



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

RÜZGAR ENERJİSİ DESTEKLİ HİDROJEN
ÜRETİM SİSTEMLERİNİN TEKNO-EKONOMİK ANALİZİ

HAKAN UÇAR

EYLÜL 2012

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

RÜZGAR ENERJİSİ DESTEKLİ HİDROJEN ÜRETİM SİSTEMLERİNİN
TEKNO-EKONOMİK ANALİZİ

HAKAN UÇAR

Yüksek Lisans Tezi

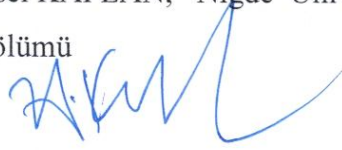
Danışman

Yrd. Doç. Dr. Murat GÖKÇEK

Eylül 2012

Hakan UÇAR tarafından **Yrd.Doç.Dr.Murat GÖKÇEK** danışmanlığında hazırlanan
“ **Rüzgar Enerjisi Destekli Hidrojen Üretim Sistemlerinin Tekno-Ekonomik Analizi** ”
adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine
Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç.Dr. Yüksel KAPLAN, Niğde Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü



Üye : Yrd.Doç.Dr. Nureddin DİNLER, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü



Üye : Yrd.Doç.Dr. Murat GÖKÇEK, Niğde Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü



ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri
tarafından/...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun
......./...../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Osman SİVRİKAYA

MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Hakan Uçar

ÖZET

RÜZGAR ENERJİSİ DESTEKLİ HİDROJEN ÜRETİM SİSTEMLERİNİN TEKNO-EKONOMİK ANALİZİ

UÇAR, Hakan
Niğde Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman :Yrd. Doç. Dr. Murat GÖKÇEK

Eylül 2012, 100 sayfa

Bu tez çalışması kapsamında, günümüzde bir enerji taşıyıcısı ve kaynağı olarak önemini giderek artırmakta olan hidrojenin rüzgar enerjisi destekli elektrolizör sisteminde üretiminin teknik ve ekonomik analizi yapılmıştır. İzmir-Aliağa rüzgar gözlem istasyonuna ait 2010 yılı rüzgar verileri kullanılarak bu bölgenin rüzgar enerjisi potansiyeli incelenmiştir. Rüzgar karakteristikleri belirlenirken rüzgar hızları için Weibull ve Rayleigh dağılımları incelenmiş, Weibull dağılım parametreleri (k ve c) Grafik, Maksimum Olabilirlik (MLH), Standart Sapma-Ortalama Hız (SS-OH) ve Enerji Model Faktörü (EPF) yöntemleriyle belirlenmiştir. Sonuçlar hata analizi yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. 100 kgH₂/gün kapasiteli bir sistem göz önünde bulundurularak elektrik enerjisi ve hidrojen üretimi incelenmiştir. Bir Değere Getirilmiş Maliyet Metodu kullanılarak birim elektrik enerjisi ve hidrojen üretim maliyeti hesaplanmıştır. SS-OH Metoduna göre Weibull şekil parametresi (k) 2.13, ölçek parametresi (c) 8.80 m/s olarak ve ayrıca bölgenin güç yoğunluğu değeride 520.71 W/m² olarak hesaplanmıştır. 100 kgH₂/gün kapasiteli sistemin 1000 kW nominal gücünde rüzgar türbini ile çalıştırılması durumunda en düşük hidrojen maliyeti 4.5288 \$/kgH₂ olarak birim elektrik enerjisi maliyeti ise 0.0321 \$/kWh olarak hesaplanmıştır.

*Anahtar Sözcükler:*Rüzgar enerjisi, Weibull dağılımı, maliyet analizi, hidrojen üretimi, elektroliz

SUMMARY

TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF WIND ENERGY POWERED-HYDROGEN GENERATION SYSTEMS

UÇAR, Hakan

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Assistant Professor Dr. Murat GÖKÇEK

September 2012, 100 pages

Role of hydrogen as an energy carrier has been increasing day by day; in this regard, within the scope of this study, techno-economic analysis of hydrogen production in a wind-powered electrolyzer system has been conducted. Wind energy potential of İzmir-İzmir Aliğa has been investigated for the year 2010. In wind characteristics investigations, Weibull and Rayleigh distributions have been predicted, and Weibull parameters, k and c , have been calculated by using Graphical, Maximum Likelihood, Standard deviation-mean speed, and Energy pattern factor methods. To analyze the efficiency of these methods, the error analysis tests are used. Electricity and hydrogen production costs have been calculated by using the Levelized Cost Method. Weibull shape parameter (k) and scale parameter (c) and so annual power density have been calculated as 2.13, 8.80 m/s, 520.71 W/m², respectively. In the hydrogen production system with wind turbine-1000 kW nominal power, electricity and hydrogen cost has been calculated as 0.0321 \$/kWh, 4.5288 \$/kgH₂, that these values are minimal values, respectively.

Keywords: Wind energy, Weibull distribution, cost analysis, hydrogen production, and electrolysis.

ÖNSÖZ

Elektrik enerjisinin yanında bir enerji taşıyıcısı olarak günümüzde giderek önem kazanan hidrojenin doğaya olumsuz etkileri olan klasik üretim yöntemlerinin dışında elektroliz ile rüzgar enerjisi gibi temiz ve doğal kaynak kullanarak üretilmesi sürdürülebilir enerji için büyük önem taşımaktadır. Tez konumun belirlenmesi aşamasında ve tez çalışmam sırasında, yol gösteren, ilgi ve desteğini esirgemeyen danışmanım Yrd. Doç.Dr. Murat GÖKÇEK'e, Niğde Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyelerine, en sıkıntılı zamanlarımda desteklerini sürekli hissettiğim eşime, anneme, babama ve tüm aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGE VE KISALTMALAR	xii
BÖLÜM I	1
GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı	2
1.2. Dünyada ve Türkiye’de Enerji Durumu	2
1.3. Dünyada Rüzgar Enerjisi	13
1.4. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi	15
1.3. Literatür Araştırması	18
1.3.1. Rüzgar karakteristiklerinin belirlenmesi ve enerji üretimi konularında yapılan çalışmalar	18
1.3.2. Hidrojen üretiminde rüzgar enerjisi kullanımıyla ilgili yapılan çalışmalar	22
BÖLÜM II	26
RÜZGAR ENERJİSİ VE HİDROJEN ÜRETİM YÖNTEMLERİ	26
2.1. Rüzgar Enerjisi	26
2.2. Hidrojen ve Hidrojen Üretim Yöntemleri	30
2.2.1. Hidrojenin özellikleri	30
2.2.2. Hidrojen üretim yöntemleri ve elektroliz	33
2.2.3. Rüzgar enerjisinden hidrojen üretimi	35
2.3. Rüzgar Enerjisi Destekli Hidrojen Üretim Sistemlerinin Çeşitli Uygulamaları	36
2.3.1. Şebekeden bağımsız rüzgar-hidrojen üretim sistemi	36
2.3.2. Şebeke destekli rüzgar-hidrojen sistemi	36
2.3.3. Rüzgar enerjisi üretim sisteminden üretilen fazla enerjinin hidrojen üretiminde kullanıldığı sistem	37

2.3.4. Bütünleştirilmiş rüzgar-hidrojen enerji sistemi.....	38
2.3.5. Şebekeden bağımsız bütünleştirilmiş rüzgar-hidrojen üretim sistemi.....	38
BÖLÜM III	40
TEORİK ESASLAR VE HESAPLAMA YÖNTEMİ	40
3.1.Rüzgar Enerjisi ve Karakteristikleri Hesap Yöntemleri	40
3.1.1. Temel denklemler	40
3.1.2.Rüzgar hız verileri için kullanılan dağılımlar	41
3.1.2.1. Weibull dağılımı	41
3.1.2.2.Rayleigh dağılımı	42
3.1.3.Weibull Parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler.....	42
3.1.3.1.Grafik yöntem.....	43
3.1.3.2.Standart sapma-ortalama hız yöntemi.....	43
3.1.3.3.Enerji model faktörü yöntemi.....	44
3.1.3.4.Maksimum olabilirlik yöntemi.....	45
3.2.Hata Analizi	45
3.3. Güç Yoğunluğu Hesapları.....	46
3.4. Rüzgar Hızının Yükseklikle Değişimi.....	46
3.5. Enerji Üretimi Hesabı	47
3.6. Hidrojen Üretiminin Hesaplanması	48
3.7. Hidrojen Kompresörü	50
3.8. Ekonomik Değerlendirme	50
4.1. Rüzgar Kaynağı.....	53
4.2. Sistem Konfigürasyonu.....	53
4.3. Rüzgar Hızı	57
4.4. Olasılık Dağılım Fonksiyonları (ODF).....	58
4.5. Rüzgar Gücü Yoğunluğu	74
4.6. Enerji Üretimi ve Tüketimi	76
4.7. Ekonomik Analiz.....	84
BÖLÜM V	91
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	91
KAYNAKLAR	93
ÖZGEÇMİŞ.....	100

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Farklı senaryolara ve yakıtlara göre dünya birincil enerji talebi (Mtep)	5
Çizelge 1.2. Enerji kaynağına göre kapasite ve üretim oranları	11
Çizelge 1.3. Sera gazı emisyonlarının yıllara göre değişimi	12
Çizelge 1.4. Türkiye’de işletme halindeki rüzgar enerjisi santralleri	17
Çizelge2.1. Hidrojenin özellikleri	31
Çizelge 4.1.Sistem elemanlarının özellikleri ve maliyet bilgileri.....	55
Çizelge 4.2. Kullanılan rüzgar türbinlerinin teknik özellikleri.....	56
Çizelge 4.3.Weibull parametrelerinin tespitinde kullanılan yöntemlerin aylara göre karşılaştırılması	60
Çizelge 4.4. Weibull parametrelerinin tespitinde kullanılan yöntemlerin yıl ve mevsimlere göre karşılaştırılması	61
Çizelge 4.5. Farklı yöntemlere göre belirlenen Weibull şekil (k) ve ölçek (c) parametrelerinin aylara göre değişimi.....	62
Çizelge 4.6. Farklı yöntemlere göre belirlenen Weibull şekil (k) ve ölçek (c) parametrelerinin yıla ve mevsimlere göre değişimi	62
Çizelge 4.7.Güç yoğunluğu değerlerinin gözlem, Weibull, Rayleigh dağılımlarına göre değişimi	75
Çizelge 4.8. Farklı rüzgar türbini kullanım durumunda enerji akışı	80
Çizelge 4.9.Birim elektrik enerjisi maliyeti [\$/kWh] -700 \$/kW	85
Çizelge 4.10.Birim elektrik enerjisi maliyeti [\$/kWh] -1000 \$/kW	85
Çizelge 4.11. Hidrojen maliyeti [\$/kgH ₂] -700 \$/kW	86
Çizelge 4.12. Hidrojen maliyeti [\$/kgH ₂] -1000 \$/kW	87
Çizelge 4.13. Sistemde kullanılan elektrik enerjisinin şebekeden sağlanması durumunda hidrojen üretim maliyeti [\$/kg]	87

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. 2009 yılında dünya toplam birincil enerji arzının kaynak türüne göre değişimi	3
Şekil 1.2. Farklı senaryolara göre dünya birincil enerji talebindeki değişim	4
Şekil 1.3. Türkiye'nin toplam birincil enerji kaynakları arzı (1973-2008)	8
Şekil 1.4. Kaynaklara göre Türkiye'nin toplam enerji tüketimi (1973-2008)	9
Şekil 1.5. Kaynaklara göre Türkiye'nin elektrik enerjisi üretimi (1973-2008)	10
Şekil 1.6. Sektöre göre Türkiye'nin elektrik enerjisi tüketimi (1973-2008)	11
Şekil 1.7. Farklı bölgere göre dünya rüzgar enerjisi kurulu gücü	13
Şekil 1.8. Dünya kurulu güç kapasitesinde ilk on ülke	14
Şekil 1.9. Türkiye'de 30 m yükseklikte rüzgar hızı dağılımları	16
Şekil 1.10. Türkiye'de 50 m yükseklikte rüzgar güç yoğunluğu dağılımları	16
Şekil 2.1. Eksene ve kanat sayısına göre rüzgar türbinleri	29
Şekil 2.2. Hidrojen enerji dönüşümü	32
Şekil 2.3. Şebekeden bağımsız rüzgar-hidrojen enerji sistemi	36
Şekil 2.4. Şebeke destekli rüzgar-hidrojen sistemi	37
Şekil 2.5. Fazla elektrik enerjisinin hidrojen üretiminde kullanılması	37
Şekil 2.6. Bütünleştirilmiş rüzgar-hidrojen enerji sistemi	38
Şekil 2.7. Şebekeden bağımsız bütünleştirilmiş rüzgar-hidrojen üretim sistemi	39
Şekil 3.1. PEM elektrolizör ve çalışma prensibi	49
Şekil 4.1. İzmir-Aliaga rüzgar gözlem istasyonu	53
Şekil 4.2. Rüzgar türbini-hidrojen üretim sistemi	54
Şekil 4.3. Rüzgar türbini-hidrojen üretim sisteminde enerji yönetimi	55
Şekil 4.4. Sistemde ele alınan rüzgar türbinlerinin güç eğrileri	56
Şekil 4.5. 2010 yılı için aylara göre ortalama rüzgar hızları [30 m]	57
Şekil 4.6. Saatlik ortalama hızlar [30 m]	58
Şekil 4.7. Yıllık rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı	63
Şekil 4.8. Ocak ayı rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı	66
Şekil 4.9. Şubat ayı rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı	67
Şekil 4.10. Mart ayı rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı	67
Şekil 4.11. Nisan ayı rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı	68
Şekil 4.12. Mayıs ayı rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı	68
Şekil 4.13. Haziran ayı rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı	69
Şekil 4.14. Temmuz ayı rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı	69
Şekil 4.15. Ağustos ayı rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı	70
Şekil 4.16. Eylül ayı rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı	70
Şekil 4.17. Ekim ayı rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı	71
Şekil 4.18. Kasım ayı rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı	71

Şekil 4.19. Aralık ayı rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı	72
Şekil 4.20. Sonbahar mevsimi rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı	72
Şekil 4.21. Kış mevsimi rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı	73
Şekil 4.22. İlkbahar mevsimi rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı	73
Şekil 4.23. Yaz mevsimi rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı	74
Şekil 4.24. Yıllık güç yoğunluğu dağılımı	75
Şekil 4.25. 250 kW rüzgar türbini için enerji üretiminin değişimi	76
Şekil 4.26. 300 kW rüzgar türbini için enerji üretiminin değişimi	77
Şekil 4.27. 450 kW'lık rüzgar türbini için enerji üretiminin değişimi	77
Şekil 4.28. 600 kW'lık rüzgar türbini için enerji üretiminin değişimi	78
Şekil 4.29. 800 kW'lık rüzgar türbini için enerji üretiminin değişimi	78
Şekil 4.30. 1000 kW'lık rüzgar türbini için enerji üretiminin değişimi	79
Şekil 4.31. 250 kW'lık rüzgar türbinli sistemde üretilen ve tüketilen enerji miktarları	81
Şekil 4.32. 300 kW'lık rüzgar türbinli sistemde üretilen ve tüketilen enerji miktarları	81
Şekil 4.33. 450 kW'lık rüzgar türbinli sistemde üretilen ve tüketilen enerji miktarları	82
Şekil 4.34. 600 kW'lık rüzgar türbinli sistemde üretilen ve tüketilen enerji miktarları	82
Şekil 4.35. 800 kW'lık rüzgar türbinli sistemde üretilen ve tüketilen enerji miktarları	83
Şekil 4.36. 1000 kW'lık rüzgar türbinli sistemde üretilen ve tüketilen enerji miktarları	83
Şekil 4.37. Elektrolizör-kompresör sisteminin sadece rüzgar enerjisi kullanma süreleri	84
Şekil 4.38. Elektrik enerjisi maliyetinin r 'ye göre değişimi	86
Şekil 4.39. Elektrik enerjisi maliyetinin r 'ye göre değişimi	88
Şekil 4.40. Hidrojen üretim maliyetinin rüzgar türbin gücüne göre değişimi [$I_{RT}=700$ \$/kW]	88
Şekil 4.41. Hidrojen üretim maliyetinin rüzgar türbin gücüne göre değişimi [$I_{RT}=1000$ \$/kW]	89
Şekil 4.42. Elektrik enerjisi maliyetinin rüzgar hızına göre değişimi	90
Şekil 4.43. Hidrojen maliyetinin rüzgar hızına göre değişimi	90

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
a	Regreasyon sabitleri
A	Kesit alanı
α	Güç kanunu üssü
c	Weibull ölçek parametresini
C_p	Güç katsayısı, Sabit basınçta özgül ısı
Γ	Gama fonsiyonu
C_{A1}	Şebekeden alınan elektrik enerjisinin yıllık maliyeti
C_{A2}	Rüzgar türbininden alınan elektrik enerjisinin yıllık maliyeti
C_{Ele}	Elektrolizör maliyeti
$C_{Ele-i\&b}$	Elektrolizör işletme bakım maliyeti
C_{Disp}	Dispenser maliyeti
$C_{Inverter}$	İnverter maliyeti
$C_{Inverter-i\&b}$	İnverter işletme bakım maliyeti
$C_{Kurulum}$	Kurulum maliyeti
C_{Komp}	Kompresörün maliyeti
$C_{Komp-i\&b}$	Kompresör işletme bakım maliyeti
C_{RT}	Rüzgar türbini maliyeti
$C_{RT-i\&b}$	Rüzgar türbinin yıllık işletme bakım maliyeti
C_{Tank}	Tank maliyeti
$C_{Tank-i\&b}$	Tank işletme bakım maliyeti
E_p	Enerji üretimi
F	Faraday sabiti
f_R	Rayleigh dağılımı
F_R	Kümülatif Rayleigh Dağılımı
f_w	Weibull dağılımı
F_w	Kümülatif Weibull Dağılımı

g_{Elektrik}	Elektrik enerjisi maliyeti
I_{RT}	Özgöl Türbin Maliyeti
k	Weibull şekil parametresi
$\dot{m}$	Kütlesel debi
m_{elec}	Hidrojen miktarı
σ	Standart sapma
χ^2	Ki-kare
η	Akım verimi
η_v	Voltaj verimi
η_k	Kompresör verimi
P_d	Güç yoğunluğu
P_{elec}	Elektrolizör gücü
$P_i(v)$	v rüzgar hızında üretilen güç
P_1	Giriş basıncı
P_2	Çıkış basıncı
r	İzantropik üs
ρ	Yoğunluk
T_1	Giriş sıcaklığı
W_{komp}	Kompresör gücü
v	Rüzgar hızı
$\bar{v}$	Ortalama hız
V_{ci}	Devreye girmek için gerekli (cut-in) rüzgar hızı
V_{co}	Kesme hızı (cut-out)
V_{elec}	Elektrolizör çalışma gerilimi

Kısaltmalar

Açıklama

PEM	Proton Geçirgen Membran
DPT	Devlet Planlama Teşkilatı
OECD	Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü

IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
GWEC	Küresel Rüzgar Enerjisi Konseyi
RES	Rüzgar Enerjisi Santrali
EÜAŞ	Türkiye Elektrik Üretim Anonim Şirketi
TETAŞ	Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt Anonim Şirketi
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
RMSE	Ortalama Hata Karelerinin Toplamının Karekökü
ÖET	Özgöl Enerji Tüketimi
MLH	Maksimum Olabilirlik
SS-OH	Standart Sapma-Ortalama Hız
EPF	Enerji Model Faktörü
YEÜ	Yıllık elektrik üretimi

BÖLÜM I

GİRİŞ

Dünyada nüfus artışı, sanayileşme ve şehirleşme ile birlikte, küreselleşme sonucu artan ekonomik faaliyetler ve üretim imkanlarına bağlı olarak, doğal kaynaklara ve enerjiye olan talep giderek artmakta diğer taraftan iklim değişikliği ve küresel ısınma da doğal yaşamı daha fazla tehdit eder hale gelmektedir(DPT, 2006; Gökçek, 2008). Dünyanın doğal iklim değişikliği ve insan aktivitelerinin neden olduğu iklim değişikliği birlikte değerlendirilerek, iklim değişikliği ve küresel ısınma sorununa çözüm aramak son zamanlarda küresel ölçekte, tüm bilimsel ve politik çevrelerin temel meselelerinden birisi haline gelmiştir. Sosyal ve ekonomik kalkınmanın en önemli parametrelerinden biri olan enerji, ülkelerin gelişmişlik düzeyinin belirlenmesinde önemli bir ölçüt olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, enerji maliyetinin azaltılması, sürdürülebilir enerjinin temini, çevrenin korunması, temiz enerji üretim sistemlerinin geliştirilmesi ve enerji kullanımında verimliliğin artırılması büyük önem taşımaktadır. Mevcut enerji üretim yöntemleri % 80 oranında petrol, kömür, doğalgaz gibi kaynağı sınırlı ve rezervleri oldukça azalmış fosil yakıtlara dayanmaktadır. Bununla birlikte bu kaynakların çevreye vermiş oldukları zararlar, dünya enerji eğilimini rüzgar, güneş, jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmiştir [Gökçek, 2008].

Yenilenebilir enerji doğal kaynaklardan elde edilen ve kaynağın tükenme hızından daha çabuk bir biçimde kendini yenileyen enerjidir. Doğal çevreye zarar vermemesi nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının sürekli artması alternatif enerji üretim teknolojilerin önemini artırmaktadır. Bu enerji kaynaklarının kullanıldığı sistemlerin (rüzgâr, güneş vs.) kesintili enerji üretimleri, arz-talep arasında dengesizliğe sebep olmaktadır. Bu nedenle bu kaynaklardan elde edilen enerjinin uygun yöntemlerle depolanması gerekmektedir. Depolanan enerji, talebin fazla olduğu zamanlarda yeniden kullanılabilir. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının sürekli artması alternatif enerji üretim teknolojilerin önemini artırmaktadır. Bu enerji kaynaklarının kullanıldığı sistemlerin (rüzgâr, güneş vs.) kesintili enerji üretimleri, arz-talep arasında dengesizliğe sebep olmaktadır. Bu nedenle bu kaynaklardan elde edilen enerjinin uygun yöntemlerle depolanması gerekmektedir. Depolanan enerji, talebin fazla olduğu zamanlarda yeniden kullanılabilir.

Günümüzde depolama teknikleri arasında değerlendirilen fazla enerjiden hidrojen üretilmesi ve bu üretilen hidrojenin yenilenebilir kaynağın yetersiz olduğu zamanlarda yeniden kullanılabilir şekilde saklanması yöntemi oldukça cazip hale gelmiştir.

Bununla birlikte, yenilenebilir enerji sistemleriyle özellikle rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleriyle temiz ve çevreye zarar vermeden üretilen hidrojen, gerek alevli yanma özelliği nedeniyle içten yanmalı motorlarda gerekse yakıt hücrelerinde direkt yakıt olarak kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Günümüzde yenilenebilir enerji sistemleriyle hidrojen üretimi konusunda çalışmalar devam etmektedir. Literatürde rüzgar enerjisi destekli hidrojen üretim sistemlerinin teknik ve ekonomik analizi ile ilgili çalışmalar sınırlı sayıda bulunmaktadır. Özellikle ülkemizin rüzgar enerjisi potansiyelinin çok olduğu Ege, Marmara ve Akdeniz bölgeleri için rüzgar enerjisi destekli hidrojen üretim sistemlerinin tekno- ekonomik analizi ile ilgili çalışmalar oldukça az olup, ekonomik ve teknik parametrelerin birim enerji ve hidrojen üretim maliyetleri üzerine etkilerini inceleyen çalışmalar da oldukça yetersizdir. Bu nedenle bu çalışmada ülkemizde rüzgar enerjisi potansiyelinin yüksek olduğu İzmir-İzmirli'de kurulabilecek rüzgar enerji sisteminden üretilen elektrik enerjisinin ve hidrojenin teknik ve ekonomik analizi yapılmıştır.

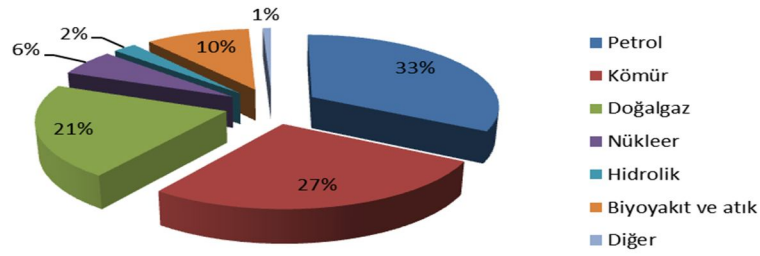
1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, elektrik enerjisinin yanında bir enerji taşıyıcısı olarak günümüzde giderek önem kazanan hidrojenin doğaya olumsuz etkileri olan klasik üretim yöntemlerinin dışında elektroliz ile rüzgar enerjisi gibi temiz ve doğal kaynak kullanarak üretilmesini teknik ve ekonomik açıdan incelemektir. Bu amaçla bu çalışmada İzmir-İzmirli bölgesine ait rüzgar verileri kullanılarak bölgenin rüzgar potansiyeli ve rüzgar karakteristikleri incelenmiş, bu bölgeye kurulacak rüzgar türbini sistemiyle çalıştırılan proton geçirgen membran (PEM) elektrolizör sisteminden hidrojen üretimi tekno-ekonomik olarak incelenmiştir.

1.2. Dünyada ve Türkiye’de Enerji Durumu

Günümüzde kullanılan enerji türü ve miktarı için en önemli göstergenin nüfus olduğu kabul edilmektedir (WEO, 2011). 2009 verilerine göre dünya nüfusu 6.761 milyar olup, 2009 yılında tüm dünyada enerji üretimi 12292Mtep, toplam birincil enerji arzı 12150 Mtep, elektrik enerjisi tüketimi 18456 TWh olmuştur. OECD ülkelerinde ise enerji üretimi 3807 Mtep, toplam birincil enerji arzı 12150 Mtep ve elektrik enerjisi tüketimi 9813 TWh olarak gerçekleşmiştir. Şekil 1.1’de 2009 yılında dünya toplam birincil enerji

arzının kaynak türüne göre değişimi verilmektedir(WEO, 2011). Şekilde görüldüğü gibi toplam enerji arzında fosil yakıt kaynakları payının oldukça fazladır. Küresel birincil enerji tüketiminde fosil yakıtların payı 2009 yılında % 80.9 iken,bu oranın azalarak 2035 yılında % 75'e düşmesi beklenmektedir. Enerji piyasası dinamikleri günümüzde daha çok gelişmekte olan ülkeler tarafından belirlenmektedir. Önümüzdeki 25 yılda küresel enerji talebindeki artışın %90'ının OECD dışındaki ülkelere kaynaklanması, dünyanın en büyük enerji tüketicisi durumundaki Çin'in tek başına enerji talebinin bu artışın % 30'undan fazlasını oluşturacağı düşünülmektedir. Nüfus artışı ile ilgili yapılan projeksiyonlarda 2035 yılına kadar dünya nüfusunun her yıl % 0.9 artarak 8.5 milyara ulaşması,Afrika kıtası dışında nüfus artışının genel olarak şehirleşmiş bölgelerde olması, kırsal alanlarda ise nüfus artışının azalması beklenmektedir. Hızlı bir biçimde gerçekleşen şehirleşme daha fazla enerji talebini ortaya çıkarmaktadır.



