bu tablodan görüldüğü gibi yüksekliğin artmasıyla yakıt pili daha fazla çalışarak daha fazla enerji üretimi yapmaktadır. Yakıt pilinin çalışması ile rüzgarın az olduğu zamanlarda şebekeden çekilen enerji miktarı azalır.

Tablo 7.4. Farklı elektrolizör ve farklı yükseklik değerleri için yakıt pilinden elde edilen yıllık enerji miktarı (Durum II).

Yükseklik	Üretilen Enerji Miktarı [MWy]		
	50 m	80 m	100 m
120 kW 1 elektrolizör	28	43	51
40 kW 3 elektrolizör	38	55	63

7.3.4. Şebekeden Çekilen Enerji Miktarı

Rüzgar türbininden elde edilen fakat mekanın enerji ihtiyacını karşılayamayacak derecede az olan enerji ile hidrojen üretimi yapmadan şebekeden çekmek suretiyle ihtiyacın karşılanacağı düşünülmüş ve bu durum için bir yıl boyunca şebekeden alınacak olan enerji miktarı belirlenmiş ve farklı yükseklikler için değişimi incelenmiştir. Bu durum için bulunan değerler tablo halinde sunulmuştur.

Tablo 7.5. Farklı elektrolizör durumları ve farklı yükseklik için şebekeden çekilen yıllık enerji miktarları (Durum II)

Yükseklik	Şebekeden Çekilen Enerji Miktarı [MWy]		
	50 m	80 m	100 m
120 kW 1 elektrolizör	498	390	342
40 kW 3 elektrolizör	489	380	332

Verilen değerlere bakılacak olursa daha önce de belirtildiği gibi yüksekliğin artmasıyla hidrojen üretim miktarının artması ve bu nedenle yakıt pilinden üretilen yıllık enerjinin de artması nedeniyle şebekeden çekilen enerji az olacaktır. Fakat burada dikkat edilmesi gereken bir husus; bu durumda hidrojen üretimi yapılması öncelikli amaç olmadığından şebekeye doğru bir yönelme olduğu düşünülüp, şebekeden çekilecek enerji miktarının artması gerektiği düşünülebilir. Fakat aslında bu durum için rüzgar türbininden elde edilen ve ihtiyaçtan az olan enerjiyi hidrojen üreterek tüketmek

yerine bu enerjiye şebekeden alınan enerjinin eklenmesi ile ihtiyaç karşılanmaktadır. Yani elde edilen bu az enerjiyi hidrojen üreterek tüketmek suretiyle şebekeden daha fazla enerji alınması yapılmamaktadır.

Bu şekilde hesaplamalar yapıldıktan sonra rüzgar-hidrojen enerji sisteminin bu durum için yıllık enerji ihtiyacının ne kadarını karşılayabildiği hesaplanmış ve Tablo 7.6'da gösterilmiştir.

Tablo 7.6. Farklı yükseklik ve farklı elektrolizör durumları için çiftliğin enerji ihtiyacının rüzgar-hidrojen sistemi ile karşılanan kısmı (Durum II)

Yükseklik	Enerji ihtiyacının karşılanma oranı [%]		
	50 m	80 m	100 m
120 kW 1 elektrolizör	55.4	65	69.3
40 kW 3 elektrolizör	56.1	65.9	70.2

Şebekeden alınan enerji miktarının azalması demek, sistemin rüzgar-hidrojen sistemi ile daha fazla çalışması anlamına geldiği için yıllık enerji ihtiyacının karşılandığı oranlar daha fazla olmuş ve 100 m yükseklikte en yüksek seviyeye ulaşılarak yıllık enerji ihtiyacının %70.2'lik bir kısmının rüzgar-hidrojen enerji sistemi ile karşılanabileceği belirlenmiştir.

7.4. Durum III: Küçükbaş Hayvan Çiftliği Enerji İhtiyacının Hidrojen Üretimi Öncelikli Amaç Olarak Rüzgar-Hidrojen Hibrid Sistemi ile Karşılanması

7.4.1. Rüzgar Enerjisi ve Maliyeti

Durum III için, seçilen 800 kW rüzgar türbini ve yükseklik değerleri (50 m, 80 m ve 100 m) kullanılmıştır. Bu nedenle ele alınan Durum II için hesaplanan yıllık enerji üretim miktarı, kapasite faktörü ve enerji maliyetleri yine aynı kalacaktır. Bu nedenle

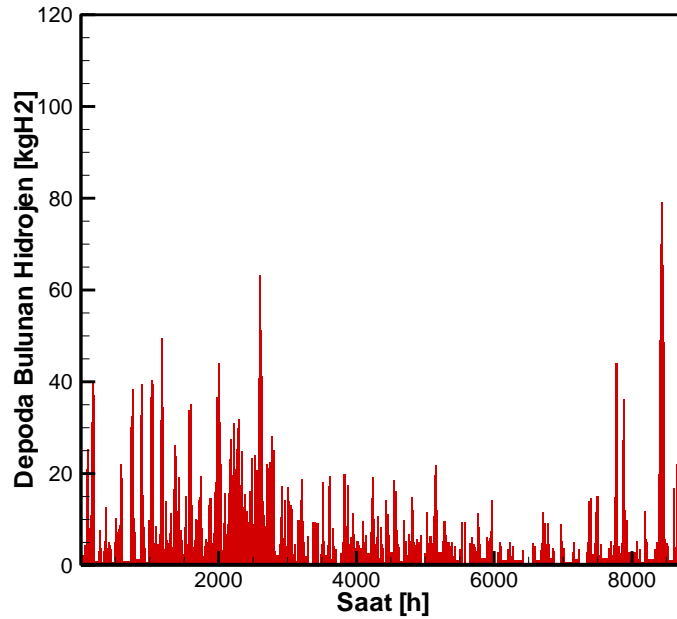
aynı hesaplamaların tekrar yapılmasına gerek olmayıp, hesaplanan değerler ele alınan bu durum için de aynen kullanılmıştır.

7.4.2. Hidrojen Üretimi ve Maliyeti

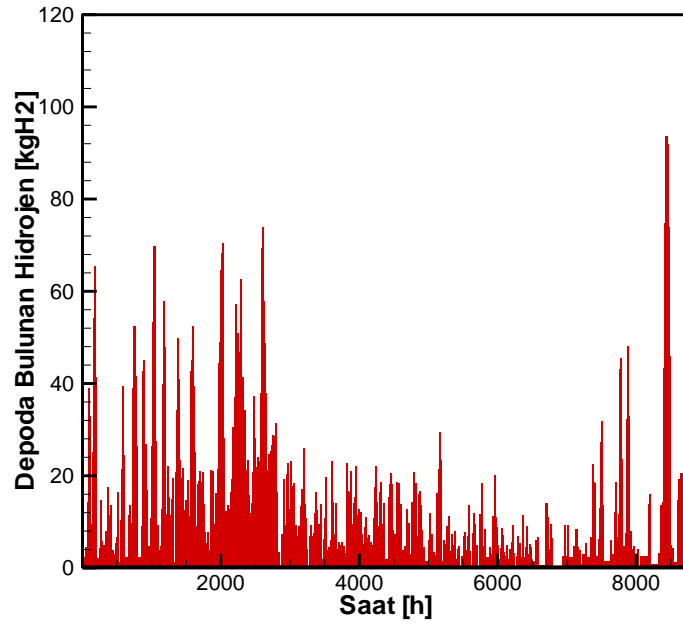
Ele alınan bu durumda da Durum II için düşünüldüğü gibi farklı iki adet elektrolizör sistemi (120 kW'lık 1 adet ve 40 kW'lık 3 adet) kullanılarak bu durumlar için gerekli hesaplar yapılmıştır.

7.4.2.1. 120 kW'lık tek elektrolizör sistemi

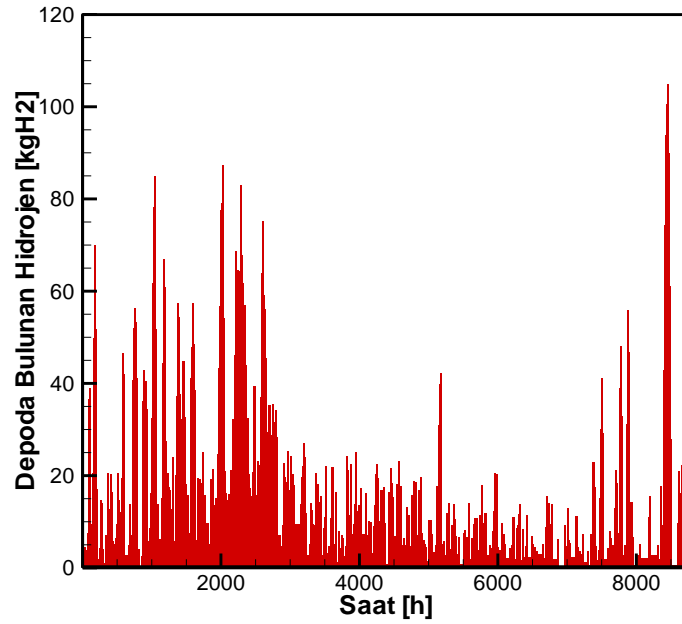
Bu durumda rüzgar-hidrojen enerji sisteminde 120 kW nominal güce sahip bir adet elektrolizör olacağı düşünülmüştür. Bu elektrolizör sisteminin nominal güce hidrojen üretimi yapılabilmesi için rüzgar türbininden 120 kW'lık bir enerjinin elde edilmesi gerekir. Saatlik ortalama rüzgar enerjisinin bu değer altında olması durumunda hidrojen üretim miktarının düşeceği açıktır. Fakat ortalama olarak bu değerlerde bir enerji üretimi olması durumunda yeterli bir hidrojen üretimi olacağı düşünülebilir. Bu durum için Şekil 7.12-7.14'da zamanla biriken hidrojen miktarları verilmiştir.



Şekil 7.12. 50 m yükseklik için 120 kW tek elektrolizör sisteminde zamanla depoda biriken hidrojen miktarı (Durum III).



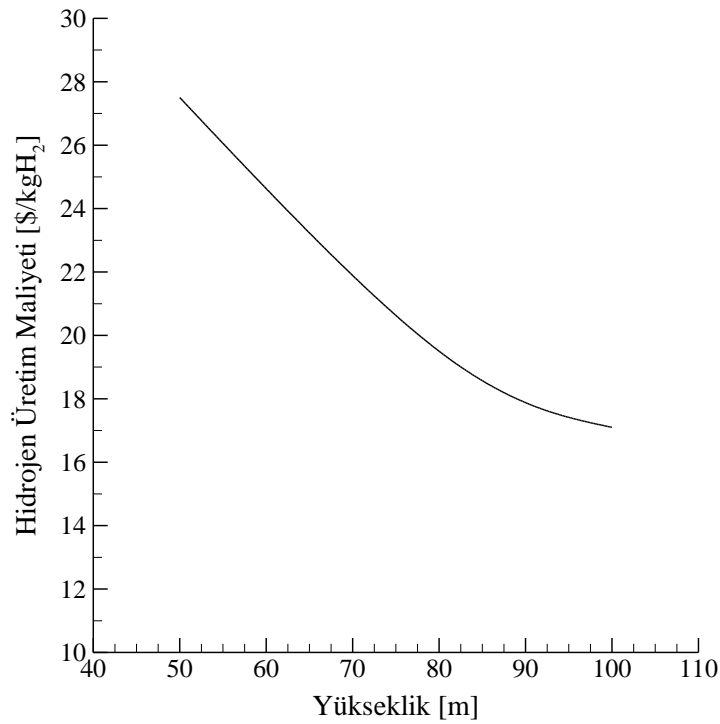
Şekil 7.13. 80 m yükseklik için 120 kW tek elektrolizör sisteminde zamanla depoda biriken hidrojen miktarı (Durum III).



Şekil 7.14. 100 m yükseklik için 120 kW tek elektrolizör sisteminde zamanla depoda biriken hidrojen miktarı (Durum III).

Şekil 7.12-7.14'den görüldüğü gibi elektrolizör sisteminden yükseklik arttıkça daha etkin bir şekilde hidrojen üretimi yapılmıştır. 50 m yükseklikte depoda biriken maksimum hidrojen miktarı 79.02 kgH₂ olurken, 80 m yükseklikteki maksimum hidrojen miktarı 93.5 kgH₂, 100 m yükseklikte ise 104.9 kgH₂ olmuştur.