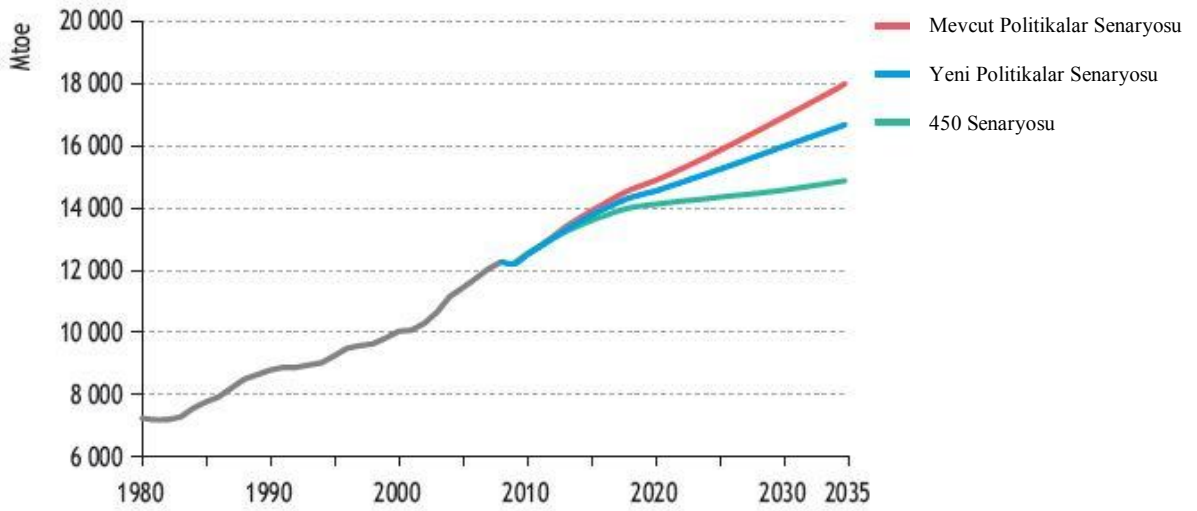
Şekil 1.1. 2009 yılında dünya toplam birincil enerji arzının kaynak türüne göre değişimi

Ekonomik aktiviteler ve gelişen teknolojide enerji talebi ve kullanımı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Uluslararası enerji ajansının dünya enerji görünümü 2011 raporunda ülkelerin verimli ve düşük karbon teknolojilerine yönelik yatırımlarının artırılması için güçlü önlemler almaları gerektiği bildirilmiş, üç küresel senaryo üzerinde durulmuştur(WEO, 2010). Bunlar;

- Yeni Politikalar Senaryosu,
- Mevcut Politikalar Senaryosu
- 450 Senaryosudur.

Yeni politikalar senaryosu, ülkelerin enerji ve iklim politikaları alanlarında taahhütlerini yerine getirmelerini, mevcut politikalar senaryosu 2011 yılı ortası itibariyle yeni bir politika uygulanmamasını ve 450 senaryosu ise uzun vadede ortalama küresel sıcaklık

artışının 2°C ile sınırlandırılmasına yönelik politikaların uygulanmasını, sera gazlarının uzun vadeli atmosferik konsantrasyonunun 450 ppm CO_2 eşdeğeri ile sınırlı kalmasını esas almaktadır. Farklı senaryolara göre dünya birincil enerji talebindeki değişim Şekil 1.2’de görülmektedir. Yeni politikalar senaryosunda, dünya birincil enerji talebinin 2008 ile 2035 yılları arasında yılda % 1.2 oranında artarak 2035 yılında 16750 Mtep değerine ulaşması beklenmektedir. Bu senaryoya göre, 2011-2035 yılları arasında enerji arzının altyapısını oluşturmak için küresel boyutta yılda ortalama 1500 M\$ olmak üzere 38000 M\$ yatırım yapılması gerekmektedir. Mevcut politikalar senaryosunda enerji talebi artışının daha fazla olması beklenmekte yılda % 1.4 talep artışının olacağı öngörülmektedir. 450 senaryosunda ise 2008 ile 2035 yılları arasında enerji talebinin yılda % 0.7 oranında artacağı beklenmektedir (WEO, 2010).



Şekil 1.2. Farklı senaryolara göre dünya birincil enerji talebindeki değişim

Tüm senaryolarda fosil yakıtların baskın rolünü koruyacağı 2008 yılında % 81 olan toplam birincil enerji kaynakları içerisindeki fosil yakıt kullanım oranının, 450 senaryosunda % 62, yeni politikalar senaryosunda % 74 ve mevcut politikalar senaryosunda % 79 olacağı bildirilmektedir. Bu farklılıklar iklim değişikliği ve enerji güvenliği endişelerini vurgulamak için varsayılan politik hareketlerin değişkenlik direncini yansıtmaktadır. 450 senaryosunda yenilenebilir kaynakların ve nükleer enerjinin payı diğer senaryolara göre daha fazla olmaktadır. Çizelge 1.1’de farklı senaryolara ve yakıtlara göre dünya birincil enerji talebini verilmiştir (WEO, 2010). Önümüzdeki yıllarda, elektrik üretimi sektöründe nükleer enerji payının Çin, Kore ve Hindistan’ın liderliğinde olması beklenirken, hidrolik ve rüzgar enerjisi başta olmak

üzere yenilenebilir enerji teknolojileri, artan talebi karşılamak üzere kurulacak yeni kapasitelerin yarısını oluşturması beklenmektedir.

Tüm dünyada, 2008 yılında yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak üretilen elektrik enerjisi miktarı 3774 TWh olmuştur. Bu üretim miktarı 2008 yılında toplam elektrik enerjisi üretim miktarının %19'unu oluşturmaktadır. 2010 yılında tüm dünyada mevcut kapasiteye eklenen 194 GW yeni elektrik enerjisi kapasitesinin yarısını yenilenebilir esaslı sistemler oluşturmaktadır(Sawin, 2011). Bu artışla toplam yenilenebilir güç kapasitesi 1320 GW'a ulaşmıştır.Modern yenilenebilir enerji sistemleri kullanımının 2035 yılına kadar tüm senaryolarda hızlı bir şekilde artacağı tahmin edilmektedir. Her bir senaryoda büyüme oranı enerji arz kaynaklarını çeşitlendirmeyi ve sera gazı emisyonlarını azaltmayı amaçlayan ülkelerin politikalarının yoğunluk seviyelerindeki farklılıklarla ilgili varsayımları yansıtmaktadır. 2008 yılında 840 Mtep olan modern yenilenebilir enerji kaynakları (hidrolik, rüzgar, güneş, jeotermal, modern biyokütle, dalga ve akıntı enerjisi) arzının 2035 yılında ele alınan senaryoya bağlı olarak 1900 Mtep ile 3250 Mtep arasında değişeceği tahmin edilmektedir. Genel olarak modern yenilenebilir enerji kaynaklarının diğer tüm enerji kaynaklarından görece olarak daha hızlı büyümesi fakat, mutlak olarak bakıldığında yenilenebilir enerji arzının 2035 yılında fosil yakıt arzı seviyelerinde olamayacağı ifade edilmektedir (WEO,2011).

Çizelge 1.1. Farklı senaryolara ve yakıtlara göre dünya birincil enerji talebi (Mtep)

Enerji Kaynağı			Yeni politikalar senaryosu		Mevcut politikalar senaryosu		450 senaryosu	
	1980	2008	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Kömür	1792	3315	3966	3934	4307	5281	3743	2496
Petrol	3107	4059	4346	4662	4443	5026	4175	3816
Gaz	1234	2596	3132	3748	3166	4039	2960	2985
Nükleer	186	712	968	1273	915	1081	1003	1676
Hidrolik	148	276	376	476	364	439	383	519
Biyokütle ve atık	749	1225	1501	1957	1464	1715	1539	2316
Diğer yenilenebilir kaynaklar	12	89	268	699	239	468	325	1112
Toplam	7229	12271	14556	16748	14896	18048	14127	14920

Türkiye'de elektrik enerjisi ilk kez 1902 yılında İçel'in Tarsus ilçesinde Berdan Nehri Bentbaşı mevkiinde kurulan 2 kW gücünde hidroelektrik santral vasıtasıyla üretilmeye ve kullanılmaya başlanmıştır. 2011 yılı itibarıyla Türkiye'de kurulu güç 51547 MW'a

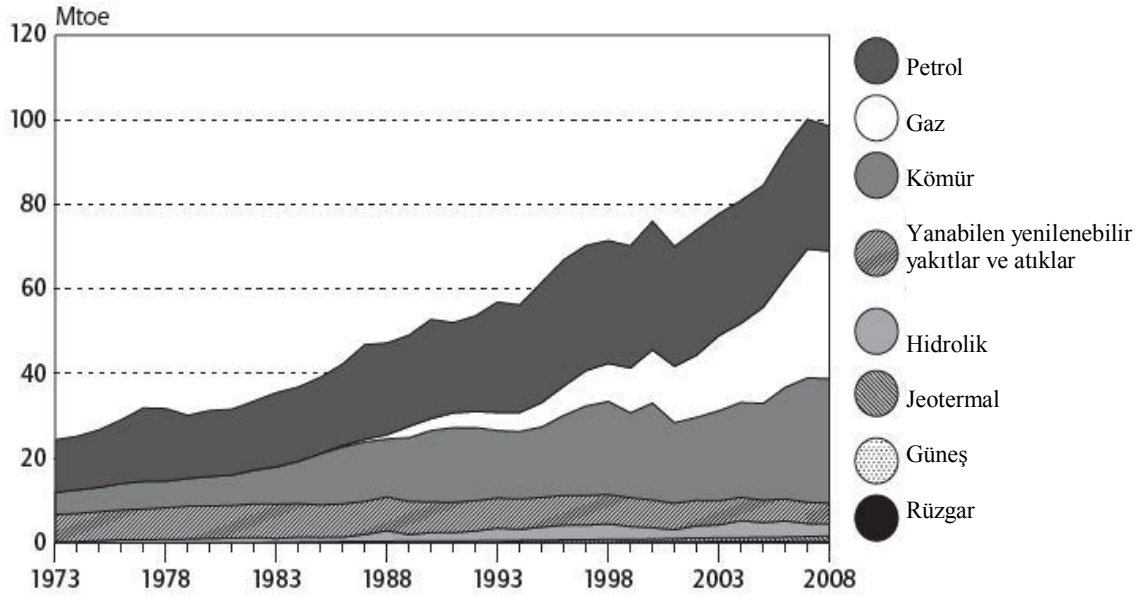
ulaşmıştır (Yıldız, 2011).2009 verilerine göre Türkiye'nin nüfusu 71.90 milyon kişi olup, bu yıl için enerji üretimi 30.28 Mtep, toplam birincil enerji arzı 97.66 Mtep, elektrik enerjisi tüketimi 165.09 TWh olmuştur.Türkiye'nin uluslararası enerji ajansına üye ülkeler arasında orta ve uzun vadede enerji talebi en hızlı büyüyen üye olacağı görülmektedir. Genç ve şehirleşen nüfusa sahip olmasına rağmen enerji tüketimi henüz göreceli olarak düşüktür. Bu nedenle büyüyen ekonomisine yeterli ve etkili enerji arzının sağlanması ülkenin temel enerji politikalarından biri olmaktadır. Elektrik ve doğalgaz gibi enerji altyapısına yapılacak yatırımlar Türkiye'nin ekonomik büyümesini hızlı bir şekilde sürdürmek ve arzdaki darboğazı önlemek için önemli olacaktır. Önümüzdeki yıllarda Türkiye'de yapılacak büyük enerji yatırımlarında özel sektörün daha etkili olacağı düşünülmektedir(IEA, 2009).

Ekonomik büyümeyle ilişkili olarak Türkiye'de enerji kullanımının önümüzdeki yirmi yıl boyunca ikiye katlanması, elektrik enerjisi talebinin daha hızlı artması beklenmektedir. Bu hızdaki büyüme, büyük yatırımlar aynı zamanda enerji güvenliğini sağlamak için önlemler gerektirmektedir. Bu amaçla sahip olduğu kömür rezervlerinin, hidrolik, rüzgar, güneş ve jeotermal enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretmek amaçlı kullanımının artırılması beklenmekte, nükleer gücünde katılımıyla enerji üretim kapasitesinin çeşitlendirilmesi amaçlanmaktadır. Türkiye kullandığı petrol ve doğal gazın çok büyük bir bölümünü ithal etmekte ve gelecek yıllarda da ithalatın ikiye katlanacağı tahmin edilmektedir.

Türkiye'nin güncel enerji politikasının esası, dünyanın kanıtlanmış petrol ve gaz rezervlerinin % 70'inden fazlasına sahip olan bölgedeki ülkelerle olan enerji diplomasisi oluşturmaktadır. Bu durum Türkmenistan, Azerbaycan, Mısır, İran ve Rusya gibi ülkelerle yapılan anlaşmalardan görülmektedir. Bu anlaşmalar ve projeler Türkiye'nin rolünü uluslararası pazar, avrupa ve komşu ihracatçı ülkeler arasında bir enerji koridoru olarak güçlendirmektedir. Türkiye'de tüm sektörlerde enerji verimliliğinin artırılması için büyük bir potansiyel bulunmaktadır. Türkiye'de diğer uluslararası enerji ajansına üye ülkelerde olduğu gibi otomobil ve petrol esaslı taşıma sistemleri kullanılmaktadır. Daha sürdürülebilir taşıma sistemleri enerji tasarrufuna, trafik sıkışıklığının önlenmesine, hava kalitesinin artırılmasına yardım edecektir. Halen bu duruma en iyi örnek olarak yüksek hızlı trenlerin kullanılmaya başlanması ve bu konuda devam eden projeler verilebilir. Diğer taraftan binalarda enerji verimliliği de önemli

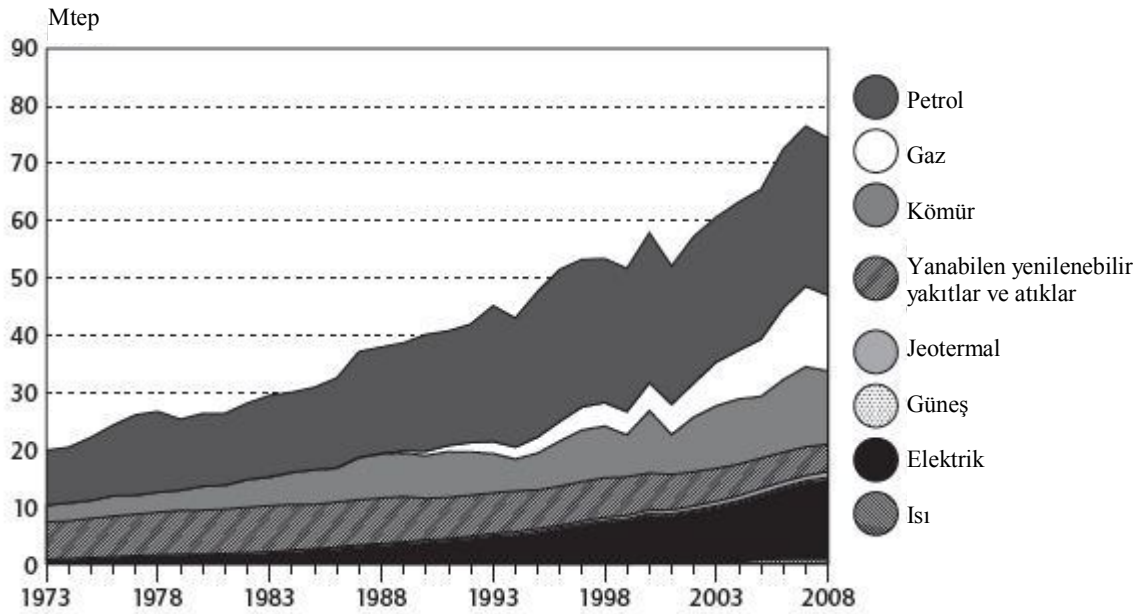
hale gelmektedir. Pik elektrik talebi ısıtma ve soğutma cihazlarının kullanımlarının artmasıyla artmaktadır. Bu talep daha verimli cihazlar kullanılarak, çatı ve sıvalarda daha açık renkler uygulanarak ve daha iyi izolasyon şartları sağlanarak azaltılabilir. Son yıllarda binalarda enerji kimliği uygulamasının başlatılması enerji verimliliği adına atılan önemli adımlardan birisi olmuştur(IEA, 2009)].

Türkiye'nin toplam birincil enerji kaynakları arzı 2008 yılında 99 Mtep olmuştur. Şekil 1.3'te Türkiye'nin toplam birincil enerji kaynakları arzının 1973 ile 2008 yılları arasındaki değişimi görülmektedir(IEA, 2009). 1990 ile 2008 yılları arasında ekonomisi iki kat büyürken birincil enerji kaynakları arzı % 87 artmıştır. Türkiye'nin birincil enerji kaynakları arzının % 72'sini petrol, doğalgaz ve kömür gibi ithal kaynaklar oluşturmaktadır.2008 yılında toplam birincil enerji kaynakları arzı % 90 oranla fosil yakıtlardan (kömür, petrol, doğalgaz) meydana gelmiştir. % 10'luk pay ise yenilenebilir enerji kaynaklarından (hidrolik, rüzgar, güneş, jeotermal v.b.) oluşmaktadır. 2000 yılından bu yana, toplam birincil enerji kaynakları arzındaki yükselişin nedeni doğalgaz (18 Mtep) ve kömür (7 Mtep) kullanımındaki artış olmuştur. Diğer bir çok ülkede olduğu gibi, Türkiye'de de doğalgazın elektrik enerjisi üretiminde kullanılan başlıca yakıt olduğu söylenebilir. Elektrik üretiminde kullanımı artan bir diğer yakıt da kömürdür. 2000 yılından 2009 yılına kadar gaz yakıt kullanılarak üretilen elektrik enerjisi miktarı 48 TWh, kömür kullanılarak üretilen elektrik enerjisi miktarıda 17 TWh artmıştır. Hidrolik esaslı elektrik enerjisi üretimi, yıllık hidrolojik şartlara göre değişmekle birlikte 2000 yılından bu yana 5 TWh artmıştır. Petrol kaynaklı elektrik enerjisi üretimi 2002 yılında en yüksek değere ulaşmış ve sonra azalma eğilimi göstermiştir.



Şekil 1.3. Türkiye'nin toplam birincil enerji kaynakları arzı (1973-2008)

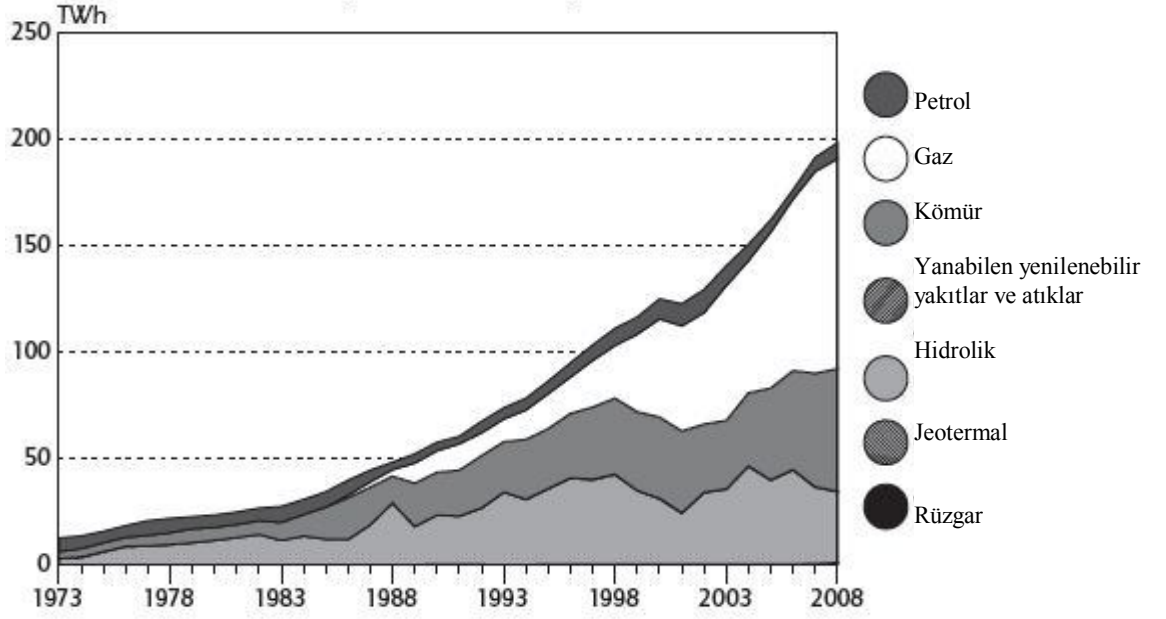
Türkiye'nin toplam enerji tüketimi 2008 yılında 1990 yılına göre % 86 artarak 74 Mtep değerine ulaşmıştır. Şekil 1.4'te kaynaklara göre Türkiye'nin toplam enerji tüketimi görülmektedir (IEA, 2009). Endüstri ve konut sektörü başlıca enerji tüketicisi durumundadır. Burada ulaşımın payı % 20 olurken diğer sektörlerin payı (hizmet v.b.) toplam tüketimin % 17'sinden oluşmaktadır. Enerji dağılımı kaynaklara göre değerlendirildiğinde, 2008'de toplam enerji tüketiminin % 37'sini petrol, % 18'ini elektrik, % 18'ini doğalgaz, % 17'sini kömür, % 7'sini biyokütle ve % 3'ünü diğer kaynaklar oluşturmaktadır. Şekil 1.4'ten görülebileceği gibi doğalgazın payı 1990'dan bu yana önemli oranda artmıştır. Türkiye'de toplam enerji tüketiminin 2020 yılında kömür, petrol ve elektrik enerjisi kullanımındaki artışla 2008 yılına nazaran yaklaşık iki kat artarak 163 Mtep'e ulaşacağı tahmin edilmektedir. Türkiye'de yenilenebilir enerji arzı 1990'ların ortasında 11 Mtep pik değerinden 2008 yılında 9 Mtep değerine düşmüştür. Bu azalma ısıtmada kullanılan odun gibi yakıtların yerini enerjinin daha modern formlarının almasından kaynaklanmaktadır. Toplam birincil enerji kaynakları arzının da yenilenebilir enerjinin payı 1990'ların ortalarında % 17 iken 2008'de % 9.5'e azalmıştır. Türkiye'de toplam enerji arzının yarısı biyokütle ile sağlanırken diğer bölümü hidrolik kaynaklardan sağlanmaktadır. Jeotermal, rüzgar ve güneş enerjisi kullanımı ise giderek artmaktadır. 2009 yılında Türkiye'de toplam güç üretiminin % 19.6'sı yani 37.8 TWh elektrik enerjisi yenilenebilir kaynaklardan üretilmiştir (IEA, 2009).



Şekil 1.4. Kaynaklara göre Türkiye'nin toplam enerji tüketimi (1973-2008)

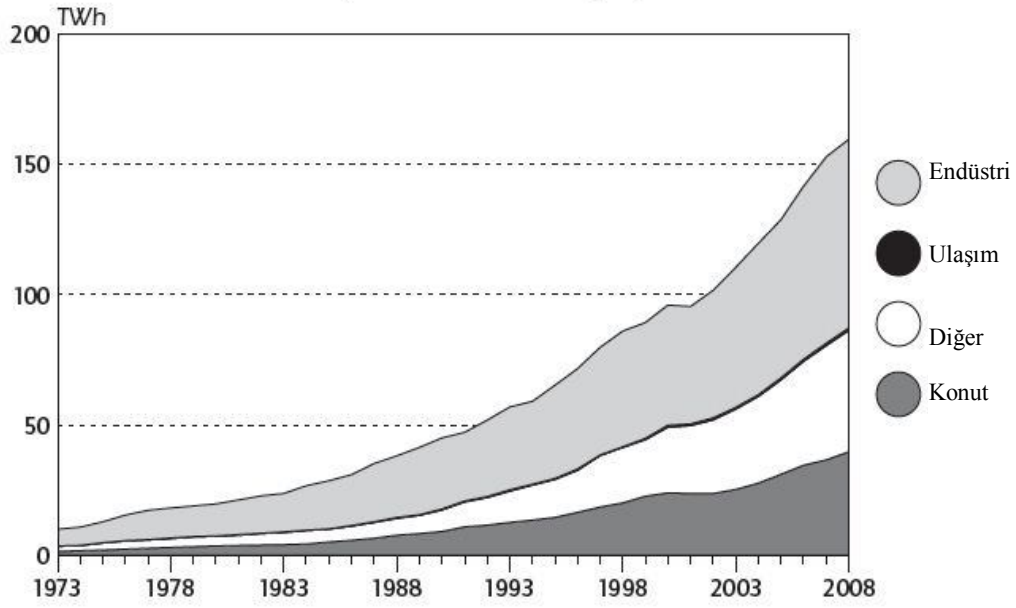
Yenilenebilir kaynaklardan üretilen enerjinin %95'ini hidrolik enerjiyle, % 4'ü rüzgar enerjisiyle, % 1'i ise jeotermal ve biyokütle enerjisiyle üretilmiştir. Hidrolik enerji düşen yağışa bağlı olarak yıldan yıla değişmektedir. 2009 yılında Türkiye'de toplam elektrik enerjisi arzı 194 TWh olmuştur. Elektrik enerjisi üretiminin % 49'u doğalgazdan, %28'i kömürden, % 19'u hidrolik kaynaktan, % 3'ü petrolden, % 1'i ise diğer kaynaklardan sağlanmaktadır. 2009 yılında Türkiye ekonomisinde yaşanan daralma nedeniyle elektrik enerjisi arzı % 2 azalmış, 2010 yılında tekrar artmaya başlamıştır. 1990'da 58 TWh olan elektrik enerjisi üretimi 3 kattan daha fazla artmış ancak üretim kömür, gaz, petrol ve hidrolik kaynaklardan sağlanmış ve bu durum günümüzde de çok fazla değişmemiştir. Son yıllarda kombine çevrim santralleri ve kömür yakıtlı santrallerin kullanımı artmış, hidroelektrik ve petrol yakıtlı santrallerin üretim'deki payı çok fazla artmamıştır. Şekil 1.5'te kaynağa göre elektrik enerjisi üretiminin 1973-2008 yılları arasındaki değişimi görülmektedir (IEA, 2009). Şekilde görüldüğü gibi gaz yakıtlı üretim 2000 yılından 2009 yılına kadar 48 TWh artmıştır. Türkiye'deki elektrik enerjisi üretiminin uzun vadede kayda değer bir biçimde artacağı 2008 yılı baz alındığında 2020 yılında 300 TWh artış olacağı beklenmektedir. Tahminler hızlı ekonomik büyüme paralelinde mevcut kaynaklara ek olarak Türkiye'nin enerji üretim yelpazesine nükleer enerji, rüzgar enerjisi gibi kaynaklarında etkili bir biçimde katılacağını göstermektedir. Türkiye'de elektrik enerjisi talebi 2001 yılından 2008 yılına kadar özellikle her yıl % 8.8 artmış ve 2008 yılında 162 TWh'e ulaşmıştır.

2009 yılında yaşanan ekonomik daralma nedeniyle elektrik enerjisi kullanımı % 2 azalmıştır.



Şekil 1.5. Kaynaklara göre Türkiye'nin elektrik enerjisi üretimi (1973-2008)

2008 yılında toplam enerji tüketiminin % 46'sını sanayii sektörü, % 29'unu hizmet, tarım, ormancılık ve denizcilik sektörü, % 24'ünü konut sektörü, % 1'ini ulaşım sektörü tüketimi oluşturmaktadır. Elektrik enerjisi tüketimi 2008 yılında 2000 yılına göre %55 oranında artmıştır. Şekil 1.6'da sektöre göre elektrik enerjisi tüketimi görülmektedir (IEA, 2009).



Şekil 1.6. Sektöre göre Türkiye'nin elektrik enerjisi tüketimi (1973-2008)

Türkiye'nin toplam elektrik enerjisi kurulu kapasitesi 2008 yılına göre % 7.1, 2000 yılına göre de % 64 artarak 2009 yılında 44782 MW olmuştur. Çizelge 1.2'de enerji kaynağına göre kapasite ve üretim oranları özetlenmiştir. (IEA, 2009). Güç talebinde beklenen büyümeye cevap olarak, tüm enerji üretim biçimlerinin kapasiteleri önemli oranda artacaktır.

Çizelge 1.2. Enerji kaynağına göre kapasite ve üretim oranları

Enerji Kaynağı	Üretim (Twh)	Pay (%)	Kapasite (MW)	Pay (%)
Doğal Gaz	94.4	48.6	16345	36.5
Yerli Kömür	42.2	21.7	8691.3	19.4
İthal Kömür	12.8	6.6	1921.0	4.3
Hidroelektrik	35.9	18.5	14553.4	32.5
Sıvı Yakıt (Petrol)	6.6	3.4	2309.7	5.2
Rüzgar, Jeotermal, Biyogaz	2.2	1.1	961.2	2.1
Toplam	194.1	100	44782	100

Elektrik enerjisi piyasası ve arz güvenliği stratejisi'ne göre Türkiye'de 2023 yılına kadar elektrik enerjisi üretimi için ekonomik hidrolik potansiyelinin ve linyit rezervlerinin kullanılması planlanmaktadır. 2023 yılına kadar elektrik enerjisi arzının en az % 30'unun yenilenebilir kaynaklardan, %5'inin ise nükleer enerjiden karşılanması hedeflenmektedir (IEA, 2009).

Çevresel değerlendirme

Türkiye’de enerji kaynaklı CO₂ emisyonu değeri 1990 yılına göre iki kattan daha fazla artmış, enerji talebindeki artışın paralelinde orta ve uzun vadede emisyon değerlerinde daha hızlı bir artış görülmesi beklenmektedir. Türkiye 5386 Sayılı Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesine Yönelik Kyoto Protokolüne Katılmasının Uygun Bulunduğuna Dair Kanun’un 5 Şubat 2009’da Türkiye Büyük Millet Meclisi’nce kabulü ve 13 Mayıs 2009 tarih ve 2009/14979 Sayılı Bakanlar Kurulu Kararı’nın ardından, katılım aracının Birleşmiş Milletlere sunulmasıyla 26 Ağustos 2009 tarihinde Kyoto Protokolü’ne taraf olmuştur. Protokol kabul edildiğinde Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesine tarafı olmayan Türkiye, EK-I Taraflarının sayısallaştırılmış salım sınırlama veya azaltım yükümlülüklerinin tanımlandığı Protokol EK-B listesine dâhil edilmemiştir. Dolayısıyla, Protokol’ün 2008-2012 yıllarını kapsayan birinci yükümlülük döneminde Türkiye’nin herhangi bir sayısallaştırılmış salım sınırlama veya azaltım yükümlülüğü bulunmamaktadır.

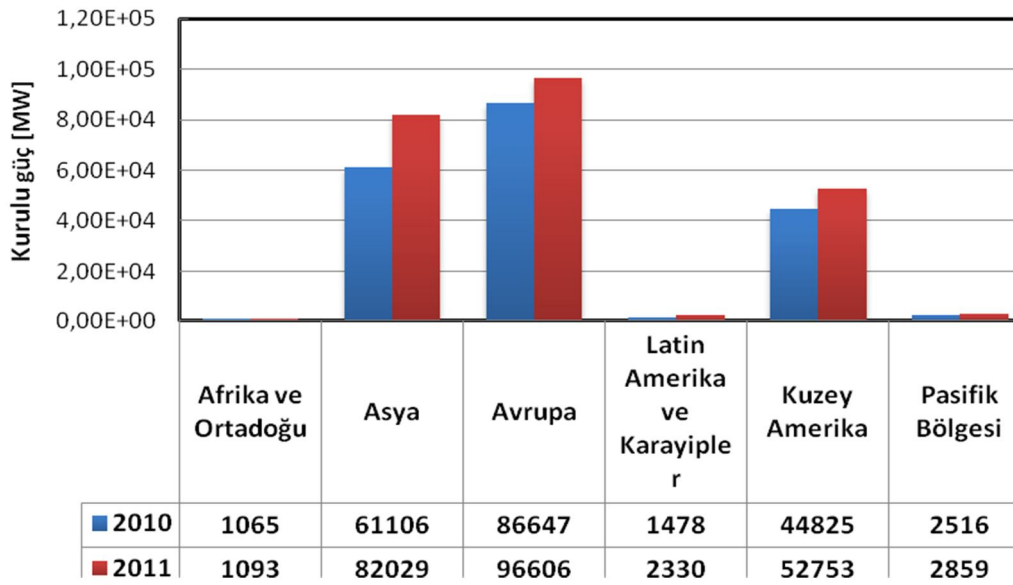
Çizelge 1.3. Sera gazı emisyonlarının yıllara göre değişimi

Sera Gazı Emisyonları (Mt CO ₂ -eşdeğeri)	1990	1995	2000	2005	2006	2007
Karbondioksit (CO ₂)	139.6	171.9	223.8	256.4	273.7	304.5
Metan (CH ₄)	29.2	42.5	49.3	49.3	50.3	54.4
Nitrusoksit (N ₂ O)	1.3	6.3	5.7	3.4	4.6	9.7
Hidroflorokarbon (HFC)	0	0	0.8	2.4	2.7	3.2
Perflorokarbon (PFC)	0	0	0	0	0.4	0
Sülfürhegzaflorid (SF ₆)	0	0	0.3	0.9	0.9	0.9
Toplam	170	220.7	280	312.4	332.7	372.6

Türkiye’de ekonomide yaşanan büyüme paralelinde tüm seragazı emsiyon değerleri 1990 yılından bu güne oldukça artmıştır. Birleşmiş milletlere sunulan sera gazı ulusal envanteri verilerine göre, 2007’de toplam sera gazı emisyonunun CO₂ eşdeğeri 373 Mt olmuştur. 2007’deki sera gazlarının % 81.7’sini CO₂, % 14.6’sını CH₄, % 2.6’sını N₂O ve % 1.1’ini flor içeren gazlar oluşturmaktadır. Çizelge 1.3’te sera gazı emisyonlarının 1990 ile 2007 yılları arasındaki değerleri görülmektedir (IEA, 2009).

1.3. Dünyada Rüzgar Enerjisi

2010 yılı sonu itibariyle 197.637 MW olan dünya rüzgar enerjisi kurulu gücü eklenen yeni 40.564 MW kapasite ile 2011 yılı sonunda 237,669 MW'a ulaşmıştır. Rüzgar enerjisi pazarı 2010 yılı ile karşılaştırıldığında 2011 yılında eklenen 40.5 GW'lık kapasite ile 50 Milyar Avro'dan daha fazla yatırım yapılarak yaklaşık % 6 büyümüştür. 2011 yılında eklenen yeni kapasite ile dünya elektrik enerjisi yıllık tüketiminin yaklaşık % 3 olan 500 TWh elektrik enerjisi üretilebilecektir. Halen dünyada 96 ülke rüzgar enerjisi kullanarak elektrik enerjisi üretmektedir (Gsänger ve Pitteloud, 2012).



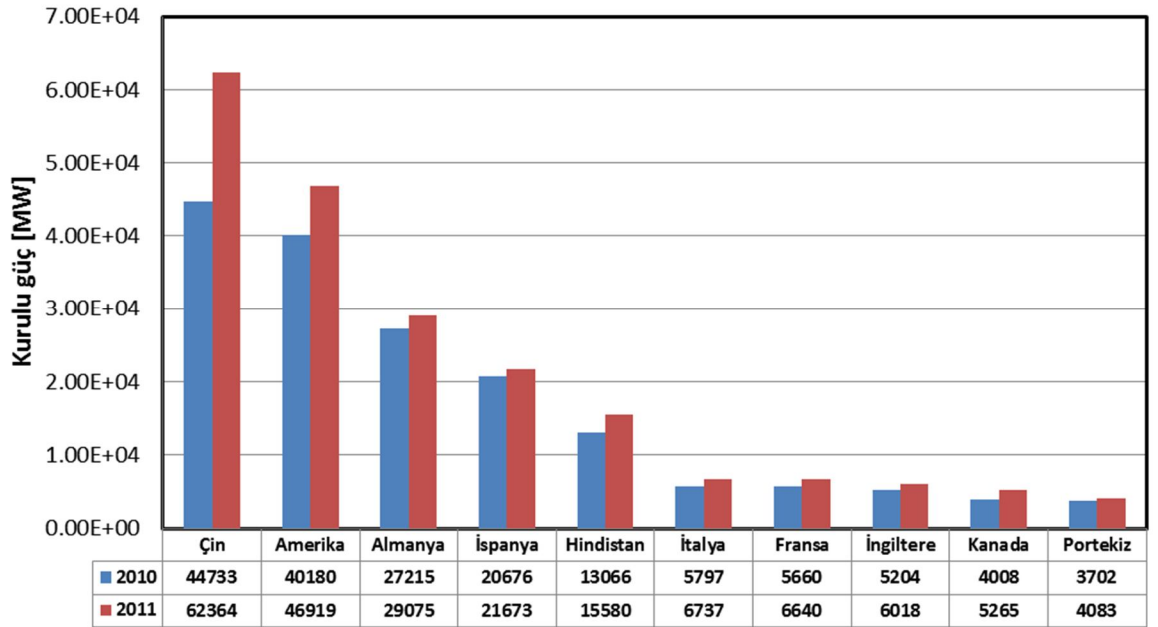
Şekil 1.7. Farklı bölgelere göre dünya rüzgar enerjisi kurulu gücü

Son dönemde küresel pazardaki büyümeyi sağlayan ülkeler büyük ölçüde Çin ve Hindistan olmuştur. Şekil 1.7'de farklı bölgelere göre dünya rüzgar enerjisi kurulu gücünü görülmektedir (GWEC, 2011). 2010 yılına göre kurulu güç kapasitesinde en büyük artış oranı % 57 ile Latin Amerika - Karayipler bölgesinde olmuştur. Çin'in tek başına kurulu güç kapasite artışı 17631 MW olmuş, kurulu güç kapasitesi 2010 yılına göre % 39 artmıştır. Son yıllarda Latin Amerika ülkeleri ve özellikle Brezilya rüzgar enerjisi kurulu güç kapasitesindeki yüksek büyüme hızıyla en dinamik bölgelerden biridir.

Avrupa da en fazla kurulu güç kapasitesine sahip ilk beş ülke Almanya, İspanya, Fransa, İtalya ve İngiltere'dir. 29060 MW kurulu güç kapasitesine sahip Almanya'yı,

21674 MW ile İspanya, 6800 MW ile Fransa, 6737 MW ile İtalya ve 6544 MW ile İngiltere takip etmektedir(GWEC, 2011).Afrika’da rüzgar enerjisi kullanımıyla ilgili bir durgunluk olmakla birlikte Etyopya ve Cape Verde’de yeni santral kurulumları olmaktadır(Gsänger ve Pitteloud, 2012).

Dünya rüzgar enerjisi pazarında yıllardan beri ön sıralarda olan ilk beş ülke arasında Çin, Amerika, Almanya, İspanya ve Hindistan bulunmaktadır. 2011 yılında dünya rüzgar enerjisi kuruluş kapasitesinin % 74 bu ülkelere aittir. Şekil 1.8’de dünyada kurulu güç kapasitesi bakımından ilk 10 sırada bulunan ülkeler görülmektedir(Gsänger ve Pitteloud, 2012).



Şekil 1.8. Dünya kurulu güç kapasitesinde ilk on ülke

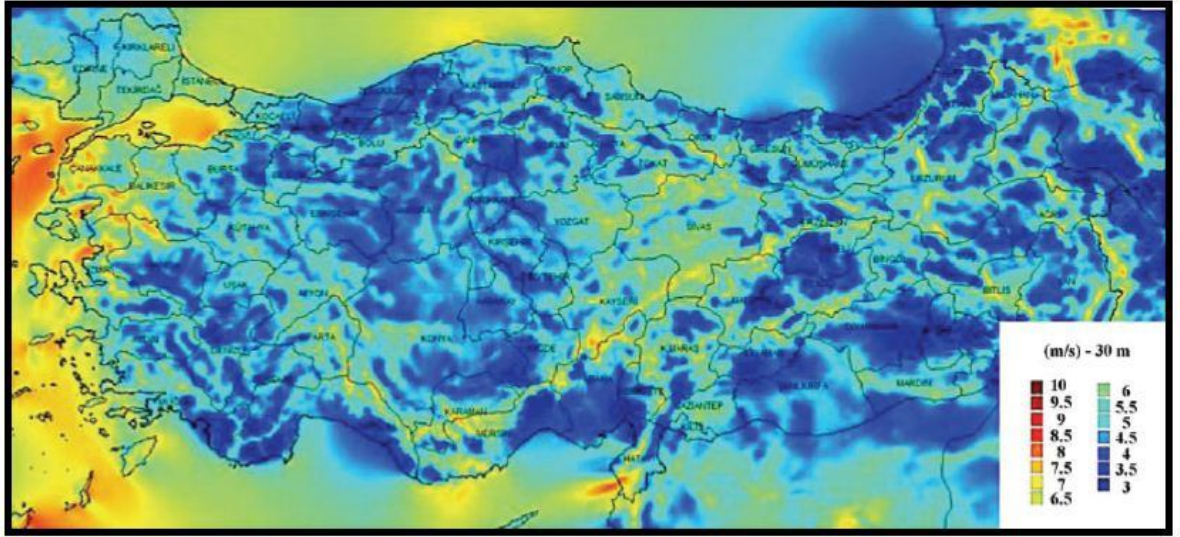
2011 yılı sonunda Brezilya ve Belçika 1 GW Kurulu güç kapasitesinin üzerine çıkmış, 2005 yılında 11 olan 1 GW üzerinde kurulu güç kapasitesine sahip olan ülke sayısı 22 olmuştur. Günümüzde 43 ülkenin kurulu güç kapasitesi 100 MW’ın üzerindedir. Çin rüzgar enerjisi pazarında gösterdiği güçlü performans nedeniyle, Çin üzerinde dünya pazarında belirli bir yoğunlaşma bulunmakta, yeni türbin pazarının yarısından fazlası tek başına Çin’in elinde bulunmaktadır. 2011 yılında Honduras 70 MW ve Etyopya ise 30 MW’lık ilk santrallerini kurmuşlardır. Bir ülkenin rüzgar enerjisi kullanımı ile ilgili durumunu anlamak için sadece toplam rakamlara ve kurulu güce bakmak çok doğru değildir. Kişi başına rüzgar enerjisi kullanımı önemli bir göstergedir. Dünya ortalaması

34 W/kişi'dir. Bu şekilde yapılan sıralamada Çin 46 W/kişi ile 34. sırada, Hindistan 13 W/kişi ile 51. sırada yer alıp dünya ortalamasının altında kalmaktadırlar(Gsnger ve Pitteloud, 2012).

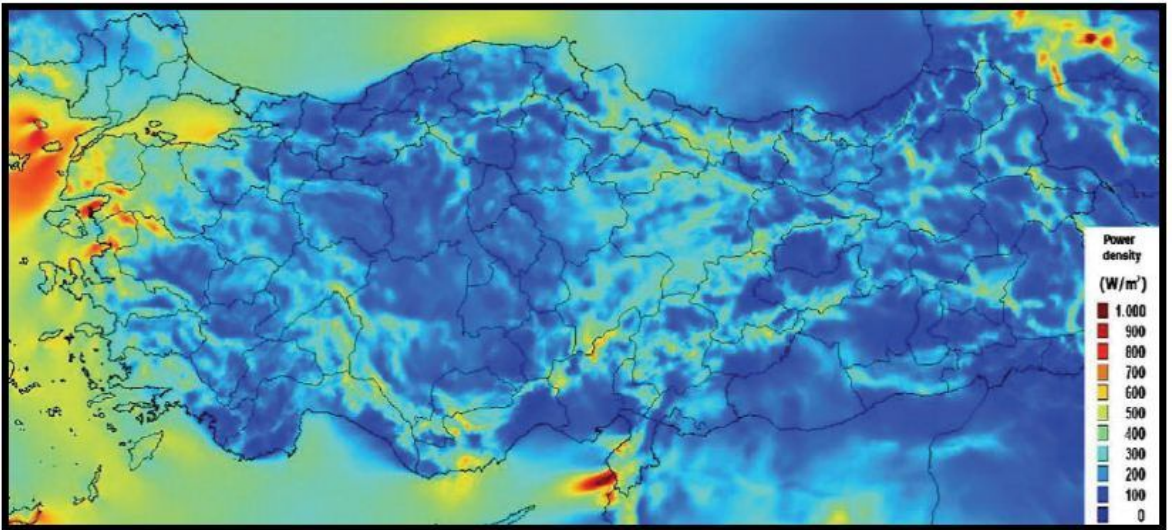
1.4. Türkiye'de Rüzgar Enerjisi

Hızlı büyüyen ekonomisi, artan nüfusu ve enerji talebiyle Türkiye, son yirmi yılda dünyada en hızlı büyüyen enerji pazarına sahip ülkelerden birisi olmuştur. Türkiye petrol ve doğalgaz rezervlerinin sınırlı olması nedeniyle, fosil yakıt ithalatını en aza indirmek ve enerji güvenliğini artırmak amacıyla sahip olduğu yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanma adına son zamanlarda büyük ilerlemeler kaydetmiştir. Türkiye'nin rüzgar enerjisi sektörü çok hızlı gelişmeler göstermiş, 2007'de 30 MW olan kurulu güç kapasitesi 2011 yılı sonunda 1800 MW'a ulaşmıştır. Türkiye oluka iyi rüzgar enerjisi potansiyeline sahiptir, özellikle Çanakkale, İzmir, Balıkesir ve Hatay bölgeleri göze çarpan rüzgarlı bölgeler arasındadır. Rüzgar enerjisi kullanımı için uygun potansiyelin 47 GW olduğu tahmin edilmektedir(GWEC, 2011). şekil 1.9'da Türkiye'de 30 m yükseklikte rüzgar hız dağılımları şekil 1.10'da ise 50 m yükseklikte güç yoğunluğu dağılımları görülmektedir (Gökçek ve diğ., 2010b).

2011 yılında, 470 MW yeni rüzgar kurulu güç kapasitesinin eklenmesiyle toplam kurulu güç 1800 MW'a ulaşmıştır. Çizelge 1.4'te Türkiye'de işletme halindeki rüzgar enerjisi santralleri görülmektedir (TREB, 2012). Bu durum yıllık % 35 civarında büyümeyi göstermektedir. Kurulu güç kapasitesinin her yıl 500 MW-1000 MW arasında büyümesiyle 2015 yılında 5 GW'a, 2023 yılında ise 20 GW'a ulaşması beklenmekte, 2023 yılına kadar elektrik üretiminin % 30'unun yenilenebilir kaynaklardan sağlanması hedeflenmektedir. Türkiye rüzgar enerjisi piyasasına çoğunlukla yerel aktörler sahiptir ve bazı firmalar (Ateşelik, Alke, imtaş ve Enercon) tarafından kule imalatı yapılmaktadır. Yerel türbin kanadı imalatçıları Aero Wind, Ayetek Windand Altema Energy'dir. Enercon % 32.65 lik payla en geniş pazar payına sahip üretici olurken, onu % 28.65 ile Vestas, % 22.65 ile Nordex ve % 10.20 ile GE izlemektedir (GWEC, 2011).



Şekil 1.9. Türkiye’de 30 m yükseklikte rüzgar hızı dağılımları



Şekil 1.10. Türkiye’de 50 m yükseklikte rüzgar güç yoğunluğu dağılımları

Türkiye elektrik enerjisi piyasasında önemli yapısal değişiklikler olmuştur. Rekabetçi pazara yönelik ilk adım olarak, 2001 yılında elektrik piyasası kanunu kabul edilmiş, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) oluşturulmuştur. Bu dönemde Türkiye Elektrik Üretim ve İletim Anonim Şirketi (TEAŞ) üçe bölünmüştür.

Çizelge 1.4. Türkiye’de işletme halindeki rüzgar enerjisi santralleri

PROJE ADI	KURULU GÜÇ (MW)	MEVKİ	TÜRBİN GÜCÜ	İŞLETMEYE GİRİŞ TARİHİ
Söke-Çatalbük RES	30	Aydın	2 MW	2012
Mersin Mut RES	33	Mersin	3 MW	2010
Ayyıldız RES	15	Balıkesir	3 MW	2009
Akres	45	Manisa	2,5 MW	2011
Susurluk RES	45	Balıkesir	2,5 MW	2011
Sarıkaya RES	28.8	Tekirdağ	2 MW+2MW+0,8 MW	2009
Çataltepe RES	16	Balıkesir	2 MW	2010
Kuyucak RES	25.6	Manisa	2 MW-0,9 MW	2010
Çamseki RES	20.8	Çanakkale	2 MW +0,8 MW	2009
Çeşme RES	1.5	İzmir	0,5 MW	1998
Keltepe RES	20.7	Balıkesir	0,9 MW	2009
İntepe RES	30.4	Çanakkale	0,8 MW	2007
ARES	7.2	İzmir	600 KW	1998
Bandırma-3-RES	24	Balıkesir	2,5 MW	2010
Akbük RES	31.5	Aydın	2,1 MW	2009
AyRES	5	Çanakkale	1,8 MW	2011
Şamlı RES	113.4	Balıkesir	3 MW	2008
Şenbük RES	15	Hatay	3 MW	2010
Belen RES	36	Hatay	3 MW	2009/2010
Aliağa RES	90	İzmir	2,5 MW	2010
Sorna RES	90	Manisa	2,5 MW	2010
Bandırma RES	60	Balıkesir	3 MW	2009/2010
Boreas 1 Enez RES	15	Edirne	2,5 MW	2010
Bozcaada RES	10.2	Çanakkale	0,6 MW	2000
Dares Datça RES	29.6	Muğla	0,8 MW +0,9MW	2008
Sebenoba RES	30	Hatay	2 MW	2008
Karakurt RES	10.18	Manisa	1,8 MW	2007
Sayalar RES	34.2	Manisa	0,9 MW	2008
Burgaz RES	14.9	Çanakkale	0,8 MW +0,9MW	2007
Seyitali RES	30	İzmir	2.0 MW	2011
Çanakkale RES	29.9	Çanakkale	2,3 MW	2011
ŞahRES	93	Balıkesir	3 MW	2011
SaRES	22.5	Çanakkale	2,5 MW	2010/2011
Yuntdağ RES	57.5	İzmir	2,5 MW	2008
Bozkaya RES	52.5	İzmir	2,5 MW	2011
Kores Kocadağ-2 RES	15	İzmir	2,5 MW	2010
Kemerburgaz RES	24	İstanbul	2 MW	2008
Mare Manastır RES	39.2	İzmir	0,9 MW+0,8 MW	2006/2007
Man-3 RES	30	İzmir	2,5 MW	2009/2010
Killik RES	40	Tokat	2,5 MW	2012
Gökçedağ RES	135	Osmaniye	2,5 MW	2009/2010
Turguttepe RES	24	Aydın	2 MW	2010
Çatalca RES	60	İstanbul	3 MW	2008
Soma RES	140.1	Manisa	2,0 MW +0,9 MW	2011/2012
Sunjüt RES	1.2	İstanbul	0,6 MW	2006
TepeRES	0.85	İstanbul	850 MW	2006
Düzova RES	30	İzmir	2,5 MW	2009/2010
Bandırma RES	35	Balıkesir	1,5 MW	2006
Ziyaret RES	57.5	Hatay	2,5 MW	2010/2011

Bunlar, Türkiye Elektrik Üretim Anonim Şirketi (EÜAŞ), Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt Anonim Şirketi (TETAŞ), Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ)’dir.

Rekabetçi elektrik piyasasına geçiş, yılda % 6 ile % 9 arasında değişen elektrik enerjisi talebinin karşılanmasına ve elektrik fiyatını azaltılmasına yardım edecek özel sektör yatırımlarının cazip hale getirilmesine ihtiyaç duymaktadır. Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretmeyi teşvik eden ilk yenilenebilir enerji kaynakları kanunu 2005 yılında kabul edilmiştir. Bu kanun 2010 yılında değiştirilmiş, yenilenebilir enerji kaynakları destek mekanizmasına tabi üretim lisansı sahipleri için, 10 yıl süreyle rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisi tarifesi 7.3 c/kWh (ABD doları) olarak belirlenmiştir.

Rüzgar enerjisi üretim lisansı alan lisans sahipleri için, bu kanun kapsamındaki yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı ve 31/12/2015 tarihinden önce işletmeye giren üretim tesislerinde kullanılan mekanik ve/veya elektro-mekanik aksamın yurt içinde imal edilmiş olması halinde; bu tesislerde üretilerek iletim veya dağıtım sistemine verilen elektrik enerjisi için, yukarıda verilen fiyata, üretim tesisinin işletmeye giriş tarihinden itibaren beş yıl süreyle; 0.6-1.3c/kWh ilave edilmesi kabul edilmiştir (TBMM, 2010).