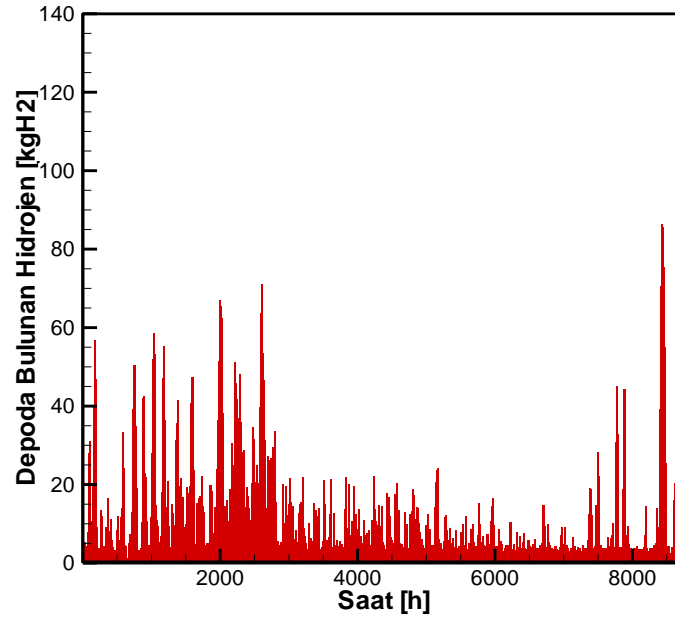
Yıllık hidrojen üretim miktarı 50 m yükseklik için 2.5 tonH₂, 80 m yükseklik için 3.7 tonH₂ ve 100 m yükseklik için 4.2 tonH₂ olmuştur. Bu üretim miktarlarına karşılık gelen hidrojen üretim maliyetlerine bakılacak olursa; 50 m yükseklikte 27.5 \$/kgH₂, 80 m yükseklikte 19.5 \$/kgH₂ ve 100 m yükseklikte ise 17.1 \$/kgH₂ olarak hesaplanmış ve bu değerler Şekil 7.15'te verilmiştir.



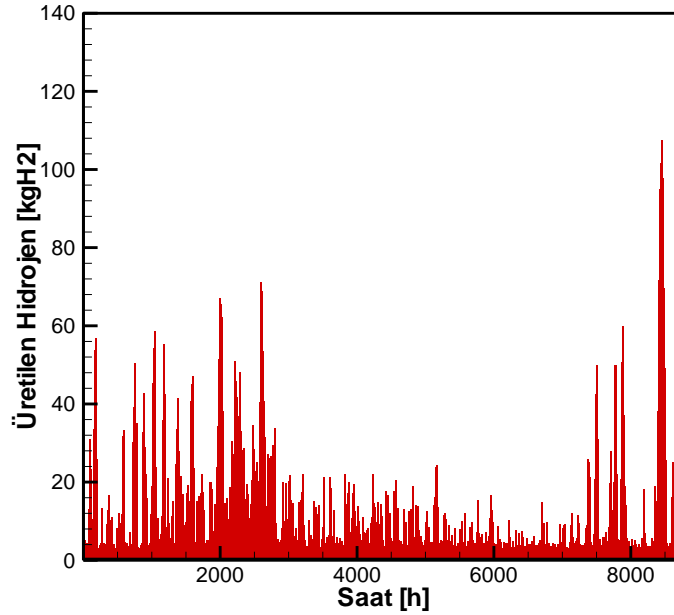
Şekil 7.15. Yüksekliğe bağlı olarak hidrojen üretim maliyetindeki değişim (Durum III).

7.4.2.2. 40 kW'lık 3 adet elektrolizör sistemi

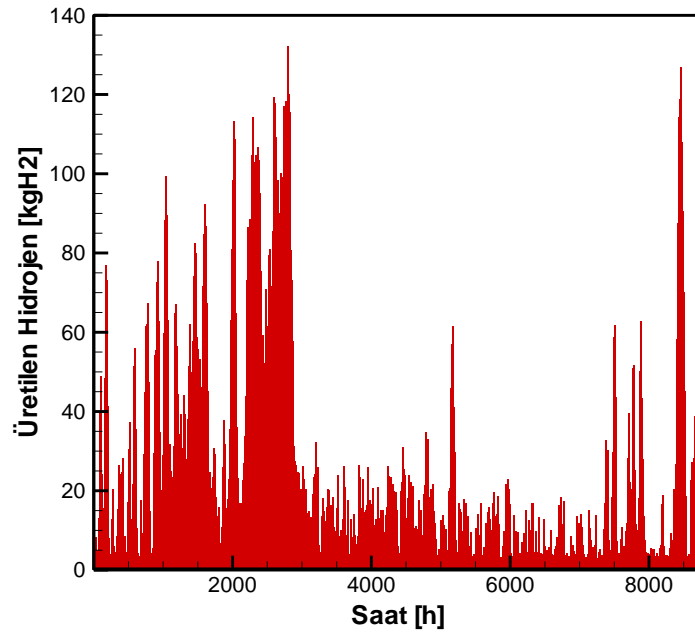
Bu durumda da Bölüm 7.3.2.2'de yapıldığı gibi 40 kW nominal güce sahip olan 3 adet elektrolizör sistemi kullanıldığı düşünülerek hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesapların sonuçlarına göre Şekil 7.16-7.18 verilmiştir.



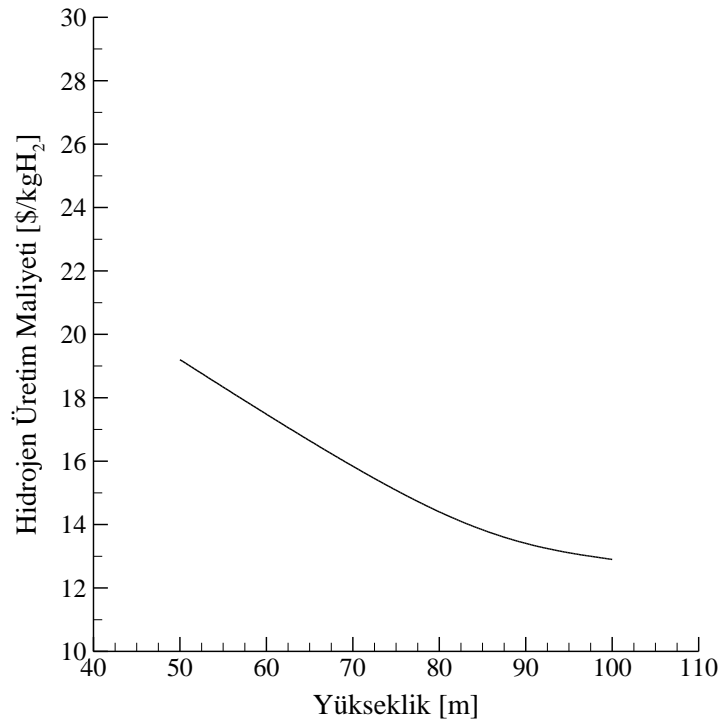
Şekil 7.16. 50 m yükseklik için 40 kW'lık 3 adet elektrolizör sisteminde zamanla depoda biriken hidrojen miktarı (Durum III).