1.3. Literatür Araştırması

Bu çalışmada, İzmir-Aliğa bölgesi için rüzgar karakteristikleri ve potansiyeli belirlenmiş, bu bölgede kurulabilecek rüzgar enerjisi destekli hidrojen üretim sistemi için tekno-ekonomik analiz yapılmıştır. Bu amaçla aşağıdaki kesimde önce, rüzgar karakteristikleri ve potansiyelinin belirlenmesi ile ilgili yapılan çalışmalar, sonrada rüzgar enerjisi destekli hidrojen üretimi amacına yönelik daha önce yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

1.3.1. Rüzgar karakteristiklerinin belirlenmesi ve enerji üretimi konularında yapılan çalışmalar

Chang (2011), çalışmasında rüzgar enerjisi potansiyeli belirleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılan Weibull dağılımı parametrelerini (k ve c) belirlemek için altı farklı metod kullanmış, sonuçları Monte-Carlo simülasyonu, Kolmogorov-Smirnov, RMSE gibi testler kullanarak karşılaştırmıştır. Weibull parametrelerinin belirlenmesinde veri sayıları az olduğunda Grafik Metoden kötü performansı göstermekte, Standart Sapma–

Ortalama Hız ve Enerji Model Faktörü Metodunun performansları Grafik Metodun performansını takip etmektedir. Veri sayısı arttıkça ele alınan altı farklı yöntemin performansı artmakta, Grafik Metodun performansı Standart Sapma–Ortalama Hız ve Enerji Model Faktörü Metodunun performanslarından daha iyi olmaktadır. Gerçek verilerin analizinden, kullanılan altı farklı metodunda kabul edilebilir doğrulukta olduğu ve Maksimum Olabilirlik metodunun en iyi performansı gösterdiği görülmektedir.

Rocha ve diğ.(2012)çalışmalarında, Brezilya'nın kuzey bölgelerine (Comacim, Paracuru) ait rüzgar hız verilerini kullanarak Weibull dağılımı parametrelerinin belirlenmesinde yedi farklı sayısal metodun etkinlik analizini ve karşılaştırılmasını yapmışlardır. Çalışmada R^2 , RMSE, Ki-kare testi uygulanarak önerilen metodların etkinlikleri değerlendirilmiştir. Nümerik iterasyon kullanan Moment, Maksimum Olabilirlik, Modifiye Edilmiş Maksimum Olabilirlik, Eşdeğer Enerji Metodları Weibull dağılım parametrelerinin belirlenmesinde rüzgar hızı histogramı ile daha iyi uyum göstermiştir. Elde edilen sonuçlardan Eşdeğer Enerji Metodu'nda Weibull parametrelerinin belirlenmesinde yeterli bir metod olduğu gösterilmiştir.2005 yılı verileri kullanıldığında Comacim için Weibull şekil parametresi-k, değerlendirilen farklı metodlara göre 2.84 ile 3.04 değerleri arasında değişirken, ölçek parametresi-c 11.18 ile 11.92 m/s değerleri arasında değişmektedir. Paracuru için k değerleri sırasıyla 3.28 ile 6.79 m/s arasında ve c değerleri 11.41 ile 13.28 m/s değerleri arasında değişmektedir.

Ahmed (2011) Nil nehri kıyısında bulunan Aswan şehrinin rüzgar karakteristiklerini 1995 ile 2004 yılları arasında ölçülen rüzgar hızı verileri kullanılarak belirlemiş, Weibull dağılımını kullanarak rüzgar hız dağılımını belirlemiştir.Çalışmada, Weibull parametrelerinin belirlenmesinde Grafik Metod ve moment metodları kullanılmış yıllık ortalama şekil parametresi-k değeri 1.79, ölçek parametresi-c değeri 5.22 m/s olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, 1.5 MW kapasiteli 30 adet rüzgar türbininden oluşan bir santral göz önünde bulundurularak, yıllık elektrik enerjisi üretimi WASP programı vasıtasıyla belirlenmiştir. Santralin yılda 152 GWh elektrik enerjisi üretebileceği ve birim elektrik enerjisi üretim maliyetinin 2 Avro cent/kWh olabileceği belirtilmiştir.

Gökçek ve diğ.(2007a) Elektrik İşleri Etüt İdaresi Kırklareli rüzgar gözlem istasyonuna ait 2004 yılı rüzgar hızı verilerini kullanarak o bölgeye ait rüzgar karakteristiklerini incelemişler, Standart Sapma-Ortalama Hız Metodu'nu kullanarak yıllık Weibull şekil

parametresini 1.75, ölçek parametresini ise 5.25 m/s olarak hesaplamışlardır. Weibull parametresine bağlı yıllık ortalama güç yoğunluğu değeri 138.85 W/m² gözlem verilerine göre ortalama güç yoğunluğu değeri ise 142.75 W/m² olarak belirlenmiştir. Çalışmada gözlem dağılımı ile Weibull ve Rayleigh dağılımlarının Ki-kare ve RMSE test metodları kullanılarak karşılaştırılmaları yapılmış Weibull dağılımının gerçek verilere göre elde edilen dağılımla daha uyumlu olduğu görülmüştür.

Zhou ve diğ.(2010), Kuzey Dakota’da beş farklı alan için rüzgar hızı dağılımlarının ayrıntılı karşılaştırılmasını yapmışlar olasılık yoğunluk fonksiyonlarını değerlendirmişlerdir. Yaygın kullanılan Weibull ve Rayleigh dağılımlarına ek olarak, gama, lognormal, ters Gauss ve maksimum entropi prensibini kullanmışlardır. Çalışmada Ki-kare ve RMSE gibi metodlarla belirlenen dağılımların uygunluğu test edilmiştir. Rayleigh dağılımın ele alınan alanlar için yetersiz kaldığı görülmüştür. Maksimum entropi prensibine göre elde edilen dağılımların uygunluğaise bölgeden bölgeye değişmektedir.

Keyhani ve diğ.(2010) İran-Tahran’da rüzgar enerjisi potansiyelini belirlemek için bir çalışma gerçekleştirmişler, Weibull dağılımı vasıtasıyla rüzgar hızı dağılımı karakteristiğini belirlemişlerdir. 1995-2005 yılları arasındaki verileri kapsayan analizde Weibull şekil parametresi-k 1.91 ile 2.26 arasında değişmekte, Weibull ölçek parametresi-c 4.38 ile 5.1 m/s arasında değişmektedir. Mevsimsel değerlendirmede en düşük rüzgar potansiyelinin Ağustos, en yüksek potansiyelin ise Nisan ayında olduğu belirlenmiştir.

Ohunakin ve diğ.(2012) çalışmalarında, Nijerya’da bazı bölgeler için iki ticari rüzgar türbini göz önünde bulundurarak elektrik enerjisi üretimini teknik olarak değerlendirmişlerdir. Ayrıca şimdiki değer metodu kullanarak maliyet analizi gerçekleştirmişlerdir. İnceledikleri bölgelerde kapasite faktörlerinin % 4.6 ile % 43 arasında değişmiş, enerji maliyeti ise en düşük 0.0222 \$/kWh, en yüksek 0.2074 \$/kWh olarak hesaplanmıştır.

Ohunakin (2011) bir diğer çalışmasında Nijerya’da 5 farklı bölge için 36 yıllık rüzgar hızı verilerini kullanarak Weibull dağılımını belirlemiş, aylık, mevsimsel ve yıllık bazda

güç yoğunluğu değişimlerini incelemiştir. Farklı nominal güçlerde rüzgar türbinleri gözönünde bulundurarak enerji üretimi ve kapasite faktörü hesapları yapmıştır

Adaramola ve diğ.(2011) Nijerya'nın kuzey bölgelerinde altı farklı yer için 19 ile 37 yıl arasında değişen ölçümleri içeren rüzgar hızı verilerini kullanarak rüzgar enerjisi potansiyelini incelemişler ve küçük ve orta ölçekli rüzgar türbinleri ele alarak enerji üretimini incelemişlerdir. Çalışmada bir değere getirilmiş maliyet metodunu kullanarak birim elektrik enerjisi maliyetini hesaplamışlardır. Çalışmada elde edilen sonuçlardan, elektrik enerjisi maliyetinin 4.02¢/kWh ile 166.79¢/kWh değerleri arasında değişmekte olduğu ve incelenen bölgelerden biri olan Minna'nın elektrik enerji üretimi bakımından en uygun bölge olduğu görülmektedir.

İslam ve diğ.(2011) Malezya Labuan'da 2006 ve 2008 yılına ait rüzgar verilerini kullanarak Weibull dağılımının belirlenmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Aylık ve yıllık en yüksek ortalama hız değeri sırasıyla 4.76 m/s 3.39 m/s olup, yıllık Weibull şekil parametresi-k 1.86, ölçek parametresi ise 3.81 m/s olarak hesaplanmıştır. Kudat'ta 2008 yılı için maksimum güç yoğunluğu 67.40 W/m², maksimum enerji yoğunluğu da 590.40 kWh/m²/yıl olarak belirlenmiştir. Bölgede en olası hız 2.44 m/s, maksimum enerji taşıyan rüzgar hızı ise 6.02 m/s'dir.

Akpınar ve Akpınar (2009) Elazığ-Türkiye'de 3 farklı rüzgar gözlem istasyonunun 8 yıllık verilerini kullanarak rüzgar hızı olasılık dağılımlarını Weibull metodu ve maksimum entropi metodunu kullanarak belirlemişler RMSE, R², Ki-kare gibi test yöntemleriyle dağılımın gerçek dağılıma uygunluğunu kontrol etmişlerdir.

Lu ve diğ.(2002) Hong Kong adalarında rüzgar enerjisiyle elektrik üretebilme potansiyelini araştırmışlar, rüzgar hızı verileri kullanarak olasılık dağılım fonksiyonları elde etmişlerdir. 10 kW'lık bir rüzgar türbininin simülasyonunu gerçekleştirerek ele alınan alan için kapasite faktörü ve elektrik enerjisi üretimi hesapları yapmışlardır.

Ouammi ve diğ.(2010) İtalya'nın kuzey batısında bulunan dört farklı bölgenin 2002 ile 2008 yılları arasında kaydedilen rüzgar hızı verilerini kullanarak, rüzgar enerjisi potansiyelini belirlemeye yönelik bir çalışma gerçekleştirmişler, rüzgar karakteristiklerinin aylık ve mevsimsel değişimlerini araştırmışlardır. Ele alınan

bölgeler için Weibull dağılımı karakteristikleri ve güç yoğunluğu değişimleri aylık ve kule yüksekliğine göre belirlenmiştir.

Akdağ ve Güler (2010), Türkiye’de ondört farklı alan için, 80 m hub yüksekliğinde 2 MW nominal gücünde bir rüzgar türbini göz önünde bulundurarak elektrik enerjisi üretimini, kapasite faktörünü ve şimdiki değer metodunu kullanarak birim elektrik enerjisi üretim maliyetini hesaplamışlardır. Kapasite faktörleri incelenen bölgeler için % 19.7 ile % 56.8 arasında değişirken elektrik enerjisi maliyeti 1.73 ile 4.99 \$cent/kWh arasında değişmektedir.

Gökçek ve diğ.(2007b) Türkiye-Kırklareli bölgesinde nominal güçleri 300 kW ile 2500 kW arasında değişen güçlerde rüzgar türbinleri göz önünde bulundurarak elektrik enerjisi üretimi ve birim elektrik enerjisi üretim maliyetini hesaplamışlardır. Enerji üretimi hesabı zaman serisi yaklaşımı kullanılarak, ekonomik analiz ise bir değere getirilmiş maliyet metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ayrıca elektrik enerjisi maliyetine işletme bakım eskalasyon oranının etkisi ve türbin kule yüksekliğinin etkisi incelenmiştir. Kullanılan türbine bağlı olarak kWh başına elektrik enerjisi üretim maliyeti 5.37 ve 11.91 değerleri arasında değişmektedir.

Bagiograss ve diğ.(2007) Batı Yunanistan’da dört farklı alan (Agrinio, Missolonghi, Aktio, Araxos) için üç farklı metod (Grafik, Ortalama Hız - Standart Sapma, En Yüksek Olabilirlik] kullanarak Weibull parametrelerini belirlemişler her bir gözlem istasyonu için çeşitli nominal güçlerde rüzgar türbinleri kullanarak farklı kule yüksekliklerinde elektrik enerjisi üretimi değerlendirmesi yapmışlar ve elektrik enerjisi maliyetlerini hesaplamışlardır.

1.3.2. Hidrojen üretiminde rüzgar enerjisi kullanımıyla ilgili yapılan çalışmalar

Gökçek (2010a) çalışmasında 10 kW nominal gücünde bir rüzgar türbini ile 2 kW nominal gücünde PEM elektrolizör’den oluşan bir sistem ele alarak bu sistemde elektrik enerjisi ve hidrojen üretim maliyeti analizi gerçekleştirmiştir. Çalışmada iki farklı mod düşünülmüş ilk modda sistem bir şebekeye bağlanmamış elektrolizörün ihtiyacından fazla üretilen enerji atık enerji olarak değerlendirilmiştir. İkinci modda sistem bir şebekeye bağlanmış üretilen fazla enerji şebekeye satılmıştır. Maliyet analizinde bir

değere getirilmiş maliyet metodu kullanılmıştır. Üretilen hidrojenin bir değere getirilmiş maliyeti 0.3485 ile 4.4849 US\$/kg arasında değişmektedir.

Bir Norveç adasında yakıt hücresi tahrikli feribotta kullanılmak üzere için hidrojen üretilmek için rüzgar-hidrojen enerji sisteminin değerlendirilmesine yönelik bir çalışma Greinerve diğ.(2007) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, hidrojen maliyeti ve sistem boyutlandırılmasını içeren bir metod geliştirilmiş, sistem olarak rüzgar türbini, elektrolizör, kompresör, depolama tankı ve inverter den oluşan bir yapı ele alınmıştır. Değerlendirmede şebekeye bağlı sistem ve izole edilmiş sistem olarak iki farklı durum göz önünde bulundurularak, hidrojen maliyeti şebekeye bağlı sistemde 2.8 ¥/kg izole edilmiş sistemde ise 6.2 ¥/kg olarak hesaplanmıştır.

Shakya ve diğ.(2005)yıllık ortalama 932 kWh/m² rüzgar enerjisi ve 1784 kWh/m² güneş enerjisi potansiyeline sahip Avustralya-Cooma adasında şebekeden bağımsız hidrojen depolamalı rüzgar-güneş hibrit enerji sisteminin fizibilite analizini gerçekleştirmişlerdir.Sistemdeki fazla elektrik enerjisi kullanılarak elektroliz vasıtasıyla hidrojen üretilmiş, bir değere getirilmiş maliyet metoduyla maliyet analizi yapılmıştır. En düşük bir değere getirilmiş maliyet 2.52 AU \$/kWh e değeri ile % 100 güneş enerjili sistemde hesaplanmıştır.

Geer ve diğ.(2005)çalışmalarında Martha-Vineyard, Massachusetts’de toplu taşımada hidrojen yakıtlı otobüslerin hidrojen ihtiyacının rüzgar enerjisi destekli sistemler tarafından sağlanabilmesinin teknik ve ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. Önerilen sistem şebekeye bağlı rüzgar türbini-elektrolizör sisteminden hidrojen yakıtlı otobüslere gaz hidrojen sağlamak için dizayn edilmiştir.1. 5 MM nominal gücündeki bir rüzgar türbini ile birleştirilen 252 kW’lık elektrolizör sisteminden üretilen hidrojen maliyetinin 3.55 \$/kg olduğu hesaplanmıştır.

Mantz ve De Battista (2008)bir rüzgar türbinin boşa çalıştığı durumda fazla elektrik enerjisinden hidrojen üretimi ile ilgili bir çalışma gerçekleştirmiş, şebeke ve elektrolizörün eşzamanlı çalışmasını sağlayacak kontrol gereksinimleri araştırılmıştır. Sistemin farklı çalışma modları için kontrol stratejileri geliştirilmiştir.

Sopian ve diğ.(2009) hidrojen üretimi amacıyla tasarlanan Fotovoltaik Hücre ve Rüzgar Türbini hibrit sisteminin performansını araştırmışlardır. Sistemi oluşturan her bir elemanın matematik modelini oluşturarak sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Küresel güneş radyasyonu ve rüzgar hızına bağlı olarak hidrojen üretimi değişimini incelemişlerdir.

Khan ve Iqbal (2009) rüzgar-hidrojen hibrit izole sistemin ayrıntılı modellemesini ve simülasyonunu gerçekleştirerek sistemdeki alt sistemlerin dinamik modellerini oluşturmuşlardır. Çalışmada hidrojen basıncı ve rüzgar hızına bağlı olarak sistemdeki ani yük değişimleri incelenmiş, MATLAB-Simulink kullanılarak dinamik sistem modellemesi yapılmıştır.

Hamane ve diğ.(2009) Cezayir-Ghardaia'da rüzgar enerjisinden hidrojen üretiminin fizibilite çalışmasını yapmışlar, 10 kW nominal gücünde rüzgar türbini kullanarak 5 kW gücünde bir elektrolizörden hidrojen üretimini belirlemişlerdir. Rüzgar türbini kule yüksekliği ve rüzgar hızı değişimine bağlı olarak aylık ve yıllık bazda hidrojen üretim miktarını incelemişlerdir.

Korpas ve Greiner (2008) zayıf şebekelerde rüzgar enerjisi kullanarak hidrojen üretim olanaklarını araştırmışlardır. Hem izole hemde şebekeye bağlı sistemlerde hidrojen üretimi ve depolanması inceleyerek, farklı hidrojen depolama uygulamalarının fayda ve kısıtlamalarını araştırmışlar, rüzgar enerjisi- H_2 üretim sisteminin performansını değerlendirmişlerdir. Otomobiller için hidrojen üretiminde zayıf şebekelerde fazla rüzgar enerjisinin kullanılmasını simüle eden bir çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Aguado ve diğ.(2009) rüzgar-hidrojen enerjisi depolama ve dönüştürme sisteminin ekonomik fizibilite analizini gerçekleştirmişlerdir. Rüzgar enerjisinin değişkenlik problemi ele alınarak sistemdeki depolama kapasitesinin düzenlenmesi konusu üzerinde durmuşlar depolamada enerji taşıyıcısı olarak hidrojeni seçmişlerdir. Çalışmada, depolama ekipman maliyeti ve dönüşüm proseslerindeki kayıplar üzerinde durulmuş, optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Mevcut rüzgar santralleri ile karşılaştırılmalar yapılmıştır.

Bernal-Agustí'n ve Dufo-Lo'pez, (2008) rüzgar-hidrojen enerji sisteminde üretilen enerjinin saatlik enerji yönetimi ile ilgili tekno-ekonomik analiz gerçekleştirmişlerdir. Enerji talebinin olmadığı durumlarda fazla enerjiden hidrojen üretimi, talebin olduğu durumlarda da üretilen hidrojen kullanılarak elektrik enerjisi üretimi yapılması amacıyla üretim eğrisi ve talep eğrisini ayarlayan bir metod önerilmiştir.

Mathur ve diğ.(2008) deniz suyunun elektrolizi ile hidrojen üretimi için rüzgar enerjisinin kullanımı konusunda bir çalışma yapmışlar, deniz üzerinde kurulan tesislerin ekonomikliğini inceleyerek, benzin gibi diğer yakıtlarla maliyet karşılaştırması yapmışlardır. Çalışmada elde edilen sonuçların güvenilirliği toplumda rüzgar enerji sistemlerinin hızlı/yavaş öğrenilme hızı oranları gibi çeşitli senaryolar geliştirilerek kontrol edilmiştir.

Ulleberg ve diğ.(2010) Norveç'in Utsira adasında bulunan 600 kW gücünde rüzgar türbini, 55 kW gücünde elektrolizör ve 10 kW gücünde yakıt hücresinden oluşan otonom rüzgar-hidrojen enerji sisteminin çalışmasını modelleme araçları kullanarak değerlendirmişler, ortalama güç talebi ve rüzgar hızı verilerini girdi olarak kullanarak tesisin çalışmasını tipik bir ay için saatlik olarak incelemişlerdir. Çeşitli alternatif sistem dizaynları yaparak, bu sistemlerin çalışmasıyla ilgili sorunlar üzerinde durmuşlardır. Çalışmada % 100 otonom rüzgar-hidrojen enerji sistemini gerçekleştirmek için hidrojen sisteminin veriminin artırılmasının ne derece önemli olduğu gösterilmiştir.

Lee ve diğ.(2010)ömür boyu değerlendirme ve ömür boyu maliyet yöntemlerini kullanarak bir rüzgar enerjisi-hidrojen üretim sisteminin ekonomik ve çevresel değerlendirmesini yapmışlardır. Çalışmalarında hidrojenin elektroliz yoluyla üretilmesi durumunda enerji kaynağı olarak rüzgar enerjisi ve fosil yakıtlarla üretilen elektriğin kullanılmasının çevresel ve mali analizlerini yapmışlar, çevresel açıdan rüzgar enerjisinin üstünlüğünü vurgulamışlardır.

Garcia ve Weisser (2006)hidrojen depolamalı rüzgar türbini-dizel sistemini boyutlandırmış iki farklı model kullanarak karşılaştırmalar yapmışlardır. Amaç fonksiyonu olarak maliyeti seçip saatlik rüzgar hızı ve elektrik talebi verilerini kullanarak maliyet optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir.

BÖLÜM II

RÜZGAR ENERJİSİ VE HİDROJEN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

2.1. Rüzgar Enerjisi

Max Planck'a göre enerji bir sistemin dış etkiye neden olma kabiliyeti olarak tanımlanır (Streicher, 2007). Daha genel tanım ise, iş yapma kapasitesidir. Enerji ısı enerjisi, ışık (radyant enerji), mekanik enerji, elektrik enerjisi, kimyasal enerji ve nükleer enerji gibi farklı formlarda bulunur. Enerji kaynakları ise yenilenebilir ve yenilenemeyen (veya tükenen) olmak üzere genelde iki grup altında incelenir. Yenilenebilir enerji doğal çevreden elde edilen ve sürekli kendini yenileyebilen enerjidir (Twidell ve Weir, 2006). Bu enerji farklı şekillerde bulunabilir; enerji doğrudan veya dolaylı bir şekilde güneşten veya yer kabuğunun derinliklerinden çıkarılan ısıdan elde edilir. Rüzgar, güneş, biyokütle, biyoyakıtlar, jeotermal, hidrolik güç, dalga-gelgit ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilen hidrojen enerjisi tanım içerisinde yer alan diğer enerji kaynaklarıdır (Akkaya, 2007).

Enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarından uzun yıllardan beri yararlanılmaktadır. Yenilenebilir enerjiler, geleneksel kaynaklar ve yeni kaynaklar olmak üzere iki kısımda incelenebilir. Odun, bitki ve organik maddelerin geleneksel yollarla yakılmasını kapsayan biyokütle enerjisi ve büyük ölçekli hidrolik enerji; geleneksel yenilenebilir kaynaklarıdır. Rüzgar, güneş, modern biyokütle, jeotermal, küçük hidrolik, dalga-gelgit ve jeotermal enerji ise yeni yenilenebilir enerji kaynakları olarak değerlendirilmektedir. Eski çağlardan beri su pompalanmasında, tahıl öğütülmesinde, yel değirmenlerinde, kurutma işlemlerinde ve yelkenli gemilerde bu kaynaklardan yararlanılmaktadır. Buharlı makinelerin icadı ile başlayan endüstrileşme tüm dünyada yenilenebilir enerji kullanımının zamanla azalmasına neden olmuştur. Fosil yakıtların egemenliğine dayanan enerji çağı, son iki yüzyıl boyunca sorunsuz devam etmiş ancak 1973 petrol krizi ilk kez enerji kaynakları konusunda bir güvensizlik ortamı yaratmıştır. Bu güvensizlik ortamı bütün dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarına karşı yoğun bir ilgiye neden olmuştur. 1980'lerin ortalarında petrol fiyatlarının düşmesiyle bu kaynaklara olan ilgi azalmıştır. Fakat 1990'lı yıllarda ortaya

ıkan evresel farkındalık; atmosferde kirlilik oluşturan emisyonları salmayan yenilenebilir enerji kaynaklarına ilgiyi artırmıştır(Akkaya, 2007).

Son zamanlarda yenilenebilir enerji kaynakları kullanımındaki en büyük sıçramayı rüzgar enerjisi yapmıştır. Rüzgar enerjisi, güneş enerjisinin dönüşüme uğramış biçimi açıklanabilir. Rüzgar güneşten gelen enerjinin karaları, denizleri ve atmosferi her yerde özdeş biçimde ısıtamamasından ve buna bağlı oluşan basınç farklarından kaynaklanan hava hareketi olarak tanımlanabilir. Isınan hava yükselir ve atmosferde dolaşarak soğuk alanlarda tekrar yzeeye alçalır. Hava akımı dünyanın yaptığı dönme hareketinin neden olduğu Coriolis kuvvetlerinden oluka etkilenir. Sonuçta dünya üzerinde alize rüzgarları ve “kükreyen kırklı” olarak bilinen büyük ölçekli hava sirkülasyon yapıları oluşur. Güneş ışınlarının etkinliği ekvator bölgelerinde kutuplara göre daha fazladır(Burton ve diğ., 2001).Bu nedenle ekvatorial bölgelerde hava diğer enlemlere oranla daha fazla ısınır. Daha sıcak ve hafif olan hava ekvatorndan kutuplara doğru akarken bu havanın yerini kutuplardan dönen ağır hava alır(Freris ve Infield, 2008).Dünyanın batıdan doğuya dönüşü nedeniyle kuzeye doğru akan hava doğuya, güneye doğru akan hava batıya sapar. Kuzeye akan hava 30° kuzey paraleline geldiğinde tamamen doğuya dönmüş olur. Bu hava akımlarına batı egemen rüzgarları adı verilir. Bir kısım hava yüksek basıncın etkisiyle güneye akar ve dünyanın dönüşüyle batıya saparak yukarıda bahsedilen Alize rüzgarlarını oluşturur. 50° kuzey paralelinin üzerindeki kutup gndoğusu rüzgarları da aynı sebeple oluşur. Ekvatorun güneyinde aynı şekilde aynı şekilde hava akımları oluşur.

Küresel rüzgar oluşumlarının yanında yerel şartlardaki değişkenliğe de bağlı olarak rüzgarlar oluşur. Dağlar ve vadilerden, ağaç ve binalar gibi daha yerel engellere kadar, değişen arazi yapısı rüzgar oluşumu üzerinde önemli etkilere sahiptir (Freris ve Infield, 2008). Dünyanın bütün yüzeyi güneş ısına eşit tepki göstermez. Deniz ve karaların ısınmalarındaki farklılıklar hava hareketlerinde değişikliklere neden olurlar. Denizler yüksek ısı depolama yeteneğiyle karadan daha yavaş ısınıp daha yavaş soğur. Bu farklı ısınma ve soğuma hızları kara parçalarının nem ve sıcaklıklarıyla beslenmiş büyük hava kütelleri oluşturur. Gündüzleri kara üzerindeki sıcak hava yükselir ve yerini deniz üzerindeki soğuk hava alır. Böylece gündüzleri denizden karaya doğru deniz meltemleri adı verilen rüzgarlar, geceleriye karadan denize doğru kara meltemleri adı verilen rüzgarlar oluşur. Deniz meltemleri 3-8 m/s arası hızla eserken kara meltemleri 2-4 m/s

arası hızla eserler. Bu rüzgarlara benzer şekilde dağlık bölgelerde dağ-vadi meltemleri adı verilen rüzgarlar oluşur. Gündüzleri serin hava, güneş etkisiyle ısınarak vadiden dağa doğru yükselir. Gece ise daha hızlı soğuyan dağ havası vadiye inerken daha sıcak olan havayla yer değiştirir. Fakat bu rüzgarlar deniz kara meltemleri kadar güçlü olmadığından enerji kaynağı olarak yetersiz kalırlar. Enerji üretimi açısından denizler ve karalar ya da dağlar ve vadiler arasındaki hava akımlarına dayalı yerel rüzgarlar önemlidir(Koç, 2002).

Rüzgar enerjisi üretiminde etkili olan üç önemli özellik vardır. Bunlar;

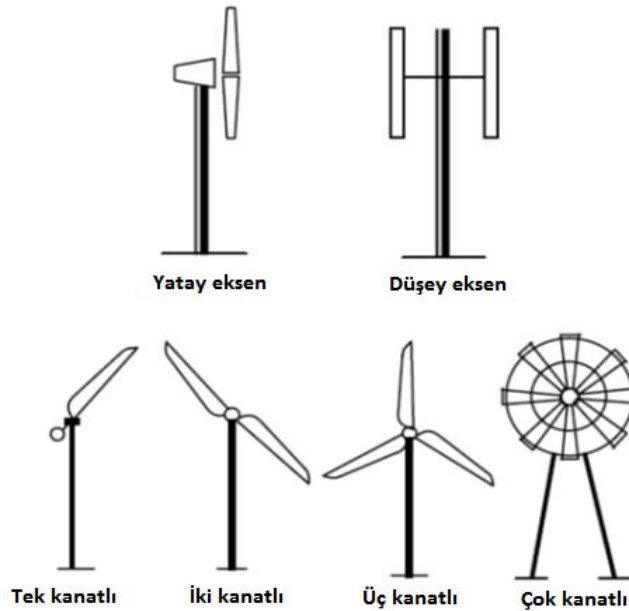
- Rüzgarın hızı
- Rüzgarın yönü
- Rüzgarın frekansı

Yeryüzünün yüzey yapısına ve üniform olmayan ısınmasına bağlı olarak bu özellikler zamansal farklılıklar gösterirler. Rüzgarın enerjisinin değerlendirilmesinde etkili olan en önemli özellik rüzgarın hızı, coğrafi konum, yüzey yapısı ve yüzeyden olan yüksekliktir. Rüzgar enerjisi, elektrik enerjisi üretiminde, bataryaların şarj edilmesinde, su depolama ve pompalama sistemlerinde, suyun elektrolizinde ve diğer bir çok alanda kullanılabilme potansiyeline sahiptir(Koç, 2002).

Rüzgar türbinleri havanın kinetik enerjisini kullanarak enerji üreten makinalardır. Elektrik enerjisi üretimi amaçlı ilk rüzgar türbini, ondokuzuncu yüzyılın sonlarında 12 kW DC rüzgar türbini jeneratörüyle Amerika’da üretilmiştir. O günden bu yana farklı özellikte çok çeşitli rüzgar türbinleri üretilmiş bunlardan bazıları ticarileşecek düzeye gelememiştir. Günümüzde ise nominal gücü 6 MW ve daha da üzerinde olan ve deniz üzerinde çalışan rüzgar türbinleri yaygın bir biçimde kullanılmaya başlanmıştır(Burton ve diğ., 2001).

Rüzgar türbinleri dönme eksenine bağlı olarak yatay eksenli ve düşey eksenli rüzgar türbinleri (Savonius tip, Darrieus-iki kanatlı tip, Darrieus-üç kanatlı tip) olmak üzere iki

katagoride sınıflandırılmaktadırlar.Şekil 2.1’de eksene ve kanat sayısına rüzgar türbinleri görülmektedir. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde dönme eksenini yere ve rüzgar akışına paraleldir. Günümüzde kullanılan ticari rüzgar türbinlerinin çoğu bu katagoride bulunmaktadır. Düşük rüzgar hızlarında devreye girebilme ve yüksek güç katsayısı gibi özellikleri bu tip rüzgar türbinlerinin avantajlarındandır.Ancak, dişli kutularının ve jeneratörlerin kule üzerinde bulunması tasarımlarını karmaşıktırılmakta ve maliyetlerini artırmaktadır. Diğer taraftan rüzgarın yönüne göre türbini yönlendiren ek mekanizmalar gerektirmektedirler.Yatay eksenli rüzgar türbinleri tek kanatlı, iki kanatlı ve çok kanatlı olmak üzere kanat sayısına bağlı olarak sınıflandırılmaktadırlar.Tek kanatlı rüzgar türbinleri kanat malzemesinin daha az kullanılması nedeniyle daha ucuzdur. Bu tip rüzgar türbinlerinde sürüklenme kayıpları daha azdır. Ancak kanadı dengelemek için hub üzerine karşı ağırlık eklenmesi gerekmektedir. Tek kanatlı rüzgar türbinleri dengeleme problemleri nedeniyle çok fazla kullanılmamaktadırlar. İki kanatlı rüzgar türbinleride benzer dezavantajlara sahiptir. Elektrik üretiminde kullanılan ticari rüzgar türbinlerinin çoğu üç kanatlı rüzgar türbinleridir. Bu türbinler üniform aerodinamik yükleme açısından daha stabillerdir(Sathyajith, 2006).



Şekil 2.1. Eksene ve kanat sayısına göre rüzgar türbinleri

2.2. Hidrojen ve Hidrojen Üretim Yöntemleri

2.2.1. Hidrojenin özellikleri

Doğadaki en basit atom yapısına sahip hidrojen, günümüzde kabul gören evrenin oluşumu kuramında da belirtildiği gibi, bütün yıldızların ve gezegenlerin temel adresidir. Evrende %90 dan fazla hidrojen bulunmaktadır. Güneş ve diğer yıldızların termonükleer tepkimeye vermiş olduğu ısının yakıtı da yine hidrojen olup, evrenin temel enerji kaynağıdır. Periyodik cetvelin en başında yer alan hidrojenin çekirdeğinde bir proton ve çevresinde yalnız bir elektron bulunur. Ancak 5000 hidrojen atomundan birinin çekirdeğinde birde nötron bulunur. Bu durumdaki hidrojen atomuna "döteryum" adı verilir. Döteryum, hidrojenin önemli bir yerdeşi olup, bu izotopun zenginleştirilmesi ve oksijenle birleştirilmesinden elde edilen suya "ağır su" denir. Ağır su, nükleer reaktörlerde, uranyumun parçalanması sırasında çıkan nötronların yavaşlatılması için moderatör olarak kullanılır. Hidrojenin çok daha az bulunan bir başka izotopu da, çekirdeğinde iki nötron bulunan ve trityum adı verilen hidrojendir (Şenaktaş, 2005).

Normal sıcaklık ve basınç altında kokusuz ve renksiz olan hidrojen oksijenle birleştğinde yaşam için en önemli madde, yani su elde edilmektedir. Hidrojen çok hafif bir gaz olup, yoğunluğu havanın 1/14'ü, doğal gazın ise 1/9'u kadardır. Hidrojen tüm yakıtlar arasında birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahip olan yakıt olup, 141.90 MJ/kg olan üst ısı değeri, benzinin ısı değerinin hemen hemen üç katıdır. Çizelge 2.1'de hidrojenin bazı temel özellikleri verilmiştir (Veziroğlu ve Barbir, 1998). Son tüketiciye enerji "yakıt" ve/veya "elektrik" biçiminde sunulmaktadır. İkincil enerji olan elektriğin çeşitli kullanım avantajlarının bulunmasına karşın, teknoloji yalnızca elektriğe bağlı olarak değil, yakıtı da gerektiren biçimde gelişmiştir.

Çizelge2.1. Hidrojenin özellikleri

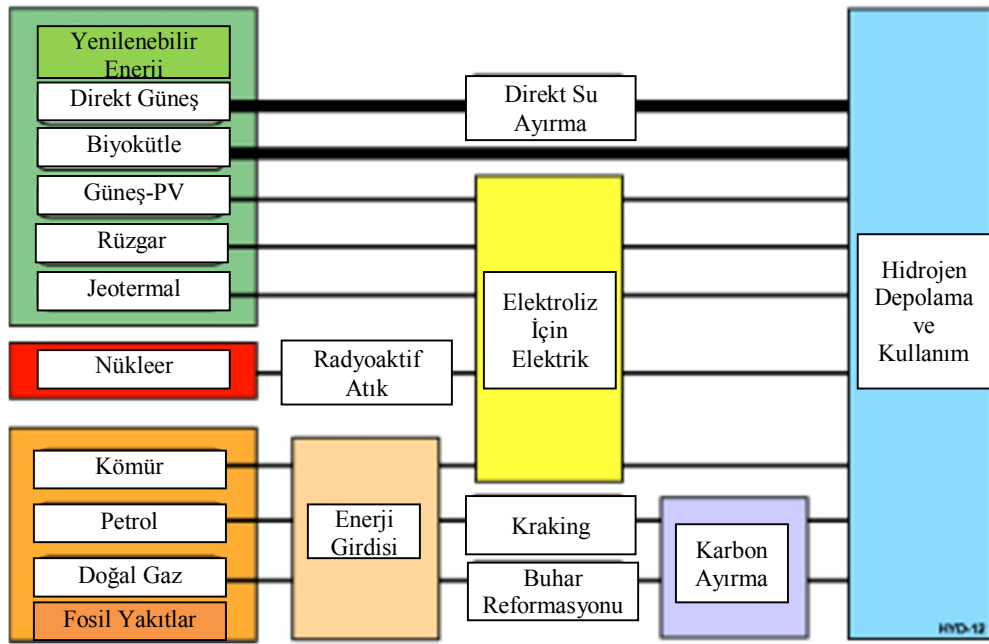
Özellik	Birim	Değer
Moleküler Ağırlık	akb	2.016
Yoğunluk	kg/m ₃	0.0838
Üst ısı değeri	MJ/kg (MJ/m ³)	141.90 (11.89)
Alt ısı değeri	MJ/kg (MJ/m ³)	119.90 (10.05)
Kaynama sıcaklığı	K	20.3
Sıvı yoğunluğu	kg/m ³	70.8
Tutuşma sıcaklığı	K	858
Hava içinde tutuşma limiti	(hac. %)	4-75
Hava içinde stokiometrik karışım	(hac. %)	29.53
Hava içinde alev sıcaklığı	K	2318
Difüzyon katsayısı	cm ² /s	0.61
Özgül ısı (Cp)	kJ/kgK	14.89

Bunun nedeni, genel enerji tüketiminin % 60'ının ısı biçiminde gerçekleşmesidir. Birincil enerji kaynaklarının, fiziksel durum değişimi içeren biçimde dönüştürülmesi ile elde olunan ikincil enerjilere, "enerji taşıyıcısı" denir. Elektrik 20. yüzyıla damgasını vuran bir enerji taşıyıcısıdır. Hidrojen ise 21. yüzyıla damgasını vuracak bir diğer enerji taşıyıcısıdır. Şekil 2.2'de hidrojen enerji sistemi dönüşümü şematik olarak gösterilmektedir (FSEC, 2012).

Hidrojen aşağıda sıralandığı gibi çeşitli avantajlara sahip ideal bir enerji taşıyıcısıdır(Şenaktaş, 2005).

- Hidrojen yenilenebilir enerji kaynakları da dahil olmak üzere herhangi bir enerji kaynağı kullanılarak üretilir.
- Hidrojen elektrik kullanılarak üretilir ve nispeten yüksek verimle de elektriğe çevrilebilir. Hidrojenin güneş enerjisi ile doğrudan üretim süreçleri de geliştirilmiştir.
- Son kullanımda hidrojen kullanılacak enerji şekline dönüşürken en yüksek verime sahiptir.
- Hidrojen gaz şeklinde (büyük ölçekli depolamada), sıvı şeklinde (hava ve uzay ulaşımında) veya metal hidrit şeklinde (araçlar ve diğer küçük ölçekli depolamada) depolanabilir.

- Hidrojen boru hatları veya tankerler ile büyük mesafelere taşınabilir (bir çok durumda elektrikten daha ekonomik ve verimlidir).
- Hidrojen diğer yakıtlardan farklı güvenlik ekipmanı ve prosedürü gerektirse de onlardan daha fazla tehlikeli değildir. Hidrojen güvenlik sıralamasında propan ve metanın (doğal gaz) arasındadır. Yangın tehlikesi ve zehirlilik dikkate alındığında hidrojen en güvenilir yakıttır.
- Hidrojen elektrikten veya yenilenebilir enerjiden üretilirken, taşınırken veya depolanırken ve son kullanımda herhangi bir kirletici üretmez veya çevreye zararlı herhangi bir etkisi yoktur. Hidrojenin yanması veya yakıt hücresinde tüketilmesi sonucu son ürün olarak sadece su üretilir. Yanma yüksek sıcaklıkta olursa havadaki azot ve oksijenden NOx oluşabilir. Ancak bu sorun diğer yakıtlarla aynıdır ve kontrol edilebilir.
- Çevresel hasarlar ve yüksek kullanma verimi dikkate alındığında solar hidrojen enerji sistemleri en düşük etkin maliyete sahiptir.



Şekil 2.2. Hidrojen enerji dönüşümü

2.2.2. Hidrojen üretim yöntemleri ve elektroliz

Hidrojen doğal bir yakıt olmayıp, birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak değişik hammaddelerden üretilen bir sentetik yakıttır. Hidrojen üretiminde tüm enerji kaynakları kullanılabilir. Kullanılan hammaddeler ise su, fosil yakıtlar ve biyokütle malzemedir. Bugün dünyada teknolojik gereksinimlerle yılda $500-600 \times 10^9 \text{ m}^3$ hidrojen fosil yakıtlardan üretilerek kullanılmaktadır (Şenaktaş, 2005).

Yakıt hidrojenin temelde, sudan yenilenebilir enerjilerle üretilmesi ana ilkedir. Hidrojen üretim yöntemlerinin başında suyun direkt elektrolizi gelir. Elektroliz için elektrik gereksinimi fosil yakıtlardan, hidroelektrik kaynaktan, nükleer güçten, jeotermal enerjiden, güneş, rüzgar ve deniz dalga enerjilerinden elde edilebilir. Gelecek için üzerinde en çok durulan yöntem fotovoltaiik güneş üreteçlerinin kullanılmasıdır. Hidrojen, suyun ısı parçalanması (termal krakingi) ile de üretilmektedir. Bir diğer hidrojen üretim yöntemi doğal gazın ve gaz hidrokarbonların buhar reformasyonudur (Şenaktaş, 2005).

Hidrojen üretimi için diğer bir yöntem kömür gazifikasyonudur. Gazifikasyon işlemi kolaylıkla kökürdün elimine edilmesine olanak tanıdığından cazip bulunmaktadır. Ortalama olarak 6 kg kömürden 3.785 l benzine eşdeğer 1 kg hidrojen elde olunur. Kömür dünyanın en zengin fosil yakıtıdır. Bilinen kömür yataklarına biçilen güvenilir ömür 200 yıl kadarsa da, bunun 400 yıla uzanabileceği söylenmektedir. Katı atıklar ve kanalizasyon materyalleri de hidrojen üretimi için hammadde olup, gazifikasyon işlemine bağlı olarak, sentez gazının hava veya oksijenle reformasyonu hidrojen vermektedir. Termokimyasal çevrimlerle sudan, fotokimyasal işlemle organometalik bileşikler veya enzim su karışımından hidrojen üretilir. Hidrojen üretimi için sıralanan teknikler dışında; fotoelektrokimyasal, biyolojik ve biyokimyasal gibi başka teknikler vardır. Biyolojik üretimde, mikroalgler ve cyanobakterialar ile biofotoreaktörlerden fotobiyolojik yöntemlerle hidrojen elde edilmektedir. (Şenaktaş, 2005).

Suyun doğru akım kullanılarak hidrojen ve oksijenlerine ayrılması işlemine elektroliz denilmektedir. Hidrojen üretimi için en basit yöntemdir. Bir elektroliz hücresi içinde, düzlem şeklinde iki elektrot ve bunların içine daldırıldığı, elektrolit olarak adlandırılan

iletken bir sıvıdan oluşmaktadır. Doğru akım kaynağı bu elektrotlara bağlandığında akım iletken sıvı içinde, pozitif elektrottan negatif elektrota doğru akar. Bunun sonucunda, su moleküllerine uygulanan doğru akım ile, hidrojen ve oksijen atomlarının bağlarının kopması sağlanır. Oluşan yüklü parçacıklardan hidrojen iyonu pozitif elektrik yüküne sahiptir ve negatif elektrotta toplanır, oksijen ise negatif yüke sahip olduğundan pozitif elektrota doğru hareket eder. Suyun elektrolizi için, 25 °C sıcaklık ve 1 atm basınçta gerekli gerilim 1,24 voltur. Bir mol suyun elektrolizi için gerekli en düşük enerji miktarı 65,3 watt-saat ve 1 m³ hidrojen üretmek için gerekli en düşük enerji miktarı 4,8 kWh'tır. (Hidronerji, 2012).

Elektroliz büyük ölçekli hidrojen üretiminde kullanılan önemli teknolojilerden biridir. Son yıllarda bu alanda yapılan çalışmalar ve gelişen teknoloji sayesinde % 90 verim elde edilmiştir. Bu konuda elektrot dizaynı ve malzeme iyileştirmeleriyle maliyeti azaltma ve kullanım ömrünü arttırmayla geliştirme çalışmalarına devam edilmektedir. Elektroliz; hidroelektrik enerji, rüzgar, dalga, akıntı, gelgit ve okyanus ısısından üretilen enerjiyle de gerçekleştirilebilir.

Elektrolizörler suyu (H₂O), elektrik enerjisi kullanarak hidrojen ve oksijene ayıran cihazlardır. Yakıt pillerinin tam tersi prensiple çalışmaktadırlar. Reaksiyonların ters yönde işlemesi hariç bütün basit teoriler ve elektrotlarda gerçekleşen reaksiyonlar yakıt pilleri için ve elektrolizörler için benzerdir. Tıpkı yakıt pillerinde olduğu gibi farklı elektrolitler kullanılabilir. Uygulamada genellikle sıvı alkaliler ve katı proton geçirgen membranları elektrolit olarak kullanılmaktadır(Hidronerji, 2012).

Elektrolizörler genel olarak iki kısma ayrılır;

1. Alkali Elektrolizörler
2. PEM-tabanlı Elektrolizörler

Alkali elektrolizörlerde potasyum hidroksit çözeltisi elektrolit olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda daha kompakt, yüksek verim, bakım maliyetlerinin azlığı ve uzun ömürlü olması nedeniyle katı polimer membranlar daha fazla tercih edilmektedir. PEM-tabanlı elektrolizörde sistem sadece protonların geçmesine izin veren polimer membran, suyun elektrokimyasal reaksiyon ile parçalandığı ve oksijenin oluştuğu anot katalizör tabakası hidrojenin oluştuğu katot katalizör tabakası ve

elektriğin uygulandığı aynı zamanda sıvının ve gazların katalizör yüzeylerine iletilmesi ve uzaklaştırılması görevini üstlenen elektrot tabakalarından oluşmaktadır. Elektrolit ve elektrotların basit yapıları PEM-yakıt pilleri ile benzerdir. Elektrotlar, gazları içeri almak yerine mümkün olduğu kadar kısa sürede dışarı atmak için biraz daha farklı yapılmaktadır. Anot ve katot katalizörlerinin zehirlenmesinin önüne geçmek için PEM elektrolizörlerde deiyonize su kullanımı zorunludur. Normal şartlar altında 1,481V olan teorik voltajın daha üzerinde bir DC voltaj uygulanarak su anotta oksijen, iki proton ve iki elektrona ayrılmaktadır. Hidrojen iyonları (protonlar) membran yoluyla anottan katoda geçerek, dış devre yardımı ile gelen elektronlarla birleşerek hidrojen gazını meydana getirmektedirler (Hidronerji, 2012).

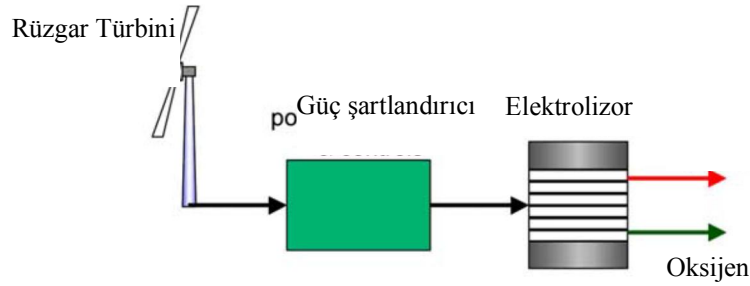
2.2.3. Rüzgar enerjisinden hidrojen üretimi

Yenilenebilir kaynakları esaslı enerji üretim sistemlerinde üretilen enerjiye ek olarak hidrojeninde üretilmesi bu enerji sistemlerini kendi kendine yeten, temiz ve sürdürülebilir kalkınma için önemli enerji sistemleri haline getirmektedir. Bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak çok hızlı gelişen rüzgar enerjisinin birim elektrik enerjisi üretim maliyeti bugün bir çok yerde, fosil ve nükleer gibi konvansiyonel enerji üretim sistemlerinin birim elektrik enerjisi üretim maliyeti ile rekabet edece düzeye gelmiştir. Ancak rüzgar enerjisi doğası gereği oldukça kesintili bir yapıya sahiptir ve saatlik, günlük ve mevsimsel hız değerleri çok değişkendir. Bu kesintili hız değerleri enerji üretimini etkilemekte ve sonuçta arz-talep arasında dengesizliğe sebep olmaktadır. Bu nedenle bu kaynaktan elde edilen enerjinin uygun yöntemlerle depolanması gerekmektedir. Depolanan enerji, talebin fazla olduğu zamanlarda yeniden kullanılabilir. Günümüzde depolama teknikleri arasında değerlendirilen fazla enerjiden hidrojen üretilmesi ve bu üretilen hidrojenin yenilenebilir kaynağın yetersiz olduğu zamanlarda yeniden kullanılabilir şekilde saklanması yöntemi oldukça cazip hale gelmiştir. Rüzgar enerjisi esaslı hidrojen üretimi maliyeti türbin ve elektrolizör yanında sistemin kapasite faktörüne de bağlıdır. Sistemin ve uygulamanın konfigürasyonuna bağlı olarak, türbin ve elektrolizörün kapasite faktörlerinin aynı olması zorunlu değildir. Rüzgar enerjisi esaslı üretilen hidrojen direkt yakıt olarak kullanılacağı gibi rüzgar enerjisi üretim sistemin performansını arttırmak amacıyla kullanılabilir.

2.3. Rüzgar Enerjisi Destekli Hidrojen Üretim Sistemlerinin Çeşitli Uygulamaları

2.3.1. Şebekeden bağımsız rüzgar-hidrojen üretim sistemi

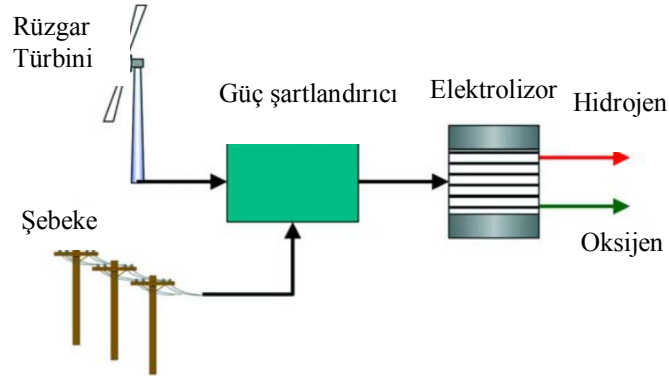
Bu sistem şebekeye bağlı değildir ve bir rüzgar türbini ile elektrifikasyon doğrudan bağlanarak hidrojen üretilir. Böyle bir sistemde şebekeye bağlı problemler meydana gelmez. Elektrolizör değişken güç arzına maruz kalır ve DC/DC veya AC/DC güç regülatörleri minimum dönüşüm kayıpları ile herhangi bir güçte elektrolizör voltaj-akım gereksinimlerini eşleştirmek için kontrol birimi ve güç şartlandırıcının bir parçası olarak görev yapar. Eğer bir rüzgar enerjisi üretim sistemi şebekeye uzaksa böyle bir sistem enerjinin hidrojen olarak taşınması bakımından iyi bir yöntem olarak değerlendirilebilir. Genel olarak 1000 km'den daha fazla mesafeler için enerjinin hidrojen olarak borular vasıtasıyla taşınması, doğrudan elektrik enerjisinin taşınmasından daha ekonomik olduğu belirtilmektedir. Şekil 2.3 şebekeden bağımsız rüzgar-hidrojen enerji sistemini göstermektedir (Sherif ve diğ., 2005).



Şekil 2.3. Şebekeden bağımsız rüzgar-hidrojen enerji sistemi

2.3.2. Şebeke destekli rüzgar-hidrojen sistemi

Şebekenin olduğu yerlerde, rüzgarın kesintili yapısı nedeniyle kesintili hidrojen üretimi problemini ortadan kaldırmak için sistem şebekeye de bağlanarak oluşturulur. Şekil 2.4'te şebeke destekli rüzgar-hidrojen sistemi görülmektedir (Sherif ve diğ., 2005).

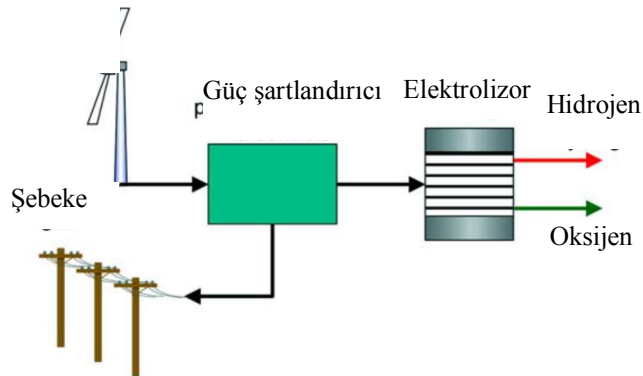


Şekil 2.4. Şebeke destekli rüzgar-hidrojen sistemi

Elektrolizör ve güç şartlandırma birimleri rüzgar türbininden ve şebekeden gelen enerjiyi birleştirerek sabit DC güç girdisi alır. Böylece elektrolizör kendi dizayn noktasında ve her zaman çalışabilir. Bu durumda kapasite faktörü artar ve hidrojenin üretim maliyeti azalır (Sherif ve diğ., 2005).