Şekil 7.17. 80 m yükseklik için 40 kW'lık 3 adet elektrolizör sisteminde zamanla depoda biriken hidrojen miktarı (Durum III).



Şekil 7.18. 100 m yükseklik için 40 kW'lık 3 adet elektrolizör sisteminde zamanla depoda biriken hidrojen miktarı (Durum III).



Şekil 7.19. 3 adet 40 kW'lık elektrolizör sistemi için yüksekliğe bağlı olarak hidrojen üretim maliyetindeki değişim (Durum III).

Üretilen H₂ miktarına bağlı olarak depoda biriken hidrojen miktarı 50 m yükseklik için maksimum 86.2 kgH₂, 80 m yükseklik için 107.4 kgH₂ ve 100 m yükseklik için ise 132.2 kgH₂ değerlerine ulaşmıştır. Yıllık olarak elde edilen toplam H₂ miktarı 50 m yükseklik için 6.4 tonH₂, 80 m yükseklik için 7.9 tonH₂ ve 100 m yükseklik için ise 8.5 tonH₂ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler sonucunda hidrojen üretim maliyetleri ise Şekil 7.19'da görüldüğü gibi 50 m yükseklik için 19.2 \$/kgH₂, 80 m yükseklik için 14.4 \$/kgH₂ ve 100 m yükseklik için 12.9 \$/kgH₂ olmuştur.

7.4.3. Yakıt Pilinden Üretilen Enerji Miktarı

Bölüm 7.3.3'te bahsedildiği gibi hidrojen üretim miktarının artmasıyla yakıt pilinden üretilen enerji artacaktır. Bu durum için hesaplanan hidrojen üretim miktarlarına göre yakıt pilinden üretilen enerji miktarı farklı yükseklikler için Tablo 7.7'de gösterilmiştir.

Tablo 7.7. Farklı elektrolizör ve farklı yükseklik değerleri için yakıt pilinden elde edilen yıllık enerji miktarı

Yükseklik	Üretilen Enerji Miktarı [MWy]		
	50 m	80 m	100 m
120 kW 1 elektrolizör	33	49	56
40 kW 3 elektrolizör	85	104	113

Tablo 7.7'den görüldüğü gibi yakıt pilinden üretilen enerji miktarı Bölüm 7.3.3'te elde edilen değerlerden daha fazla olmuştur. Bölüm 7.3.3'teki yakıt pili üretim miktarlarının az olmasının nedeni rüzgar türbininden gelen enerjinin mekanın enerji ihtiyacından az olması durumunda bu enerji ile hidrojen üretimi yapmak yerine şebekeden enerji çekmek suretiyle mekanın enerji ihtiyacının karşılanmasını sağlamaktır.

7.4.4. Şebekeden Çekilen Enerji Miktarı

Rüzgar türbininden elde edilen enerjinin az olduğu zamanlarda depoda yeterli hidrojen bulunması durumunda yakıt pili çalıştırılarak ihtiyaç karşılanacaktır. Depoda yeterli

hidrojen bulunmuyorsa bu ihtiyaç şebekeden karşılanacaktır. Bu durumda şebekeden çekilen enerji miktarı yakıt pilinden üretilen enerji miktarı ile doğrudan ilişkilidir. Bölüm 7.4.3'te verilen yakıt pili enerji üretim değerleri dikkate alındığında ele alınan iki farklı elektrolizör durumu için şebekeden çekilen yıllık enerji miktarı Tablo 7.8'de verilmiştir.

Tablo 7.8. Farklı elektrolizör durumları ve farklı yükseklik için şebekeden çekilen yıllık enerji miktarları

Yükseklik	Şebekeden Çekilen Enerji Miktarı [MWy]		
	50 m	80 m	100 m
120 kW 1 elektrolizör	512	405	356
40 kW 3 elektrolizör	627	521	473

Tablo 7.8'de görüldüğü gibi yüksekliğin artmasıyla şebekeden alınan enerji miktarında düşüş gözlenmiştir. Şebekeden alınan enerjinin azalmasıyla ödenen ücret miktarı azalacak ve rüzgar-hidrojen enerji sisteminin maliyetinde bir iyileşme gözlenecektir.

Bu durum için rüzgar-hidrojen enerji sisteminin, mekanın enerji ihtiyacının yüzde kaçını karşıladığı hesaplanabilir. Eğer üzerinde çalışılan hayvan çiftliğinin sadece şebekeden alınan enerji ile çalıştığı düşünülürse gereken yıllık enerji miktarı ile rüzgar-hidrojen sisteminden elde edilen yıllık enerji miktarı oranlanarak ihtiyacın ne kadarlık bir kısmının rüzgar-hidrojen sisteminden karşılandığı belirlenebilir. Buna göre elde edilen değerler Tablo 7.9'da verilmiştir.

Tablo 7.9. Farklı yükseklik ve farklı elektrolizör durumları için çiftliğin enerji ihtiyacının rüzgar-hidrojen sistemi ile karşılanan kısmı