2.3.3. Rüzgar enerjisi üretim sisteminden üretilen fazla enerjinin hidrojen üretiminde kullanıldığı sistem

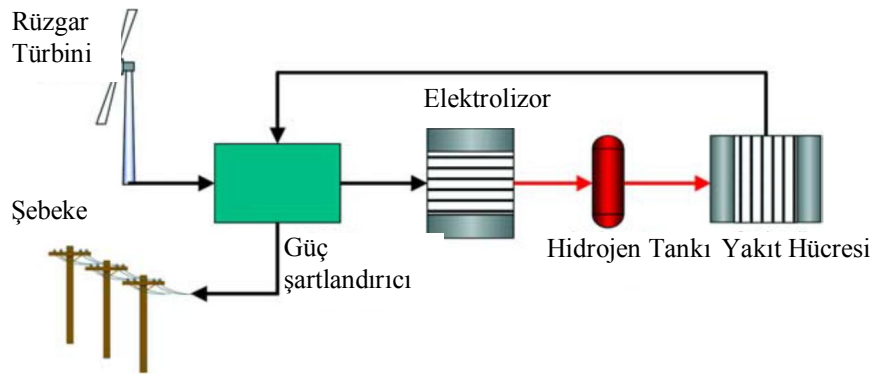
Rüzgar enerjisi ile elektrik üretim sisteminden üretilen elektriğin talep edilen miktardan fazla olması durumunda fazla elektrik enerjisi elektrolizöre gönderilerek hidrojen üretilir. Ancak bu durumda elektrolizör çoğu zaman kendi kapasitesinde çalışamaz. Şekil 2.5'te fazla elektrik enerjisinin hidrojen üretiminde kullanıldığı sistem görülmektedir (Sherif ve diğ., 2005).



Şekil 2.5. Fazla elektrik enerjisinin hidrojen üretiminde kullanılması

2.3.4. Bütünleştirilmiş rüzgar-hidrojen enerji sistemi

Şebekenin ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisini veya sabit enerji gereksinimi karşılamak amacıyla rüzgar türbini, elektrolizör ve yakıt hücresi sistemi birlikte çalıştırılabilir. Bu sistemde hidrojen tanklarını doldurmak için kompresör kullanılabilir ya da elektrolizör yüksek basınç sağlayacak şekilde dizayn edilir. Bu konfigürasyonda güç şartlandırma ve kontrol birimleri oldukça karmaşıktır. Şebekeye yakıt hücresinden güç akışı DC/DC, elektrolizör için AC/DC şeklinde sağlanmalıdır. Yakıt hücreli yenilenebilir enerji sistemi yüksek güç/uzun depolama süreli (5 kW üzeri) batarya destekli sistemden daha az maliyetlidir. Yakıt hücrelerinin ve elektrolizörün yüksek maliyetleri ve bu konfigürasyonun düşük kapasite faktörü nedeniyle üretilen elektriğin maliyeti rüzgar türbinli sistemin üretim maliyetinden fazla olacaktır.

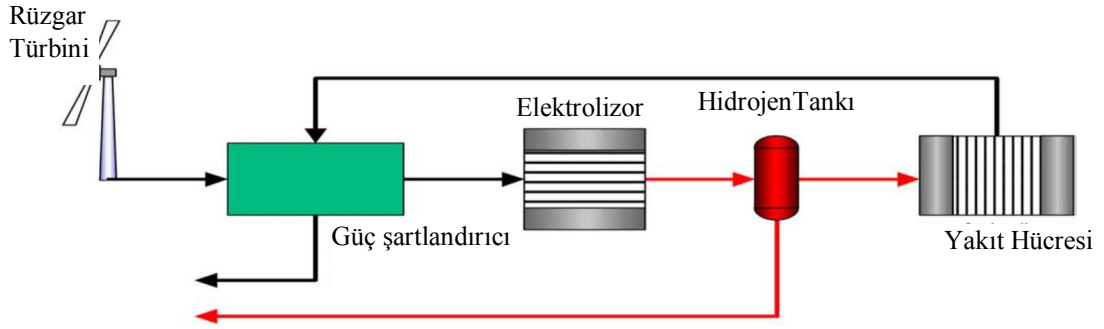


Şekil 2.6. Bütünleştirilmiş rüzgar-hidrojen enerji sistemi

Bu nedenle bu konfigürasyon sadece salınan elektriğin kaliteli olduğu ve maliyeti kompanse eden yerlerde kullanılabilir. Şekil 2.6'da bütünleştirilmiş rüzgar-hidrojen enerji sistemi görülmektedir (Sherif ve diğ., 2005).

2.3.5. Şebekeden bağımsız bütünleştirilmiş rüzgar-hidrojen üretim sistemi

Bu sistem otonom şebekeden bağımsız sistemlerde kullanılabilir. Bu durumda enerji depolama zorunludur ve rejenatif hidrojen yakıt hücresi sistemi diğer enerji depolama teknikleri (batarya, sıkıştırılmış hava, su pompalı sistem gibi) göz önünde bulundurularak değerlendirilmelidir.



Şekil 2.7. Şebekeden bağımsız bütünleştirilmiş rüzgar-hidrojen üretim sistemi

Önceki sisteme göre tek fark güç şartlandırma birimlerinin şebekeye bağlı olmamasıdır. Arzu edilen AC ya da DC voltajı kendi düzenler. Bu seçenek ısıtma, pişirme işlemlerinde ve içten yanmalı motorlarda yakıt olarak hidrojenin kullanılması durumunda cazip olabilir (Sherif ve diğ., 2005). Şekil 2.7’de Şebekeden bağımsız bütünleştirilmiş rüzgar-hidrojen üretim sistemi görülmektedir.

BÖLÜM III

TEORİK ESASLAR VE HESAPLAMA YÖNTEMİ

3.1.Rüzgar Enerjisi ve Karakteristikleri Hesap Yöntemleri

Rüzgarın sahip olduğu enerji yerkabuğu üzerinde hareket eden büyük hava kütlelerinin kinetik enerjisidir. Rüzgar türbinleri bu kinetik enerjiyi ihtiyaca göre mekanik enerjiye ya da elektrik enerjisine dönüştürürler. Rüzgar enerjisinin faydalı enerjiye dönüşme verimi, rüzgar akımı ile rotor etkileşiminin verimine bağlıdır.

3.1.1. Temel denklemler

Belirli bir hızla hareket eden m kütleli hava akımının kinetik enerjisi denklem 3.1 ile ifade edilebilir.

$$KE = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (3.1)$$

burada m kütle, v (m/s), hava akımının hızıdır. A kesit alanında v hızıyla akan, ρ (kg/m³) yoğunluğundaki hava akımının kütleli debisi (kg/s) ise denklem 3.2 ile hesaplanabilir.

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v \quad (3.2)$$

Kinetik enerji ve kütleli debiyi ifade eden denklemler kullanılarak birim zamanda bir A kesitinden geçen enerji miktarı elde edilir. Bu enerji fiziksel olarak güç'tür ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (3.3)$$

Bu denklemden görülebileceği gibi, hava akımındaki enerji, rüzgar hızına, havanın yoğunluğuna ve havanın aktığı kesit alanına (rüzgar türbini kanatlarının süpürdüğü alan) bağlıdır. Burada, enerji üretimini kendi değerinin üçüncü kuvveti ile etkileyen hız en etkin parametredir. Rüzgarın sahip olduğu enerjinin hepsinden yararlanılamaz,

mevcut enerjinin ne kadarından yararlanılabileceği Betz limiti ile belirlenmiştir. Betz Limiti'ne göre rüzgardan elde edilebilecek maksimum güç $P_{\text{mak}}=C_p(1/2)\rho v^3$ şeklinde ifade edilir. Burada C_p güç katsayısıdır ve değeri yaklaşık 0.593'dur(Patel, 2005; Sathyajith, 2006).

3.1.2.Rüzgar hız verileri için kullanılan dağılımlar

Rüzgarlı herhangi bir bölgede rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesi ve rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinin kurulabilmesi için en az bir yıl boyunca rüzgar hızı ve yönü ölçümlerinin yapılması gereklidir. Daha uzun sürelerde yapılan ölçümler fizibilite çalışmalarının güvenilirliği açısından önemlidir. Rüzgar enerjisi potansiyelinde en önemli gösterge rüzgar hızıdır. Rüzgarın sahip olduğu enerji, hızının küpüyle doğru orantılı olduğundan veri ölçümlerin hassas bir şekilde yapılması gerekmektedir. Rüzgar hızı kararlı bir yapıya sahip değildir ve iklim sistemlerinden, yerel arazi yapısından, yükseklik değişiminden etkilenir. Rüzgar hızı dakikaya, saate, güne, mevsime ve yıla göre de farklılıklar gösterir. Ölçüm periyodu boyunca rüzgar hızındaki değişimler, olasılık dağılımı ile karakterize edilir (Burton ve diğ., 2001; Patel, 2005). Olasılık dağılımlar, rüzgar hızı ve yönü gibi rastgele değişkenlerin matematiksel olarak modellenmesini sağlayarak rüzgar mühendisliğinde çok önemli bir yere sahiptirler. Hız ve yön gibi değişkenler rastgele değişkenlerdir ve zamana göre değişirler. Olasılık yoğunluğu bir işlemin genliğinin ve büyüklüğünün dağılımını tanımlar (Holmes, 2001). Rüzgar hızı frekans histogramları incelendiğinde, rüzgar hızı dağılımlarını standart istatistiksel fonksiyonlarla göstermenin oldukça mantıklı olduğu görülmüştür. İstatistiksel çalışmalar, Weibull ve Rayleigh dağılımlarının kabul edilebilir doğrulukta rüzgar hız rejimindeki değişimleri tanımlamakta kullanılabileceğini göstermiştir. Fakat her bölge için rüzgar davranışının hangi dağılıma uyduğunun incelenmesi gereklidir. WASP, Wind Pro, Alwin gibi rüzgar enerjisi potansiyel belirleme ve tasarım yazılımları hesaplamalarında Weibull dağılımını kullanmaktadır(Akdağ, 2008).

3.1.2.1. Weibull dağılımı

İki parametrelili Weibull dağılımı rüzgar enerjisi değerlendirilmelerinde, yağış miktarı ve su seviyesi belirleme çalışmalarında ve malzemelerin ömür analizlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Rüzgar hızı için Weibull dağılımı, genelleştirilmiş gama

dağılımının özel bir durumudur ve 3.4 denklemi ile ifade edilir.

$$f_w(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[-\frac{v}{c} \right]^k \quad (k > 0, v > 0, c > 1) \quad (3.4)$$

Burada v rüzgar hızını (m/s), k boyutsuz Weibull şekil parametresini, c (m/s) Weibull ölçek parametresini göstermektedir. v hızının kümülatif dağılım fonksiyonu, bir v hızına eşit veya bir v hızından küçük rüzgar hızı olasılığını verir ve Weibull dağılımı için denklem 3.5 ile hesaplanır (Gökçek ve diğ., 2007a).

$$F_w(v) = 1 - \exp \left[-\frac{v}{c} \right]^k \quad (3.5)$$

3.1.2.2. Rayleigh dağılımı

Rayleigh dağılımı Weibull dağılımının özel bir durumudur ve bu dağılımda boyutsuz şekil parametresi k 'nın 2 olduğu varsayılır. Rayleigh dağılımı denklem 3.6 ile Rayleigh dağılımının kümülatif dağılım fonksiyonu ise denklem 3.7 ile hesaplanır (Gökçek ve diğ., 2007a).

$$f_R(v) = \frac{\pi}{2} \frac{v}{\bar{v}^2} \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{\bar{v}} \right)^2 \right] \quad (3.6)$$

$$F_R = 1 - \exp \left[-\left(\frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{v}{\bar{v}} \right)^2 \right] \quad (3.7)$$

3.1.3. Weibull Parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler

Weibull k ve c parametrelerini hesaplanmak için birçok yöntem bulunmaktadır. Bu çalışmada bu parametrelerin hesaplanmasında Grafik Yöntem, En Yüksek Olabilirlik Yöntemi, Enerji Model Faktörü Yöntemi ve Standart Sapma-Ortama Hız Yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemlere göre hesaplanan parametre değerleri için yaklaşık benzer

sonuçlar çıkabildiği gibi çok farklı sonuçlarda çıkabilmektedir. Bu yüzden bu yöntemlere göre hesaplanan değerlerle gerçek veri değerlerinin hata analizi yapılmalıdır.

3.1.3.1.Grafik yöntem

Weibull kümülatif olasılık yoğunluk fonksiyonu denklemi yeniden düzenlenirse denklem 3.8 elde edilir.

$$1-F_w(v) = \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (3.8)$$

Bu denklemin iki kez doğal logaritması alınırsa 3.9 denklemi elde edilir.

$$\ln\left[-\ln(1-F_w(v))\right] = k \ln v - k \ln c \quad (3.9)$$

Bu denklem $y=ax+b$ denklemi biçimindedir. Apsis için $\ln v$, ordinat için ise $\ln[-\ln(1-F_w(v))]$ değerleri alınarak bir grafik çizilecek olursa hemen hemen düz bir çizgi elde edilir. Bu çizginin eğimi Weibull şekil parametresi k 'yı verir. Ordinat değerleri hesaplanarak oluşturulan en küçük kareler metoduyla Weibull parametreleri hesaplanır(Johnson, 1985).

3.1.3.2.Standart sapma-ortalama hız yöntemi

Rüzgar hızının standart sapma ve ortalama değeri kullanılarak Weibull parametrelerinin hesaplandığı yöntemidir.

$$\left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^2 = \frac{\Gamma\left(1+\frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1+\frac{1}{k}\right)} - 1 \quad (3.10)$$

Mevcut data seti kullanılarak standart sapma (σ) ve ortalama hız hesaplandıktan sonra

3.10 denklemi sayısal olarak çözülerek Weibull k parametresi hesaplanır. Daha sonra bu k değeri kullanılarak Weibull c parametresi denklem 3.11 ile hesaplanır.

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1+1/k)} \quad (3.11)$$

k parametresinin hesaplanmasında kullanılan daha basit bir yaklaşım denklem 3.12 ile verilebilir.

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}} \right)^{-1.086} \quad (3.12)$$

Ortalama hız ve standart sapma ise sırasıyla denklem 3.13 ve denklem 3.14 denklemleri kullanılarak hesaplanabilir (Gökçek ve diğ., 2007a).

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n v_i \right) \quad (3.13)$$

$$\sigma = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2 \right]^{0.5} \quad (3.14)$$

3.1.3.3. Enerji model faktörü yöntemi

Mevcut rüzgar hızı verileri için enerji model faktörü denklem 3.15 ile tanımlanır.

$$E_{mf} = \frac{\overline{v^3}}{\bar{v}^3} \quad (3.15)$$

burada $\overline{v^3}$, rüzgar hızının ortalamasının küpüdür. Emf hesaplandıktan sonra Weibull şekil parametresi k denklem 3.16 ile hesaplanabilir.

$$k = 1 + \frac{3.69}{E_{mf}^2} \quad (3.16)$$

Weibull ölçek parametresi c ise daha önce verilen denklem 3.11 ile hesaplanabilir(Chang, 2011).

3.1.3.4.Maksimum olabilirlik yöntemi

Maksimum olabilirlik yönteminde Weibull parametreleri aşağıda verilen denklemler kullanılarak sayısal iterasyonla hesaplanır(Chang, 2011).

$$k = \left[\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right]^{-1} \quad (3.17)$$

$$c = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^k \right)^{\frac{1}{k}} \quad (3.18)$$

3.2.Hata Analizi

Grafik, standart sapma-ortalama hız, enerji model faktörü ve en yüksek olabilirlik yöntemleri kullanılarak elde edilen Weibull parametreleri ile hesaplanan olasılık dağılımları ile gözlemlenen dağılımlar karşılaştırılarak, hangi yöntemin daha doğru sonuç verdiğini belirlemek için hata analizi yapılmalıdır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar R^2 , Ortalama Hata Karelerinin Toplamının Karekökü (RMSE) ve Ki-kare (χ^2) hata analizi yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. İlgili denklemler aşağıda verilmiştir.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - y_{ic})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.19)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{ic})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.20)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{ic})^2}{y_i} \quad (3.21)$$

burada y_i i zaman adımındaki gerçek değer, y_{ic} ise aynı basamak için korelasyonla hesaplanan değer, n veri sayısı, $\bar{y}$ ise ortalama rüzgar hızıdır (Chang, 2011; İslam ve diğ., 2011; Rochave diğ., 2012).

3.3. Güç Yoğunluğu Hesapları

Rüzgarlı bir bölgede birim alan için rüzgar gücünün bilinmesi rüzgar santrallerinin güç üretim projeksiyonların değerlendirilmesi açısından önemlidir. Herhangi bir olasılık yoğunluk fonksiyonuna göre incelenen alan için rüzgar gücü yoğunluğu denklem 3.22 ile hesaplanabilir (Zhou ve diğ., 2006).

$$P_d = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} v^3 f(v) dv \quad (3.22)$$

burada ρ (kg/m³) standart hava yoğunluğu, v (m/s) rüzgar hızıdır. Weibull dağılımına göre güç yoğunlu denklemleri 3.23 ile hesaplanır.

$$P_{dw} = \frac{1}{2} \rho \bar{v}^3 \frac{\Gamma(1+3/k)}{[\Gamma(1+1/k)]^3} \quad (3.23)$$

3.4. Rüzgar Hızının Yükseklikle Değişimi

Bir bölgedeki rüzgar potansiyelini belirlemek için yapılan rüzgar hızı ölçümleri genel

olarak 10 m standart bir yükseklikte yapılır. Bu çalışmada kullanılan rüzgar hızı ölçümleri 30 m anemometre yüksekliğinde yapılmıştır. Rüzgar hızı yükseklikle değişmektedir. Rüzgar santrallerini oluşturan rüzgar türbinleri nominal güçlerine göre farklı hub yüksekliklerine sahiptir. Bu nedenle rüzgar türbinlerinin hub yüksekliklerindeki rüzgar hızının bilinmesi gereklidir. Farklı yüksekliklerdeki rüzgar hızı güç kanunu kullanılarak hesaplanır. Güç kanunu denklem 3.24 denklemi ile verilir(Justus ve Mikhail, 1976).

$$v = v_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad (3.24)$$

burada v_0 anemometre yüksekliğinde (h_0) ölçülen rüzgar hızı, v hesaplanacak yükseklikteki (h) rüzgar hızı, α yüzey pürüzlülüğüne bağlı güç kanunu üssü, bu çalışmada α 0.14 olarak alınmıştır.

3.5. Enerji Üretimi Hesabı

Rüzgar türbininden üretilen elektrik enerjisi rüzgar hızı verileri ve rüzgar türbinin üreticisi tarafından sağlanan güç eğrileri kullanılarak hesaplanabilir(Burton ve diğ., 2001). Zaman serisi formunda hazırlanan rüzgar hızı verileri rüzgar türbinin güç eğrileriyle eşleştirilerek farklı derecelerde oluşturan cebirsel denklemler yardımıyla rüzgar türbini tarafından üretilen elektrik enerjisi hesaplanır. Farklı hız aralıkları için hazırlanan cebirsel denklemler aşağıda verilmiştir.

$$P_i(v) = \begin{cases} 0, & v < v_{ci} \\ (a_n v^n + a_{n-1} v^{n-1} + \dots + a_1 v + a_0), & v_{ci} \leq v < v_R \\ P_R, & v_R \leq v < v_{co} \text{ ya da} \\ (a_n v^n + a_{n-1} v^{n-1} + \dots + a_1 v + a_0), & v_{ci} \leq v < v_{co} \\ 0, & v \geq v_{co} \end{cases} \quad (3.25)$$

burada a_n , a_{n-1} , a_1 ve a_0 regresyon sabitleri, v_{ci} rüzgar türbinin çalışmaya başladığı hız, v_R nominal güçteki hız, v_{co} rüzgar türbinin çalışmasını durdurduğu hız, P_R rüzgar

türbinin nominal gücü ve $P_i(v)$ ilgili rüzgar hızında üretilen güçtür. Belirli bir zaman dilimi için rüzgar türbini tarafından üretilen enerji denklem 3.26 ile hesaplanır (Gökçekve diğ., 2007b).

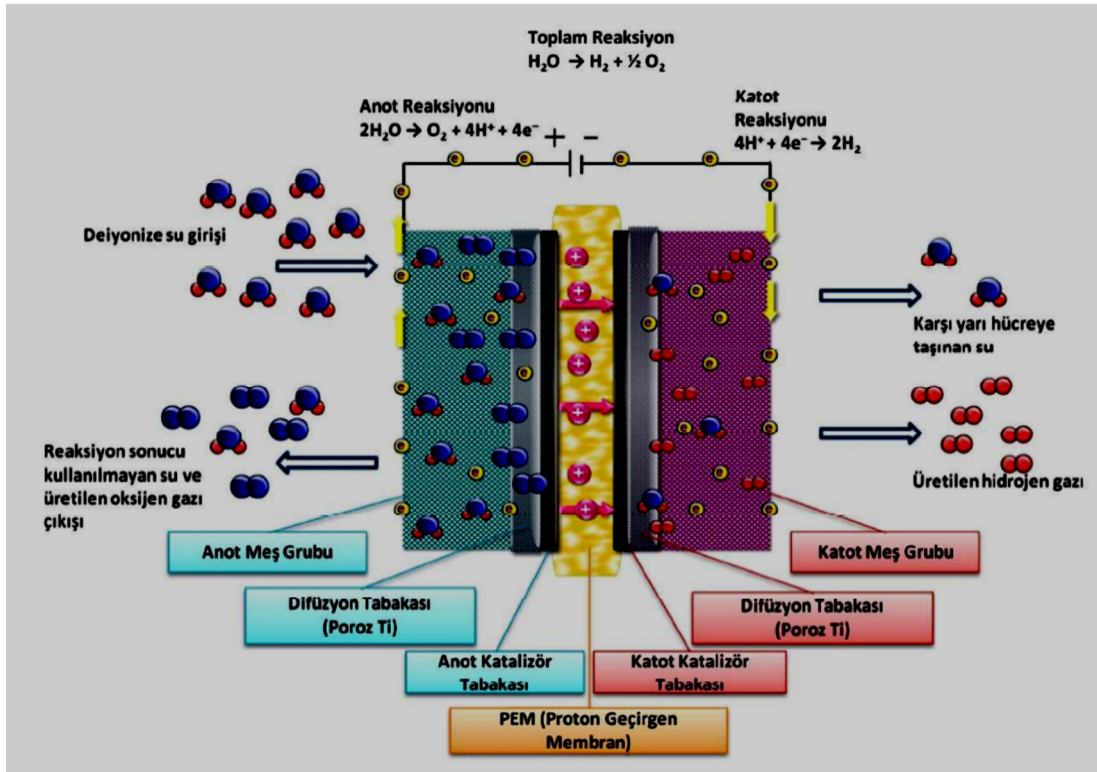
$$E_p = \sum_{i=1}^n P_i(v) \cdot t \quad (3.26)$$

3.6. Hidrojen Üretiminin Hesaplanması

Bu çalışmada ele alınan rüzgar türbini-hidrojen üretim sisteminde kullanılan elektrolizör pem (proton geçirgen membran elektrolizör)-tabanlı bir elektrolizördür. Proton geçirgen membran elektrolizör, sadece protonların geçmesine izin veren polimer membran, suyun elektrokimyasal reaksiyon ile parçalandığı ve oksijenin meydana geldiği anot katalizör tabakası, hidrojenin olduğu katot katalizör tabakası ve elektriğin uygulandığı aynı zamanda sıvının ve gazların katalizör yüzeylerine iletilmesi ve uzaklaştırılması görevini üstlenen elektrot tabakalarından oluşmaktadır. Anot girişinden hücreye alınan su, anot katalizör tabakasında hidrojen iyonu (H^+ , Proton) ve oksijen gazına ayrılmaktadır. Oksijen gazı anot çıkışından dışarı verilirken hidrojen iyonu Nafion membrandan karşıya geçerek katot katalizör tabakasında elektron almakta ve hidrojen gazına dönüşmektedir (Becerikli, 2011). Elektroliz prosesi için genel denklem aşağıdaki gibi verilebilir.



Şekil 3.1’de PEM elektrolizör ve çalışma prensibi görülmektedir(Becerikli, 2011).



Şekil 3.1. PEM elektrolizör ve çalışma prensibi

Faraday kanununa göre elektrolizörde üretilen hidrojen miktarı,

$$m_{elec} = \frac{P_{elec}}{2v_{elec}F} \eta_i [\text{mol/s}] \quad (3.28)$$

burada P_{elek} elektrolizörün nominal gücü, F Faraday sabiti, v_{elec} elektrolizörün çalışma voltajı, η_i akım verimidir ve bu çalışma için % 100 olarak alınmıştır. Voltaj verimi denklem 3.29 ile hesaplanır.

$$\eta_v = \frac{1.48}{v_{elec}} \cdot 100\% \quad (3.29)$$

burada η_v voltaj verimidir ve bu çalışma için % 74 olarak kabul edilmiştir. 1 saatte 1 kW nominal gücünde bir elektrolizörden üretilen hidrojen miktarı 9.33 mol’dür(Li ve diğ., 2009).1 kg hidrojen 273 K ve 101.325 kPa’da 11.126 Nm³tür (Shakya ve diğ., 2005). 100 kg/gün kapasiteli bir sistemden saatte 46.362 Nm³ hidrojen üretilir. Bu

çalışmada elektrolizörün kurulu gücü 222 kW olarak hesaplanmış ve elektrolizör özgül enerji tüketimi (ÖETe) 53.25 kWh/kgH₂ olarak alınmıştır.

3.7. Hidrojen Kompresörü

Ticari PEM elektrolizörlerde çıkış basıncı yaklaşık 14 bar'dır. Bu çalışmada elektrolizör çıkış basıncı 15 bar kabul edilmiş, hidrojenin bir kompresör yardımıyla 35 bara sıkıştırılması sağlanmıştır. Bir kompresörün nominal gücü denklem 3.30 ile hesaplanabilir(Li ve diğ., 2009).

$$W_{\text{komp}} = C_p \frac{T_1}{\eta_k} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{r-1}{r}} - 1 \right] m_k \quad (\text{W}) \quad (3.30)$$

burada C_p hidrojenin sabit basınçta özgül ısısı (14304 kJ/kgK), T₁ hidrojen giriş sıcaklığı (293 K), P₁ve P₂sırasıyla hidrojen kompresörünün giriş ve çıkış basıncı, r izantropik üs (1.4), η_k kompresör verimi (% 70),m_k ise hidrojen debisidir (kg/s). Bu çalışmada kompresörün kurulu gücü 10 kW olarak hesaplanmış Kompresör özgül enerji tüketimi (ÖETk) 2.25 kWh/kgH₂ olarak alınmıştır.