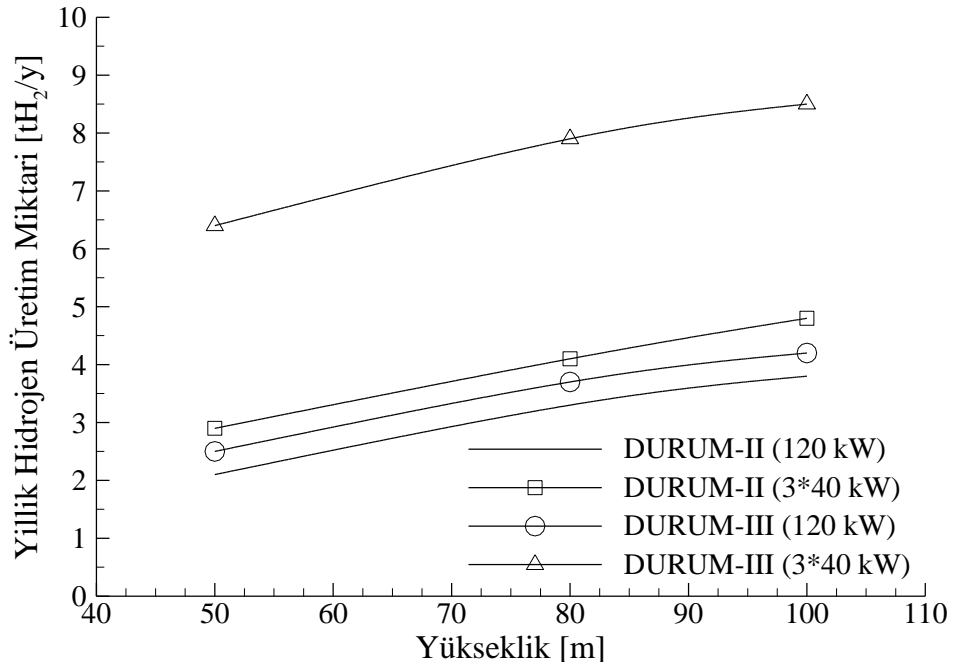
Yükseklik	Enerji ihtiyacının karşılanma oranı [%]		
	50 m	80 m	100 m
120 kW 1 elektrolizör	54.1	63.7	68.1
40 kW 3 elektrolizör	43.8	53.2	57.6

8.BÖLÜM

SONUÇ – TARTIŞMA VE ÖNERİLER

8.1. Değerlendirme

Rüzgar türbininden elde edilen enerji yüksekliğe bağlı olarak artmakta ve bununla birlikte kapasite faktörü de artmaktadır. Buna karşın yüksekliğin artmasıyla türbinden elde edilen enerji maliyeti ise azalmaktadır. Yapılan hesaplamalarda 800 kW nominal güce sahip olan rüzgar türbininin yeterli enerji üretebildiği ve maliyetinin de uygun değerde olması nedeniyle hesaplamalar bu türbine göre yapılmıştır.



Şekil 8.1. Yıllık üretilen hidrojen üretim miktarının yükseklikle değişimi.

Şekil 8.1'den görüldüğü gibi elektrolizörden üretilen hidrojen miktarının rüzgar türbininden elde edilen enerji ve elektrolizörün nominal gücüne bağlı olarak değişimi incelenmiş ve yıl boyunca en yüksek yıllık hidrojen üretim miktarının Durum III'te 40 kW nominal güce sahip elektrolizörlerde gerçekleştiği belirlenmiştir. 120 kW olarak tek bir elektrolizör sistemi kullanılan durumlarda 3 adet 40 kW'lık elektrolizör sisteminin kullanıldığı durumlara göre daha az hidrojen üretimi gerçekleşmiş ve buna bağlı olarak hidrojen üretim maliyetleri daha yüksek olmuştur. Durum III için bu değerler 120 kW elektrolizör için 100 m yükseklikte 17.1 \$/kgH₂ iken 40 kW'lık 3 adet elektrolizör için 12.9 \$/kgH₂ değerine kadar düşmüştür. Ayrıca her durum için hesaplanan üretim maliyetleri de yüksekliğin artmasıyla azalmıştır. Yine aynı durum için şebekeden çekilen enerji miktarı da yüksekliğin artmasıyla azalmıştır. Fakat burada dikkat edilmesi gereken şey, elektrolizörün nominal gücünün azaltılmasıyla şebekeden çekilen enerjinin artmasıdır. Bu, rüzgar türbininden elde edilen enerjinin ihtiyaçtan az olması durumunda hidrojen üretilmesi nedeniyle mekanın ihtiyacını karşılamadan, ihtiyaç olan enerjinin şebekeden karşılanmasından kaynaklanmıştır.

Durum II'de de yine aynı durumlar gözlenmiştir. Yapılan enerji yönetiminin, hidrojen üretim amaçlı olması durumunda bulunan hidrojen üretim maliyetleri ile ihtiyacı karşılama amaçlı olması durumundaki bulunan hidrojen üretim maliyetleri arasında fazla bir fark gözlenmemiştir. Fakat şebekeden çekilen enerji miktarının azaldığı ve bu sayede yıllık karşılanan enerji yüzdesinde artış gözlenmiştir.

Durum II ve Durum III için hesaplanan hidrojen maliyetleri arasında fazla bir fark olmadığı ve öncelikli amacın mekanın ihtiyacını karşılamak olarak düşünüldüğünde daha fazla bir hidrojen maliyeti olduğu gözlenmiştir. Buna karşın şebekeden çekilen enerji miktarının azaldığı ve dolayısıyla yıllık enerji ihtiyacının daha etkin bir şekilde rüzgar-hidrojen enerji sistemi ile karşılanabileceği görülmüştür.

Ele alınan üç farklı durum için yatırılan ilk kurulum maliyetinin kaç senede geri dönüşünün olacağını belirlemek için geri ödeme süreleri ayrı ayrı hesaplanmış ve Tablo 8.1 elde edilmiştir. Tablo 8.1'den görüldüğü gibi ortalama olarak ilk yatırım maliyeti 50 m için 10 yıl, 80 m için 8 yıl ve 100 m için ise 7 yıl olmuştur. Ele alınan birinci duruma bakılacak olursa diğer durumlardan daha kısa bir geri ödeme süresi bulunmuştur. Bunun nedeni, bu durumda sadece rüzgar türbini ve şebeke kullanılmış olmasıdır. Yani bu

durum için ayrıca bir elektrolizör maliyeti bulunmamaktadır. Bu yüzden geri ödeme süresinde bir kısalma olmuştur.

Tablo 8.1. Ele alınan her durum için elde edilen geri ödeme süreleri [yıl].

	DURUM I	DURUM II		DURUM III	
Yükseklik (m)		40 kW- 3 elektrolizör	120 kW tek elektrolizör	40 kW- 3 elektrolizör	120 kW tek elektrolizör
50	8.4	10.4	10.5	12.8	10.4
80	6.7	8.4	8.5	9.9	8.4
100	6	7.6	7.7	8.9	7.6

8.2. Sonuçlar ve Öneriler

Ülkemizin enerji yarışında diğer ülkelerden geri kalmaması açısından gelecekteki enerji ihtiyacını karşılayabilmek için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmesi ve bu kaynakların kullanımının yaygınlaştırılması gündemde olan bir konudur. Bu sayede ileride fosil kaynaklı yakıtların tükenmesi durumunda dışa bağımlı bir politika yerine kendi kaynaklarını kullanarak enerji ihtiyacını karşılaması gerekmektedir. Bu nedenle belirli yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına yönelik olarak yapılan bu tez çalışmasındaki yöntemler bu enerji kaynaklarının kullanımına bir örnek oluşturacak ve enerji ekonomisine katkı sağlayacaktır. Yapılan tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ışığında aşağıdaki öneriler yapılabilir:

- Rüzgar-hidrojen hibrid enerji sistemine fotovoltaik panellerin eklenmesiyle bu sistem daha etkin bir şekilde kullanılabilir.
- Sistemde birden fazla rüzgar türbini ve elektrolizör sistemi kullanılması durumunda enerji ihtiyacının karşılanma oranı artırılabilir.
- Sistemde rüzgar türbini sayısı artırılarak daha fazla hidrojen üretimi gerçekleştirilebilir ve üretilen bu hidrojen araçlarda veya hidrojen dolun istasyonlarında kullanılmak üzere sistem dışına taşınabilir.

KAYNAKÇA

1. Stiebler, M., Wind Energy Systems For Electric Power Generation. Springer Series in Green Energy and Technology, 193 pp.
2. Statistical Review of World Energy, 2011, Web Sayfası: <http://www.bp.com>, Erişim Tarihi: Temmuz, 2011
3. Köne, A.Ç., 2007, An Analytical Network Process (ANP) evaluation of alternative fuels for electricity generation in Turkey, **Energy Policy**, **35**: 5220-5228.
4. Renne, D.S., Marion, W., Maxwell, G.L., Rymes, M., Philips, J., Berg, D.E., Franklin, M.A., Brown, R.C., 2007, Availability of Renewable Resources, 19-72, *In*: Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy, CRC Press, New York.
5. Elektrik işleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü (EİE), 2011, (Web Sayfası: www.eie.gov.tr), (Erişim Tarihi: Temmuz 2011).
6. Eco Alternative Energy, 2011, (Web Sayfası: <http://www.ecoenrg.com>), (Erişim Tarihi: Temmuz 2011).
7. Durak, M., Rüzgar Ölçüm. (Web Sayfası: <http://www.enermet.com.tr>), (Erişim Tarihi: Temmuz 2011).
8. Ataseven, M.S., Ataseven, S., Rüzgar Ölçüm Sistemleri, (Web Sayfası: <http://www.emo.org.tr>), (Erişim Tarihi: Temmuz 2011).
9. Celik, A. N., 2003, A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey. **Renewable Energy**, **29**: 593-604.
10. Europa – European Commission, 2011, (Web Sayfası: <http://ec.europa.eu>), (Erişim Tarihi: Temmuz 2011).
11. Nurbay, N., Çınar, A., Rüzgar Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle Kıyaslanması. (Web Sayfası: <http://www.emo.org.tr>), (Erişim Tarihi: Temmuz 2011).

12. Renewable Energy UK, 2011, (Web Sayfası: <http://www.reuk.co.uk>), (Erişim Tarihi: Temmuz 2011).
13. Şen, Ç., 2003, Gökçeada'nın Elektrik Enerjisi İhtiyacının Rüzgar Enerjisi İle Karşılanması, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, 128 s.
14. Bilgili, M., Sahin, B., Kahraman, 2004, A. Wind energy potential in Antakya and Iskenderun regions, Turkey. **Renewable Energy** **29**: 1733-1745.
15. Sahin, B., Bilgili, M., and Akilli, H., 2005, The wind power potential of the eastern Mediterranean region of Turkey. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, **93**: 171-183.
16. Bilgili, M., Sahin, B., 2009, Investigation of wind energy density in the southern and southwestern region of Turkey. **Journal of Energy Engineering-ASCE**, **135**:12-20.
17. Sahin, B., Bilgili, M., 2009, Wind characteristics and energy potential in Belen-Hatay, Turkey. **International Journal of Green Energy**, **6**: 157-172.
18. İlkilic , C., Turkbay ,I., 2010, Determination and utilization of wind energy potential for Turkey, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **14**: 2202-2207.
19. Erdogdu , E., On the wind energy in Turkey, 2009, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **13**: 1361-1371.
20. Ogulata, R.T., 2003,Energy sector and wind energy potential in Turkey, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **7**: 469-484.
21. Kaygusuz, K., 2003, Renewable energy potential and utilization in Turkey, **Energy Conversion and Management**, **44**: 459-478.
22. Evrendilek, F., Ertekin , C., 2003, Assessing the potential of renewable energy sources in Turkey, **Renewable Energy**, **28**: 2303-2315.

23. Ozgur, M.A., 2008, Review of Turkey's renewable energy potential, **Renewable Energy**, **33**: 2345-2356.
24. Akdag , S.A., Dinler ,A., 2009, A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications, **Energy conversion and management**, **50**: 1761-1766.
25. Akdag, S.A., Guler, O., 2010, Evaluation of wind energy investment interest and electricity generation cost analysis for Turkey, **Applied Energy**, **87**: 2574-2580.
26. Guler, O., 2009, Wind energy status in electrical energy production of Turkey, **Renewable and Sustainable Energy Reviews** **13**: 473-478
27. Kaygusuz, K., 2010, Wind energy status in renewable electrical energy production in Turkey, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **14**: 2104-2112
28. Alboyaci, B., Dursun, B., 2008, Electricity restructuring in Turkey and the share of wind energy production, **Renewable Energy**, **33**: 2499- 2505
29. Karsli, V. M., Gecit, C., 2003, An investigation on wind power potential of Nurdagi- Gaziantep, Turkey. **Renewable Energy**, **28**: 823-830.
30. Akpınar, E. K., and Akpınar, S., 2004, Determination of the wind energy potential for Maden-Elazığ, Turkey. **Energy Conversion and Management**, **45**: 2901-2914.
31. Dündar, C., 1997, Bandırma, Bodrum, Bozcaada ve Çesme Bölgeleri İçin Rüzgar Enerjisi Potansiyellerinin Belirlenmesi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 86 s.
32. Toklu, M., 2002, Rüzgar Enerjisi ve Elazığ Şartlarında Bir Rüzgar Santrali Tasarımı, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 98 s.
33. Karakaya, S., 2009, Eskisehir - Kutahya - Bilecik İllerinde Ruzgar Potansiyellerinin Analizi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 109 s.