3.8. Ekonomik Değerlendirme

Rüzgar türbinlerinin maliyeti genel olarak kW başına para olarak ifade edilir. Bu spesifik maliyet değerleri üreticiye göre değişir. Bu çalışmada türbin spesifik maliyeti 700 \$/kW ile 1000 \$/kW arasında olacak şekilde bir bant aralığında alınmıştır (Gökçek, 2010a). Elektrik enerjisi üretim maliyetini hesaplayabilmek için santrale yapılması gereken tüm masrafların bilinmesi gerekir. Bu masraflar, santral yeri masrafları, santralin inşaat masrafları, yakıt masrafları, işletme ve bakım masraflarıdır. Rüzgar santrallerinde yakıt masrafı bulunmamaktadır. Belirli bir süre içinde yapılan masrafların tamamı, aynı sürede üretilen elektrik enerjisi miktarına bölünerek, üretilen birim enerji başına maliyet hesaplanabilir. Elektrik enerjisi üretim maliyetinin hesaplanmasında paranın zaman içindeki değerinin de hesaba katılması gereklidir.

Rüzgar enerjisi santrallerinde üretilen elektrik enerjisi maliyetini etkileyen çeşitli faktörler bulunmaktadır. Bu faktörler ülkeden ülkeye, bölgeden bölgeye değişmektedir. Rüzgar enerji ile elektrik üretiminde maliyet, yatırım maliyeti, işletme-bakım maliyeti, ortalama rüzgar hızı ve türbin ömrü gibi etkenlere bağlıdır (Aybers ve Şahin, 1995). Elektrik enerjisinin bir değere getirilmiş maliyeti rüzgar enerjisi santrallerinde önemli mali göstergelerden biridir. Bir değere getirilmiş maliyet metodu tekno-ekonomik analistler tarafından yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Rüzgar enerjisi sistemi için bir değere getirilmiş maliyet, ele alınan sistemin yıllık toplam masrafının yıllık elektrik enerjisi üretimine bölünmesiyle hesaplanır (Nouni ve diğ., 2007). Rüzgar enerjisi dönüşüm sisteminin yatırım maliyeti denklem 3.31 ile verilebilir.

$$C_{\text{REDS}} = C_{\text{RT}} + C_{\text{Kurulum}} + C_{\text{Inverter}} [\text{US\$}] \quad (3.31)$$

burada C_{RT} rüzgar türbininin maliyeti, C_{Kurulum} kurulum maliyeti, C_{inverter} inverter maliyetidir.

Denklem 3.32’de verilen amortisman faktörü kullanılarak rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi yatırım maliyetinin yıllık değeri hesaplanır (Nouni ve diğ., 2007).

$$AF = \frac{(1+r)^n r}{(1+r)^n - 1} \quad (3.32)$$

burada r iskonto oranı (% 8), n tesis ömrüdür (30 yıl). İnverter ömrü 10 yıl olarak alınmıştır. Rüzgar türbini ve inverter’in işletme bakım masrafları ve inverter eskalasyon oranında (% 2) göz önünde bulundurularak birim elektrik enerjisi üretim maliyeti denklem 3.33 ile hesaplanır.

$$g_{\text{Elektrik}} = \frac{[C_{\text{RT}} + C_{\text{Kurulum}} + C_{\text{Inverter-i\&b}}] \cdot AF + C_{\text{RT-i\&b}}}{\text{YEÜ}} [\$/\text{kWh}] \quad (3.33)$$

burada g_{Elektrik} bir değere getirilmiş elektrik enerjisi maliyeti, $C_{\text{Inverter-i\&b}}$ inverterin işletme bakım maliyeti, $C_{\text{RT-i\&b}}$ rüzgar türbinin yıllık işletme bakım maliyeti, YEÜ ise yıllık elektrik enerjisi üretimidir.

Rüzgar türbini-hidrojen üretim sisteminin alt sistemi olan hidrojen üretim sitemi elektrolizör, kompresör, depolama tankı ve dispenserden oluşmaktadır. Bu alt sistemi oluşturan elemanların her birinin yıllık maliyet değerleri, şebekeden ve rüzgar enerjisi dönüşüm sisteminden alınan elektrik enerjisi maliyetinin yıllık değerleri göz önünde bulundurularak bir değere getirilmiş hidrojen maliyeti denklem 3.34 ile hesaplanabilir.

$$g_{H_2} = \frac{[C_{\text{Elek}} + C_{\text{Komp}} + C_{\text{Tank}} + C_{\text{Disp}} + C_{\text{Elekt-i\&b}} + C_{\text{Komp-i\&b}} + C_{\text{Tank-i\&b}}] \cdot AF + C_{A1} + C_{A2}}{M_{H_2}}$$

[\$/kgH₂]

(3.34)

burada C_{Elek} elektrolizör maliyeti, C_{Komp} kompresörün maliyeti, C_{Tank} tank maliyeti, C_{Disp} dispenser maliyeti, $C_{\text{Elekt-i\&b}}$ elektrolizörün işletme bakım maliyeti, $C_{\text{Komp-i\&b}}$ kompresörün işletme bakım maliyeti, $C_{\text{Tank-i\&b}}$ tankın işletme bakım maliyeti, C_{A1} şebekeden alınan elektrik enerjisinin yıllık maliyeti, C_{A2} rüzgar enerjisi dönüşüm sisteminden alınan elektrik enerjisinin yıllık maliyetidir.

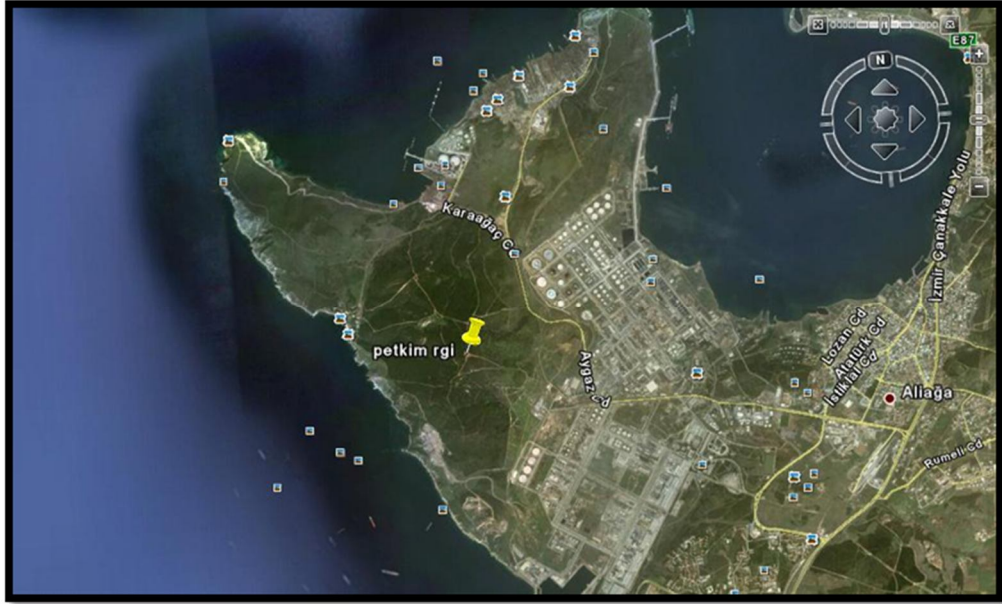
BÖLÜM IV

UYGULAMA ÇALIŞMASI VE SONUÇLAR

Potansiyel Belirleme-Enerji ve Hidrojen Üretimi-Maliyet Analizi

4.1. Rüzgar Kaynağı

Bu çalışmada öncelikle rüzgarlı bir bölge olan İzmir-Aliağa'da rüzgar enerjisi potansiyeli ve rüzgar karakteristikleri incelenmiş ardından bu bölgede kurulacak rüzgar enerjisi destekli hidrojen üretim sisteminin teknik ve ekonomik analizi yapılmıştır. Çalışmada kullanılan rüzgar verileri Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Rüzgar hızı verileri İzmir-Aliağa petkim- rüzgar gözlem istasyonunda kaydedilmiş 2010 yılı verileridir. Kaydedilen veriler on dakikalık zaman dilimlerinde ortalama hız şeklinde olup, bu hız değerleri saatlik ortalama değerler şeklinde yeniden hesaplanmıştır. Şekil 4.1'de rüzgar gözlem istasyonu görülmektedir.

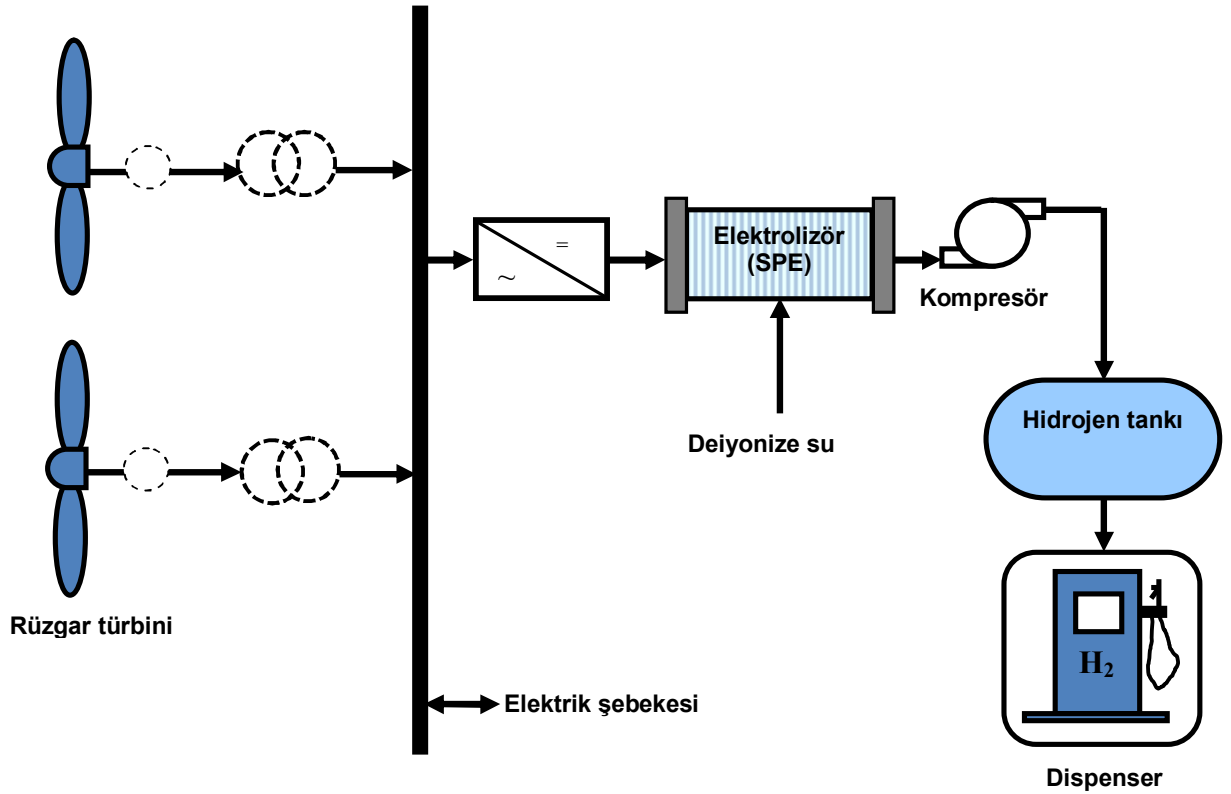


Şekil 4.1. İzmir-Aliağa rüzgar gözlem istasyonu

4.2. Sistem Konfigürasyonu

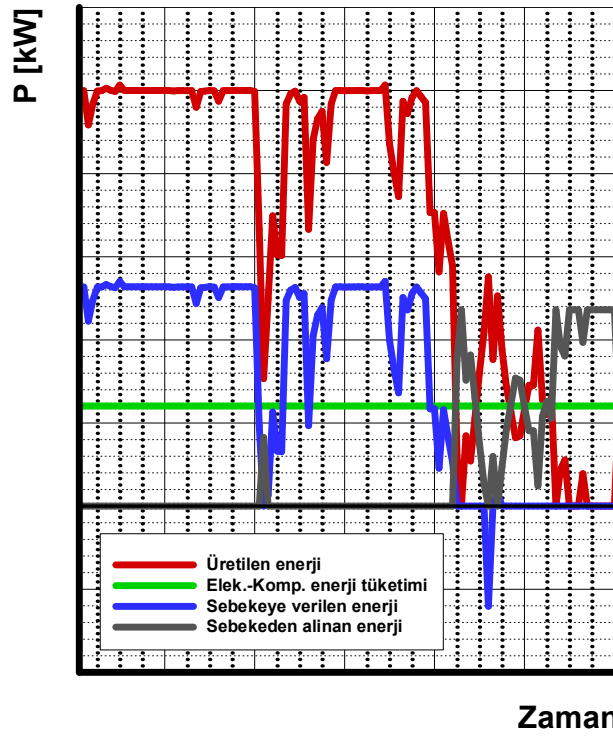
İzmir-Aliağa'da rüzgar enerjisi destekli hidrojen üretim sisteminin teknik ve ekonomik analizini amaçlayan bu çalışmada ele alınan sistem Şekil 4.2 de görülmektedir. Hidrojen

Üretim sisteminin kapasitesi 100 kg/gün olup, rüzgar türbini, konvertör, proton-geçirgen membran elektrolizör, kompresör, hidrojen tankı ve dispenserden oluşmaktadır. Sistem günde 100 kg hidrojen üretmeyi amaçlamakta, elektrolizör sistemini çalıştırmak için gerekli olan elektrik enerjisi öncelikle rüzgar türbininden sağlanmaktadır. Rüzgar türbinin çalışması için gerekli rüzgar olmadığı zaman elektroliz elektrik enerjisi ihtiyaı ulusal şebekeden sağlanmaktadır.



Şekil 4.2. Rüzgar türbini-hidrojen üretim sistemi

Bu çalışmada nominal güçleri 250 kW, 300 kW, 450 kW, 600 kW, 800 kW ve 1000 kW olan 6 farklı rüzgar türbini ayrı ayrı değerlendirilerek proton geçirgen membran elektrolizör ile birlikte çalıştırılmıştır. Elektrolizörün ihtiyaı olan enerji bazı durumlarda kısmen rüzgar türbininden kısmen de ulusal şebekeden karşılanabilmektedir. Şekil 4.3'te rüzgar türbini-hidrojen üretim sisteminde enerji yönetimi görülmektedir.



Şekil 4.3. Rüzgar türbini-hidrojen üretim sisteminde enerji yönetimi

Çizelge 4.1’de rüzgar türbini-hidrojen üretim sistemini oluşturan her bir elemanın kapasite, ömür ve çeşitli ekonomik göstergeleri görülmektedir. Rüzgar türbininin spesifik maliyeti 700 \$/kW ile 1000 \$/kW arasında değişmektedir. Bu çalışmada yapılan maliyet hesaplamalarında birim elektrik enerjisi ve hidrojen maliyeti bu aralık göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.1. Sistem elemanlarının özellikleri ve maliyet bilgileri

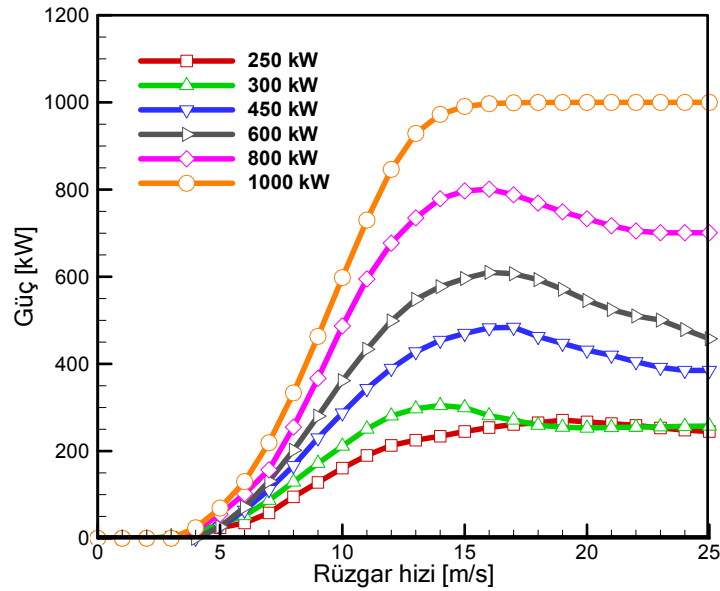
Bileşen	Güç (kW), Hacim(m ³)	Maliyet [\$]	Ömür [yıl]	İşletme-Bakım maliyeti ^a (Yatırım maliyetinin %)
Rüzgar Türbini	250, 300, 450, 600, 800, 1000	700 kW ⁻¹ /1000 kW ⁻¹	30	3.5
PEM Elektrolizör	222	1000 kW ⁻¹	10	2
Kompresör	10	2500 kW ⁻¹	10	2
Inverter	242	1000 kW ⁻¹	10	0.5
H ₂ Tankı	3.45	1430 (Greiner ve diğ., 2007)	20	0.5
H ₂ Dispenser	-	35000 (Oi ve Wada, 2004)	10	0.5

^aİşletme bakım maliyeti her bir bileşenin yatırım maliyetinin tabloda verilen yüzdelik değerleri gözönünde bulundurularak hesaplanmıştır.

Rüzgar türbini üretici firmalar, üretmiş oldukları rüzgar türbinleri için hangi rüzgar hızında hangi gücü ürettiğini gösteren güç eğrileri oluştururlar. Bu çalışmada kullanılan rüzgar türbinleri için güç eğrileri Şekil 4.4'te ve türbinlerin özellikleri Çizelge 4.2'de verilmiştir (Gökçekve diğ., 2007b; INL, 2012). Bu güç eğrileri kullanılarak araştırılan bölge için enerji üretimi hesaplanmıştır.

Çizelge 4.2. Kullanılan rüzgar türbinlerinin teknik özellikleri

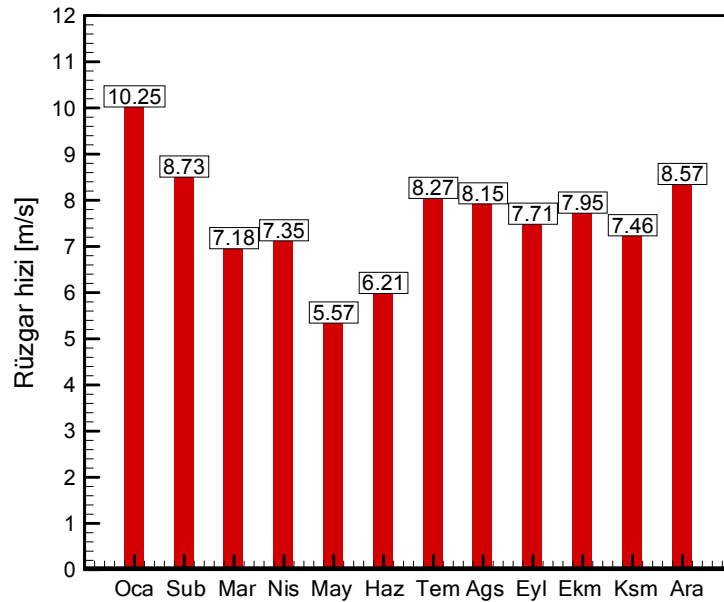
Özellikler	Türbin					
	I	II	III	IV	V	VI
Güç (kW)	250	300	450	600	800	1000
Rotor çapı (m)	30	33	37	44	50	54.2
Süpürme alanı (m ²)	706	855	1075	1520	1963	2307
Kanat sayısı	3	3	3	3	3	3
Devreye girmek için gerekli (cut-in) rüzgar hızı (V_{ci}) (m/s)	3	4	5	5	4	4
Kesme hızı (V_{co}) (m/s)	25	25	25	25	25	25



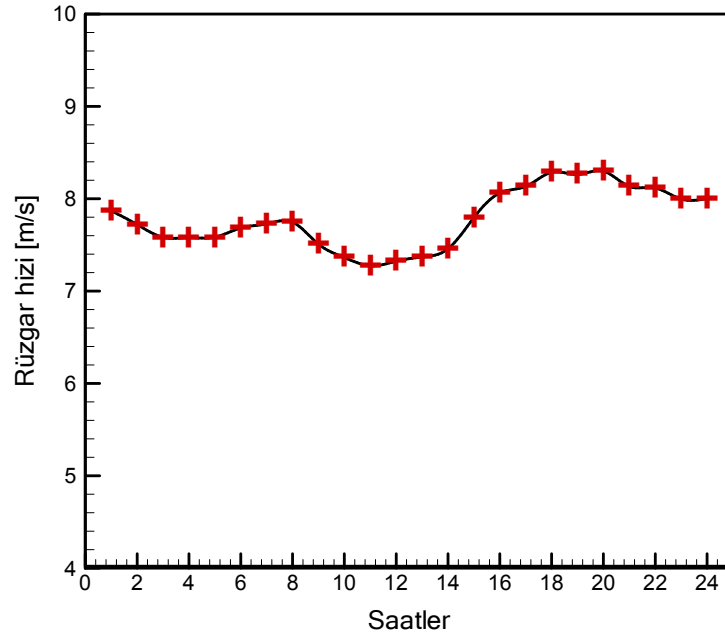
Şekil 4.4. Sistemde ele alınan rüzgar türbinlerinin güç eğrileri

4.3. Rüzgar Hızı

Rüzgar hızının yıllık, aylık, mevsimlik, günlük ve saatlik ortalama değerlerinin bilinmesi rüzgar enerjisi çalışmalarında önemlidir. Şekil 4.5'te İzmir-Aliaga'da 2010 yılında 30 m yükseklikte ölçülen rüzgar hızlarının aylık ortalama değerleri görülmektedir. En yüksek ortalama hız 10.25 m/s değeri ile ocak ayında, en düşük ortalama hız değeri ise 5.57 m/s değeri ile mayıs ayında hesaplanmıştır. Yıllık ortalama hız 7.79 m/s olup, maksimum hız 22.10 m/s değeri ile şubat ayında ölçülmüştür. Genelde yüksek hızlar kış aylarında düşük hızlar ise bahar aylarında gözlemlenmiştir. Rüzgarın günün hangi saatinde hangi hızla estiği rüzgar santrallerinde enerji üretimi yönetiminin değerlendirilmesi açısından oldukça önemlidir. Elektrik satışında farklı saatlerde farklı tarifelerin uygulanması bu bilgiyi daha da önemli hale getirmektedir. Şekil 4.6'da rüzgar hızı için her günün aynı saatinin 2010 yılındaki ortalama değerleri görülmektedir. Şekil incelendiğinde en yüksek rüzgar hızlarının 19, 20 ve 21 saatlerinde gözlemlendiği, en düşük rüzgar hızlarının ise öğle saatlerinde yani 10 ile 14 saatleri arasında gözlemlendiği görülmektedir.



Şekil 4.5. 2010 yılı için aylara göre ortalama rüzgar hızları [30 m]



Şekil 4.6. Saatlik ortalama hızlar [30 m]

Mevsimlere göre rüzgar hızları incelendiğinde ortalama hız değerlerinin kış mevsiminde 9.18 m/s, baharda 6.7 m/s, yaz mevsiminde 7.54 m/s, sonbaharda ise 7.70 m/s olduğu görülmektedir. Bu çalışmada rüzgar enerjisi üretiminin değerlendirilmesinde kullanılan rüzgar türbinlerinin 70 m hub yüksekliğinde çalıştıkları varsayılmıştır. Bu nedenle 30 m yükseklikte ölçülen rüzgar hızları 70 m yüksekliğe ekstrapole edilmiş, 70 m'deki ortalama rüzgar hızı 8.77 m/s olarak hesaplanmıştır.

4.4. Olasılık Dağılım Fonksiyonları (ODF)

Rüzgar hızının değişken bir yapıya sahip olması nedeniyle bir bölgenin rüzgar potansiyelinin belirlenmesinde istatistiksel yöntemlerin kullanılması gereklidir. Şayet bir bölgeye ait rüzgar hızı dağılımı bilinirse, o bölge için güç potansiyeli ve ekonomik uygunluk bu bilgiden kolaylıkla elde edilebilir. Rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesi çalışmalarında istatistiksel bir değerlendirme yapılabilmesi amacıyla rüzgar hızı ve yönü için zaman serisi kayıtları yapılmalıdır. Çeşitli yöntemlerle elde edilen veriler geniş bir değer ve zaman aralığına sahiptir. Bu nedenle bu geniş veri aralığının davranışını birkaç parametreyle açıklayabilmek analizlerde kolaylık sağlar. Weibull ve Rayleigh gibi olasılık yoğunluk fonksiyonları belirli bir zaman diliminde bir

bölgenin rüzgar hızı dağılımlarının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada incelenen bölge için Weibull ve Rayleigh dağılımları yıllık, mevsimlik ve aylık bazda belirlenmiş, Weibull dağılımını karakterize eden şekil (k) ve ölçek parametresi (c) Grafik, Maksimum Olabilirlik (MLH), Standart Sapma-Ortalama Hız (SS-OH) ve Enerji Model Faktörü (EPF) yöntemleriyle hesaplanmıştır. Bu yöntemler çeşitli istatistiksel değerlendirme yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.3'te farklı istatistiksel yöntemlere göre belirlenen Weibull parametreleri kullanılarak elde edilen olasılık dağılım fonksiyonlarının gözlem sonuçlarına dayanan dağılımla karşılaştırılmaları görülmektedir. Farklı yöntemler kullanılarak hesaplanan Weibull parametreleriyle (k ve c) elde edilen dağılımlar R^2 , Ortalama Hata Karelerinin Toplamının Karekökü (RMSE) ve Ki-kare (χ^2) hata analizi yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. R^2 değerinin büyük, Ortalama Hata Karelerinin Toplamının Karekökü (RMSE) ve Ki-kare (χ^2) değerinin ise küçük olduğu durum en iyi durumu göstermektedir. Çizelge 4.3'ten görüldüğü gibi ocak ayı için kullanılan yöntemler birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Şubat ayı için yapılan hesaplarda SS-OH ve MLH metodu diğer metodlara göre iyi bir performans sergilemiştir.