34. Uçar, S., 2007, Rüzgar Enerjisiyle Elektrik Üretimi ve Kayseri İli İçin Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 114 s.
35. Şimşek, V., 2007, Rüzgar Enerjisi ve Sivas Şartlarında Bir Rüzgar Santrali Tasarımı, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 91 s.
36. Ozgener, L., 2010, Investigation of wind energy potential of Muradiye in Manisa, Turkey, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **14**: 3232-3236.
37. Kose, R., 2004, An evaluation of wind energy potential as a power generation source in Kutahya, Turkey, **Energy Conversion and Management**, **45**: 1631-1641.
38. Kose, R., Ozgur, M. A., Erbas, O., and Tugcu, A., 2004, The analysis of wind data and energy potential in Kutahya, Turkey. **Renewable Sustainable Energy Review**, **8**: 277-288.
39. Celik, A.N., 2007, A techno-economic analysis of wind energy in southern Turkey. **Int. J. Green Energy**, **4**: 233-247.
40. Ozerdem, B., Turkeli, M., 2003, An investigation of wind characteristics on the campus of Izmir Institute of Technology, Turkey, **Renewable Energy**, **28**: 1013-1027
41. Ozerdem, B., Ozer, S., Tosun, M., 2006, Feasibility study of wind farms: A case study for Izmir, Turkey. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, **94**:725-743.
42. Kocatepe, C., İnan, A., Arikan, O., Yumurtaci, R., Kekezoglu, B., Baysal, M., Bozkurt, A., Bozkurt, Akkay, Y., 2009, Power quality assessment of grid-connected wind farms considering regulations in Turkey, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **13**: 2553-3561.

43. Mutlu, O.S., Akpınar, E., Balıkcı, A., 2009, Power quality analysis of wind farm connected to Alacati substation in Turkey, **Renewable Energy**, **34**: 1312-1318.
44. Eskin, N., Artar, H., Tolun, S., 2008, Wind energy potential of Gokceada Island in Turkey, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **12**: 839-851.
45. Ucar, A., Balo, F., 2009, Investigation of wind characteristics and assessment of wind-generation potentiality in Uludağ-Bursa, Turkey, **Applied Energy**, **86**: 333-339.
46. Ucar, A., Balo, F., 2010, Assessment of wind power potential for turbine installation in coastal areas of Turkey, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **14**: 1901-1912.
47. Onat, N., Ersoz, S., 2011, Analysis of wind climate and wind energy potential of regions in Turkey, **Energy**, **36**: 148-156.
48. Gokcek, M., Bayulken, A., and Bekdemir, S., 2007, Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Kirklareli, Turkey. **Renewable Energy**, **32**: 1739- 1752.
49. Gokcek, M., Erdem, H.H., Bayulken, A., 2007, A techno-economical evaluation for installation of suitable wind energy plants in Western Marmara, Turkey. **Energy Exploration & Exploitation**, **25** (6): 407-428.
50. Genc, M.S., Gokcek, M., 2009, Evaluation of wind characteristics and energy potential in Kayseri, Turkey. **Journal of Energy Engineering-ASCE**, **135**: 33-43.
51. Gokcek, M., Genc, M.S., 2009, Evaluation of electricity generation and energy cost of wind energy conversion systems (WECSs) in Central Turkey. **Applied Energy**, **86**: 2731-2739.
52. Jowder, F.A.L., 2009, Wind power analysis and site matching of wind turbine generators in Kingdom of Bahrain, **Applied Energy**, **86**: 538-545.

53. Fyrippis, I., Axaopoulos, P.J., Panayiotou, G., 2010, Wind energy potential assessment in Naxos Island, Greece, **Applied Energy**, **87**: 577-586.
54. Chang, T.P., 2011, Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application, **Applied Energy**, **88**: 272-282.
55. Rehman, S., Halawani, T.O., Husain, T., 1994, Weibull parameters for wind speed distribution in Saudi Arabia, **Solar Energy**, **53 (6)**: 473-479.
56. Ilinca, A., McCarthy, E., Chaumel, J.L., Retiveau, J.L., 2003, Wind potential assessment of Quebec Province, **Renewable Energy**, **28**:1881-1897.
57. Keyhani, A., Varnamkhasti, M.G., Khanali, M., Abbaszadeh, R., 2010, An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran, **Energy**, **35**: 188-201.
58. Dahmouni, A.W., Salah, M.B., Askri, F., Kerkeni, C., Nasrallah, S.B., 2011, Assessment of wind energy potential and optimal electricity generation in Borj-Cedria, Tunisia, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **15**: 815-820.
59. Fagbenle, R.O., Katende, J., Ajayi, O.O., Okeniyi, J.O., 2011, Assessment of wind energy potential of two sites in North-East, Nigeria, **Renewable Energy**, **36**: 1277-1283.
60. Shata, A.S.A., Hanitsch, R., 2008, Electricity generation and wind potential assessment at Hurghada, Egypt, **Renewable Energy**, **33**: 141-148.
61. Li, M., Li, X., 2005, Investigation of wind characteristics and assessment of wind energy potential for Waterloo region, Canada, **Energy Conversion and Management**, **46**: 3014-3033.
62. Al-Mohamad, A., Karmeh, H., 2003, Wind energy potential in Syria, **Renewable Energy**, **28**: 1039–1046.