Mart, Nisan ve Aralık aylarında SS-OH metodu iyi sonuçlar vermiş diğer aylarda SS-OH, MLH ve EPF metodları performanslarında benzer karakteristikler göstermişlerdir. Grafik metod hiçbir ayda iyi sonuç vermemiştir. Çizelge 4.4'te farklı istatistiksel yöntemlere göre belirlenen Weibull parametreleri kullanılarak elde edilen olasılık dağılım fonksiyonlarının gözlem sonuçlarına dayanan dağılımla karşılaştırılmalarının mevsimlere göre değişimi görülmektedir. Burada da grafik yöntem diğer yöntemlere göre kötü bir performans sergilemiş, SS-OH, MLH ve EPF metodları birbirine yakın sonuçlar vermiştir.

Weibull şekil parametresi k, dağılımın (eğrinin) biçimini karakterize eder. Bu yüzden şekil parametresi olarak adlandırılır. Rüzgar hızının uniformluğunu belirlemede temel faktördür. k değeri büyüdükçe incelenen bölgede rüzgar hızı daha uniform bir hal alır. k'nın 2.5, 3 gibi yüksek değerleri, saatlik ortalama hız değerlerinin yıllık ortalama rüzgar hızı değeri etrafında değişiminin küçük olduğunu göstermektedir. 1.2 ve 1.5 gibi küçük değerleri ise ortalama hız etrafında daha büyük değişimleri gösterir. Weibull ölçek parametresi c, ortalama rüzgar hızıyla orantılıdır. c'nin büyük değerleri yüksek hız sayısının çokluğunu gösterir.

Çizelge 4.3.Weibull parametrelerinin tespitinde kullanılan yöntemlerin aylara göre karşılaştırılması

Periyod	Yöntem	R^2	RMSE	χ^2
Ocak	Grafik	0.8207	1.3593E-02	1.0473E-01
	SS-OH	0.8226	1.3446E-02	1.2522E-01
	MLH	0.8133	1.3871E-02	1.3478E-01
	EPF	0.8282	1.3306E-02	1.2193E-01
Şubat	Grafik	0.8247	1.2855E-02	1.4592E-01
	SS-OH	0.8979	9.9640E-03	6.0633E-02
	MLH	0.9061	1.0291E-02	6.1976E-02
	EPF	0.8576	1.2670E-02	1.4364E-01
Mart	Grafik	0.8127	1.7519E-02	1.1423E-01
	SS-OH	0.8775	1.5269E-02	8.0620E-02
	MLH	0.8396	1.7640E-02	1.7861E-01
	EPF	0.8370	1.7782E-02	1.8220E-01
Nisan	Grafik	0.8281	1.5629E-02	1.9618E-01
	SS-OH	0.9313	1.4574E-02	1.1701E-01
	MLH	0.8492	1.4636E-02	1.1748E-01
	EPF	0.8383	1.5158E-02	1.2161E-01
Mayıs	Grafik	0.9133	1.4763E-02	9.9428E-02
	SS-OH	0.9759	7.7335E-03	1.1134E-01
	MLH	0.9756	7.8331E-03	1.2297E-01
	EPF	0.9735	8.1584E-03	9.2306E-02
Haziran	Grafik	0.9420	1.5996E-02	1.2044E-01
	SS-OH	0.9733	8.3829E-03	4.9228E-01
	MLH	0.9701	8.9367E-03	3.6549E-01
	EPF	0.9687	9.1435E-03	3.1181E-01
Temmuz	Grafik	0.8973	1.6078E-02	7.9954E-02
	SS-OH	0.9811	6.8425E-03	2.7952E-02
	MLH	0.9822	6.6922E-03	3.1788E-02
	EPF	0.9720	8.3909E-03	3.0047E-02
Ağustos	Grafik	0.9295	1.1037E-02	7.6422E-02
	SS-OH	0.9458	9.6728E-03	5.9824E-02
	MLH	0.9440	9.8366E-03	6.0594E-02
	EPF	0.9423	9.9811E-03	5.8175E-02
Eylül	Grafik	0.9320	1.2240E-02	7.7267E-02
	SS-OH	0.9618	9.1347E-03	4.3689E-02
	MHL	0.9602	9.3637E-03	4.2919E-02
	EPF	0.9585	9.5617E-03	4.1733E-02
Ekim	Grafik	0.9065	1.1702E-02	6.0020E-02
	SS-OH	0.9567	7.9803E-03	2.6326E-02
	MLH	0.9537	8.2350E-03	2.6692E-02
	EPF	0.9532	8.2746E-03	2.6850E-02
Kasım	Grafik	0.7706	1.6477E-02	1.8947E-01
	SS-OH	0.7849	1.6087E-02	1.7362E-01
	MLH	0.7870	1.6355E-02	1.7297E-01
	EPF	0.7751	1.6806E-02	1.8064E-01
Aralık	Grafik	0.8560	1.3684E-02	1.0317E-01
	SS-OH	0.9555	1.1392E-02	5.6466E-02
	MLH	0.9000	1.1718E-02	5.6917E-02
	EPF	0.8990	1.1776E-02	5.7117E-02

Çizelge 4.4. Weibull parametrelerinin tespitinde kullanılan yöntemlerin yıl ve mevsimlere göre karşılaştırılması

Periyod	Yöntem	R^2	RMSE	χ^2
Yıllık	Grafik	✗ 0.9580	7.4414E-03	3.4614E-02
	SS-OH	✓ 0.9883	3.9745E-03	7.4702E-03
	MLH	✓ 0.9874	4.1000E-03	7.5665E-03
	EPF	✓ 0.9875	4.0960E-03	7.6092E-03
Sonbahar	Grafik	✗ 0.9324	9.3475E-03	5.6517E-02
	SS-OH	✓ 0.9674	6.5331E-03	2.4671E-02
	MLH	✓ 0.9680	6.6102E-03	2.4583E-02
	EPF	✓ 0.9665	6.7603E-03	2.5564E-02
Kış	Grafik	✗ 0.9135	9.1208E-03	5.0546E-02
	SS-OH	✓ 0.9553	6.6523E-03	2.0870E-02
	MLH	✓ 0.9531	6.9652E-03	2.1915E-02
	EPF	✓ 0.9519	7.0548E-03	2.2223E-02
İlkbahar	Grafik	✗ 0.9455	9.6812E-03	6.7748E-02
	SS-OH	✓ 0.9588	8.4049E-03	3.1201E-02
	MLH	✓ 0.9570	8.7788E-03	3.1572E-02
	EPF	✓ 0.9582	8.6530E-03	3.1521E-02
Yaz	Grafik	✗ 0.9416	1.0809E-02	4.7718E-02
	SS-OH	✓ 0.9867	5.1421E-03	2.5313E-02
	MLH	✓ 0.9863	5.3371E-03	2.4644E-02
	EPF	✓ 0.9849	5.5916E-03	2.2807E-02

Çizelge 4.5’te farklı yöntemlere göre belirlenen Weibull şekil ve ölçek parametrelerinin aylara göre değişimi görülmektedir. Yapılan karşılaştırmalarda SS-OH metodu birçok durumda daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu nedenle bu çalışmada SS-OH metoduna göre elde edilen sonuçlar değerlendirilecektir. Çizelge 4.5’te verildiği gibi Weibull şekil parametresi k 1.56 ile 3.30 arasında, ölçek parametresi ise 7.04 ile 11.56 m/s değerleri arasında değişmektedir. Bu değerlere göre en üniform dağılımın (değişmezlik) temmuz ayında olduğu, kasım ayında ise diğer aylara göre üniform bir dağılım olmadığı söylenebilir.

Çizelge 4.6’da farklı yöntemlere göre belirlenen Weibull şekil ve ölçek parametrelerinin yıla ve mevsimlere göre değişimi görülmektedir. 2010 yılı için Weibull parametreleri k ve c sırasıyla 2.13 ve 8.80 m/s olarak hesaplanmıştır. Mevsimsel bazda incelendiğinde Weibull şekil parametresi k ’nın 1.97 ile 2.53 değerleri arasında, ölçek parametresi c ’nin ise 7.57 ile 10.40 m/s değerleri arasında değiştiği görülmektedir. Yaz mevsiminde k için hesaplanan 2.53 değerinin bu mevsim için diğer mevsimlere göre daha üniform bir hız dağılımının olduğunu göstermektedir.

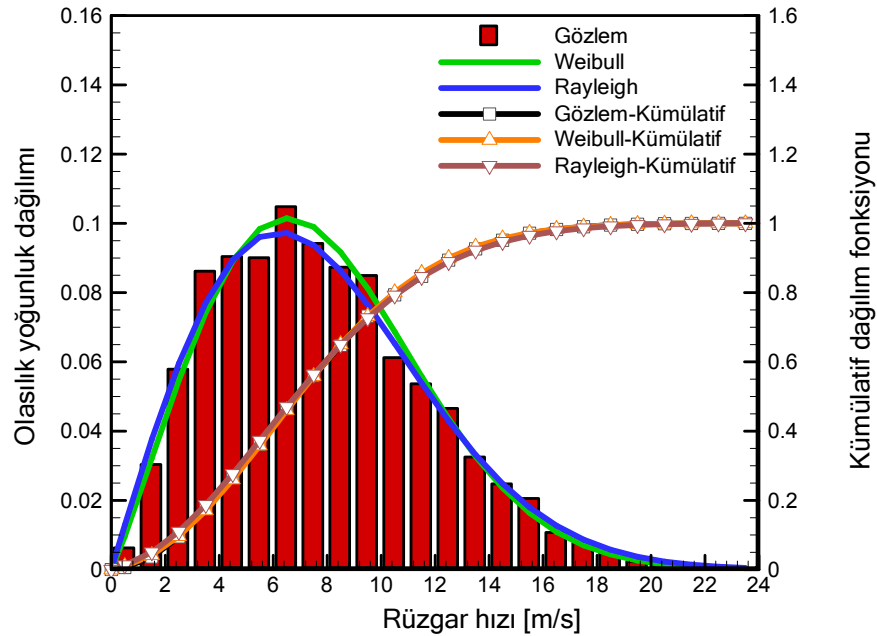
Çizelge 4.5. Farklı yöntemlere göre belirlenen Weibull şekil (k) ve ölçek (c) parametrelerinin aylara göre değişimi

Yöntem	Weibull Parametreleri	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
SS-OH	k	2.64	1.99	2.15	2.15	1.97	2.37	3.30	2.43	2.74	2.34	1.56	2.36
	c (m/s)	11.56	9.86	8.11	8.11	6.30	7.04	9.22	9.20	8.68	9.00	8.31	9.68
Grafik	k	2.20	1.98	2.09	1.88	1.69	1.99	2.86	2.28	2.51	2.16	1.35	2.15
	c (m/s)	9.60	8.81	7.50	7.46	5.79	6.62	8.55	8.76	8.09	8.28	7.74	8.89
EPF	k	2.64	2.01	2.17	2.04	1.93	2.31	3.11	2.41	2.67	2.35	1.59	2.38
	c (m/s)	11.53	8.90	8.12	8.30	6.28	7.02	9.26	9.20	8.68	8.98	8.32	9.67
MLH	k	2.69	2.01	2.18	2.00	1.98	2.33	3.38	2.44	2.72	2.35	1.55	2.37
	c (m/s)	11.54	9.87	8.14	8.31	6.29	7.02	9.21	9.20	8.68	8.99	8.33	9.67

Çizelge 4.6. Farklı yöntemlere göre belirlenen Weibull şekil (k) ve ölçek (c) parametrelerinin yıla ve mevsimlere göre değişimi

Yöntem	Weibull Parametreleri	İlkbahar	Yaz	Sonbahar	Kış	Yıllık
SS-OH	k	1.97	2.53	2.06	2.28	2.13
	c (m/s)	7.57	8.53	8.72	10.40	8.80
Grafik	k	1.87	2.25	1.90	2.11	1.98
	c (m/s)	6.88	8.01	8.00	9.64	8.11
EPF	k	1.98	2.50	2.07	2.30	2.13
	c (m/s)	7.56	8.53	8.71	10.38	8.79
MLH	k	1.99	2.52	2.05	2.30	2.13
	c (m/s)	7.58	8.52	8.71	10.39	8.80

Şekil 4.7’de gözlem sonuçları ve farklı yöntemlere göre hesaplanan yıllık rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımları ve kümülatif dağılımları görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi Weibull dağılımına göre en yaygın hız değeri 6.5 m/s (mod değeri) olup olasılık değeri 0.10 olarak hesaplanmıştır. Bu değer toplam zamanın % 10’unda rüzgar hızının 6.5 m/s olduğunu göstermektedir. Genel olarak alize rüzgarları dışında en sık esen rüzgar hızı değeri ortalama hızdan daha düşüktür. 2010 yılı için yıllık ortalama hız değeri daha önce kesim 4.3’te verildiği gibi 7.79 m/s’dir. Gözlem sonuçlarına göre elde edilen frekans dağılımında en yaygın hız değeri 6.5 m/s, olasılık değeri 0.10’dur. Rayleigh dağılımına göre de en yaygın hız değeri 6.5 m/s, olasılık değeri 0.097’dir. Elektrik üretimi amaçlı kullanılan modern rüzgar türbinleri belirli rüzgar hızı aralıklarında çalışmaktadırlar. Genel olarak bu hız aralığı 4 ile 25 m/s aralığında değişmektedir. Weibull kümülatif dağılımına göre 4 m/s rüzgar hızı için kümülatif dağılımı değeri 0.21, gözlem sonuçlarına göre hesaplanan kümülatif dağılımı değeri 0.22, Rayleigh kümülatif dağılım sonuçlarına göre ise 0.23’dir. Buradan yaklaşık olarak toplam zamanın % 79’unda rüzgarın 4 m/s hızından daha yüksek hızlarda estiği anlaşılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan rüzgar hızı kayıtlarında 25 m/s’nin üzerinde hız kaydı bulunmamaktadır.



Şekil 4.7. Yıllık rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı

Şekil 4.8-4.19’da ise 2010 yılı için rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımları ve kümülatif dağılımların aylık değişimleri görülmektedir. Bu şekiller incelendiğinde ocak

ayı için Weibull dağılımına göre en yaygın hız değeri 9.5 m/s olup olasılık değeri 0.091 olarak hesaplanmıştır. Gözlem sonuçlarına göre elde edilen frekans dağılımında en yaygın hız değeri 5.5 m/s, olasılık değeri 0.084'dur. Rayleigh dağılımına göre de en yaygın hız değeri 8.5 m/s, olasılık değeri 0.074'dir.

Şubat ayı için yapılan hesaplarda Weibull şekil parametresi k , bu çalışmada ele alınan tüm yöntemlerde 2 değerine çok yakın çıkmıştır. Bu nedenle Weibull dağılımı Rayleigh dağılımı ile hemen hemen çakışmaktadır. Weibull dağılımına göre en yaygın hız değeri 7.5 m/s olup olasılık değeri 0.086 olarak hesaplanmıştır. Gözlem sonuçlarına göre elde edilen frekans dağılımında en yaygın hız değeri 9.5 m/s, olasılık değeri 0.093'dür. Beklenildiği gibi Rayleigh dağılımına göre en yaygın hız değeri 7.5 m/s, olasılık değeri 0.086'dır. Weibull kümülatif dağılımına göre 4 m/s rüzgar hızı için kümülatif dağılım değeri 0.19'dur.

Mart ayı için yapılan hesaplarda Weibull dağılımına göre en yaygın hız değeri 6.5 m/s olup olasılık değeri 0.11'dir. Gözlem sonuçlarına göre elde edilen frekans dağılımında en yaygın hız değeri 4.5 m/s, olasılık değeri 0.13'dür. Rayleigh dağılımına göre ise en yaygın hız değeri 5.5 m/s, olasılık değeri 0.10'dur. Weibull kümülatif dağılımına göre 4 m/s rüzgar hızı için kümülatif dağılım değeri 0.24'dür.

Nisan ayı için Weibull dağılımına göre en yaygın hız değeri 6.5 m/s olup olasılık değeri 0.11'dir. Gözlem sonuçlarına göre elde edilen frekans dağılımında en yaygın hız değeri 4.5 m/s, olasılık değeri 0.11'dir. Rayleigh dağılımına göre ise en yaygın hız değeri 5.5 m/s, olasılık değeri 0.10'dur. Weibull kümülatif dağılımına göre 4 m/s rüzgar hızı için kümülatif dağılım değeri 0.25'dür.

Mayıs ayı için Weibull dağılımına göre en yaygın hız değeri 4.5 m/s olup olasılık değeri 0.13'dür. Gözlem sonuçlarına göre elde edilen frekans dağılımında en yaygın hız değeri 3.5 m/s, olasılık değeri 0.14'dür. Rayleigh dağılımına göre ise en yaygın hız değeri 4.5 m/s, olasılık değeri 0.13'dur. Weibull kümülatif dağılımına göre 4 m/s rüzgar hızı için kümülatif dağılım değeri 0.40'dır. SS-OH metoduna göre hesaplanan Weibull k parametresi 1.97 olup Rayleigh dağılımı için kabul edilen 2 değerine oldukça yakındır. Bu nedenle dağılım eğrileri mayıs ayında da çakışmıştır.

Haziran ayında Weibull dağılımına göre en yaygın hız değeri 5.5 m/s, olasılık değeri ise 0.13'dür. Gözlem sonuçlarına göre elde edilen frekans dağılımında en yaygın hız değeri 4.5 m/s, olasılık değeri 0.14'dür. Rayleigh dağılımına göre ise en yaygın hız değeri 4.5 m/s, olasılık değeri 0.12'dir. Weibull kümülatif dağılımına göre 4 m/s rüzgar hızı için kümülatif dağılım değeri 0.29'dur.

Temmuz ayında Weibull dağılımına göre en yaygın hız değeri 8.5 m/s, olasılık değeri ise 0.13'dür. Gözlem sonuçlarına göre elde edilen frekans dağılımında en yaygın hız değeri 8.5 m/s, olasılık değeri 0.16'dır. Rayleigh dağılımına göre ise en yaygın hız değeri 6.5 m/s, olasılık değeri 0.093'dir. Weibull kümülatif dağılımına göre 4 m/s rüzgar hızı için kümülatif dağılım değeri 0.092'dir.

Ağustos ayında Weibull dağılımına göre en yaygın hız değeri 7.5 m/s, olasılık değeri ise 0.10'dur. Gözlem sonuçlarına göre elde edilen frekans dağılımında en yaygın hız değeri 7.5 m/s, olasılık değeri 0.13'dur. Rayleigh dağılımına göre ise en yaygın hız değeri 6.5 m/s, olasılık değeri 0.093'dir. Weibull kümülatif dağılımına göre 4 m/s rüzgar hızı için kümülatif dağılım değeri 0.16'dır.

Eylül ayı için Weibull dağılımına göre en yaygın hız değeri 7.5 m/s, olasılık değeri ise 0.12'dur. Gözlem sonuçlarına göre elde edilen frekans dağılımında en yaygın hız değeri 6.5 m/s, olasılık değeri 0.14'dur. Rayleigh dağılımına göre ise en yaygın hız değeri 6.5 m/s, olasılık değeri 0.098'dir. Weibull kümülatif dağılımına göre 4 m/s rüzgar hızı için kümülatif dağılım değeri 0.15'dir.

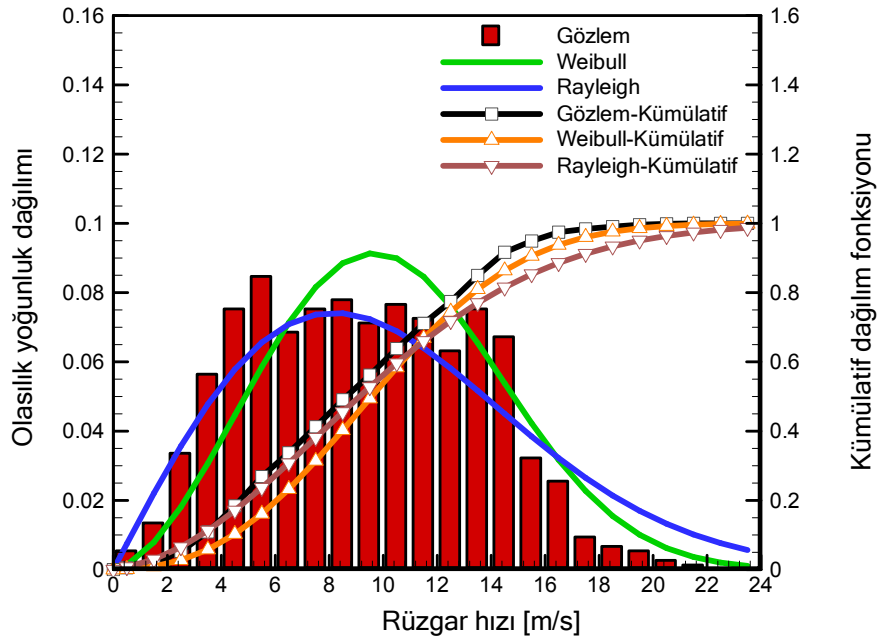
Ekim ayı için Weibull dağılımına göre en yaygın hız değeri 7.5 m/s, olasılık değeri ise 0.10'dur. Gözlem sonuçlarına göre elde edilen frekans dağılımında en yaygın hız değeri 6.5 m/s, olasılık değeri 0.10'dur. Rayleigh dağılımına göre ise en yaygın hız değeri 6.5 m/s, olasılık değeri 0.095'dir. Weibull kümülatif dağılımına göre 4 m/s rüzgar hızı için kümülatif dağılım değeri 0.18'dir.

Kasım ayında Weibull dağılımına göre en yaygın hız değeri 4.5 m/s, olasılık değeri ise 0.090'dur. Gözlem sonuçlarına göre elde edilen frekans dağılımında en yaygın hız değeri 3.5 m/s, olasılık değeri 0.13'dür. Rayleigh dağılımına göre ise en yaygın hız

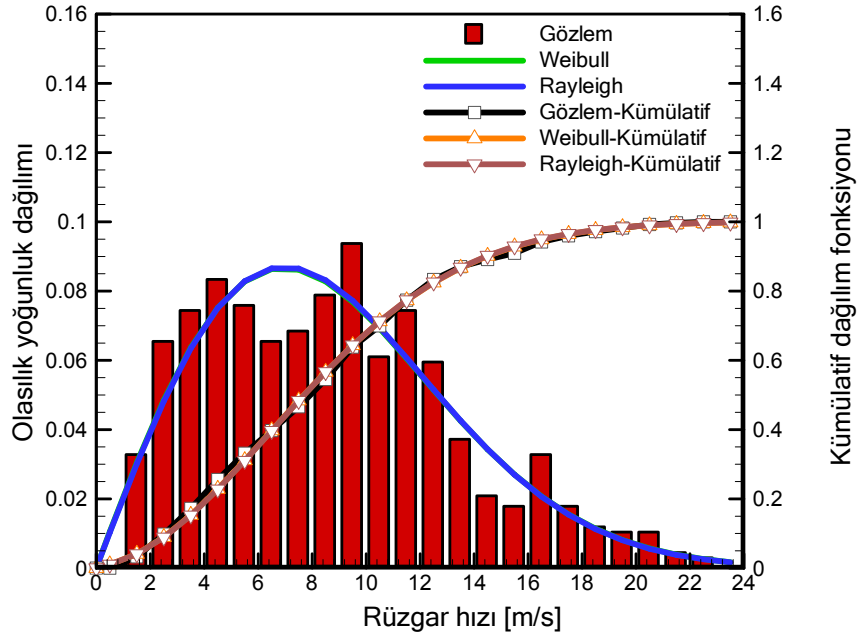
değeri 5.5 m/s, olasılık değeri 0.10'dır. Weibull kümülatif dağılımına göre 4 m/s rüzgar hızı için kümülatif dağılım değeri 0.32'dir.

Aralık ayında Weibull dağılımına göre en yaygın hız değeri 7.5 m/s, olasılık değeri ise 0.099'dur. Gözlem sonuçlarına göre elde edilen frekans dağılımında en yaygın hız değeri 6.5 m/s, olasılık değeri 0.11'dir. Rayleigh dağılımına göre ise en yaygın hız değeri 6.5 m/s, olasılık değeri 0.88'dir. Weibull kümülatif dağılımına göre 4 m/s rüzgar hızı için kümülatif dağılım değeri 0.15'dir.

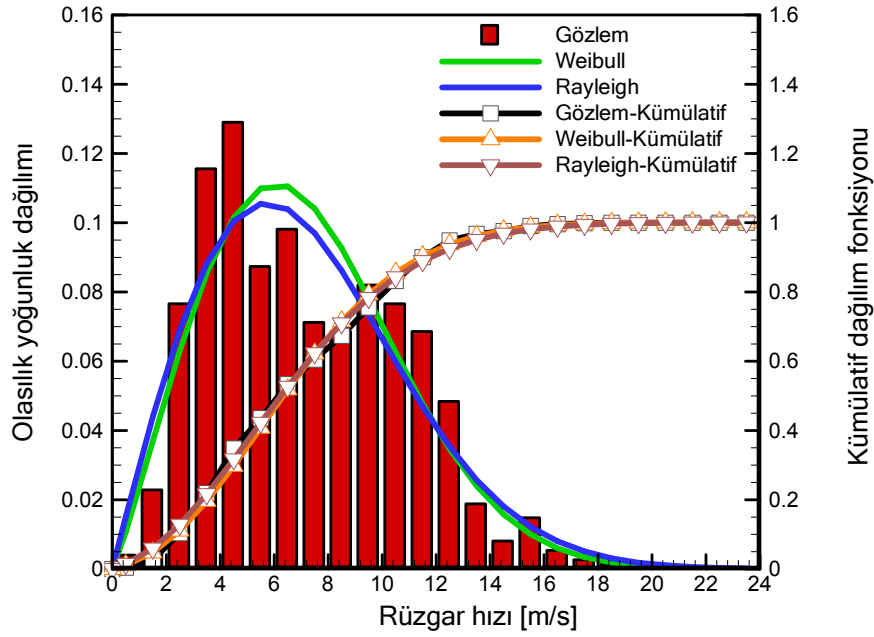
Şekil 4.20-4.23'de 2010 yılı için rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımları ve kümülatif dağılımların mevsimsel bazda değişimleri görülmektedir. Weibull dağılımına göre sonbahar, kış, ilk bahar ve yaz için sırasıyla en yaygın hız değeri 6.5 m/s, 8,5 m/s, 5.5 m/s, 7.5 m/s olasılık değerleri ise 0.098, 0.090, 0.11, 0.11'dir. İlkbahar ve sonbahar mevsimlerinde Weibull şekil parametresi k 2'ye yakındır. İlkbahar ve sonbahar mevsimlerinde Weibull şekil parametresi k 2'ye yakındır. Kış mevsimi için Weibull kümülatif dağılımına göre 4 m/s rüzgar hızı için kümülatif dağılım değeri 0.13, ilkbahar için 0.32, yaz mevsimi için 0.15, sonbaharda ise 0.22 olarak hesaplanmıştır.