63. Pant, K.K., Gupta, R.B., 2008, Fundamentals and Use of Hydrogen as a Fuel, pp. 3-32, Hydrogen Fuel: Production, Transport, and Storage, CRC Press, US.
64. European Commission, 2003, Hydrogen Energy and Fuel Cells: A vision of our future, 35 s.
65. Steam Reforming Hydrogen for both Waste Management and Hydrogen Production, 2011, (Web Sayfası: <http://www.making-hydrogen.com>), (Erişim Tarihi: Temmuz 2011).
66. Yürüm, Y., Hydrogen energy system: production and utilization of hydrogen and future aspects, Kluwer Academic Publishers, London.
67. Fuel Cell Handbook. (Seventh Edition). By. EG&G Technical Services, Inc. Under Contract No. DE-AM26-99FT40575. U.S. Department of Energy, 2004
68. Kasahara, S., Kubo, S., Hino, R., Kaoru, O., Nomura, M., Nakao, S., 2007, Flowsheet study of the thermochemical water-splitting iodine-sulfur process for effective hydrogen production, **International Journal of Hydrogen Energy**, **32**: 489-496
69. Naterer, G.F., Suppiah, S., Stolberg, L., Lewis, M., Wang, Z., Daggupati, V., Gabriel, K., Dincer, I., Rosen, M.A., Spekkens, P., Lvov, S.N., Fowler, M., Tremaine, P., Mostaghimi, J., Easton, E.B., Trevani, L., Rizvi, G., Ikeda, B.M., Kaye, M.H., Lu, L., Pioro, I., Smith, W.R., Secnik, E., Jiang, J., Avsec, J., 2010, Canada's program on nuclear hydrogen production and the thermochemical Cu-Cl cycle, **International Journal of Hydrogen Energy**, **35**: 10905-10926.
70. McQuillan, B.W., Brown, L.C., Besenbruch, G.E., Tolman, R., Cramer, T., Russ, B.E., 2002, High efficiency generation of hydrogen fuels using solar thermochemical splitting of water, Annual report, GA-A24972, CA.
71. Eden, M., 2011, International Summer School of PEM Applications and Integration, Izmir, Turkey.

72. Clarke, R.E., Giddey, S., Badwal, S.P.S., 2010, Stand-alone PEM water electrolysis system for fail safe operation with a renewable energy source, **International Journal of Hydrogen Energy**, **35**: 928-935.
73. Saxena, S., Kumar, S., Drozd, V., A modified steam-methane-reformation reaction for hydrogen production, **International Journal of Hydrogen Energy**, **36**: 4366-4369
74. Ding, Y., Alpay, E., Adsorption-enhanced steam-methane reforming, **Chemical Engineering Science**, **55**: 3929-3940
75. Barelli, L., Bidini, G., Gallorini, F., Servili, S., Hydrogen production through sorption-enhanced steam methane reforming and membrane technology: A review, **Energy**, **33** (4): 554-570.
76. Genç, G., 2010, Hydrogen production potential of APEX fusion transmuted fueled minor actinide fluoride, **International Journal of Hydrogen Energy**, **35**: 10190-10201.
77. Özişik, G., Demir N., Übeyli M., Yapıcı H., 2010, Hydrogen production via water splitting process in a molten-salt fusion breeder, **International Journal of Hydrogen Energy**, **35**:7357-7368.
78. Graf, D., Monnerie, N., Roeb, M., Schmitz, M., Sattler C., 2008, Economic comparison of solar hydrogen generation by means of thermochemical cycles and electrolysis, **International Journal of Hydrogen Energy**, **33**: 4511-4519.
79. Gonzales, R.B., Law, V.J., Prindle, J.C., 2009, Analysis of the hybrid copper oxide–copper sulfate cycle for the thermochemical splitting of water for hydrogen production, **International Journal of Hydrogen Energy**, **34**: 4179-4188.
80. Atlam, O., Barbir, F., Bezmalinovic, D., 2011, A method for optimal sizing of an electrolyzer directly connected to a PV module, **International Journal of Hydrogen Energy**, **36**: 7012-7018.

81. Akyüz E., Coşkun, C., Oktay, Z., Dinçer, İ., 2011, Hydrogen production probability distributions for a PV-electrolyser system, **International Journal of Hydrogen Energy**, **36**: 11292-11299.
82. Joshi, A.S., Dincer I., Reddy, B.V., 2011, Solar hydrogen production: A comparative performance assessment, **International Journal of Hydrogen Energy**, **36**: 11246-11257.
83. Sherif, S.A., 2005, Wind energy and the hydrogen economy—review of the technology, **Solar Energy**, **78**: 647-660.
84. Geer, T., Manwell, J.F., McGowan, G., 2005, A Feasibility Study of a Wind/Hydrogen System for Martha's Vineyard, American Wind Energy Association, Windpower 2005 Conference, Massachusetts.
85. Honnery, D., Moriarty, P., 2009, Estimating global hydrogen production from wind, **International Journal of Hydrogen Energy**, **34**: 727-736.
86. Rodriguez, C.R., Riso, M, Yob, G.J., Ottogalli, R, Cruz, R.S., Aisa, S, Jeandrevin, G, Leiva, E.P.M., 2010, Analysis of the potential for hydrogen production in the province of Co'rdoba, Argentina, from wind resources, **International Journal of Hydrogen Energy**, **35**: 5952–5956.
87. Bernal-Agustin, J. L., Dufo-Lo'pez, R., 2008, Hourly energy management for grid-connected wind–hydrogen systems, **International Journal of Hydrogen Energy**, **33**: 6401-6413.
88. Bechrakis, D.A., McKeogh, E.J., Gallagher P.D., 2005, Simulation and operational assessment for a small autonomous wind–hydrogen energy system, Sustainable Energy Research Group, Department of Civil and Environmental Engineering, May 2005, University College Cork, College Road, Cork, Ireland.
89. Archer, C.L., Jacobson, M. Z. (2005). Evaluation of global wind power. **Journal of Geophysical Research**, Vol. 110, No. D12, pp. D12110.1-D12110.20.

90. Li, CH, Zhu, XJ, Cao, GY, Sui, S, Hu, MR, 2009, Dynamic modeling and sizing optimization of stand-alone photovoltaic power systems using hybrid energy storage technology, **Renewable Energy**, **34**: 815–826.
91. Sathyajith, M., 2006, Wind Energy Fundamentals, **Resource Analysis and Economics**, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York.
92. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMI), 2011, (Web Sayfası: <http://ww.dmi.gov.tr>), (Erişim Tarihi: Temmuz 2011).

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Muhammet ÇELİK

Uyruğu: Türkiye (TC)

Doğum Tarihi ve Yeri: 12 Aralık 1986, Kayseri

Medeni Durumu: Bekâr

Tel: +90 382 288 23 63

Fax: +90 382 280 22 98

email: clk.muhammet@gmail.com

Yazışma Adresi: Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği
Bölümü 68100 Aksaray

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	EÜ Mühendislik Fakültesi	--
Lisans	NÜ Makine Mühendisliği	2009
Lise	Argıncık Lisesi, Kayseri	2005

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
06/2007- 07/2007	DSİ XII. Bölge Müdürlüğü Makine İkmal Dairesi / KAYSERİ	Stajyer
06/2008- 07/2008	Erbosan Erciyas Boru Sanayi ve Ticaret A.Ş. / KAYSERİ	Stajyer
09/2009- Halen	Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim Dalı	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce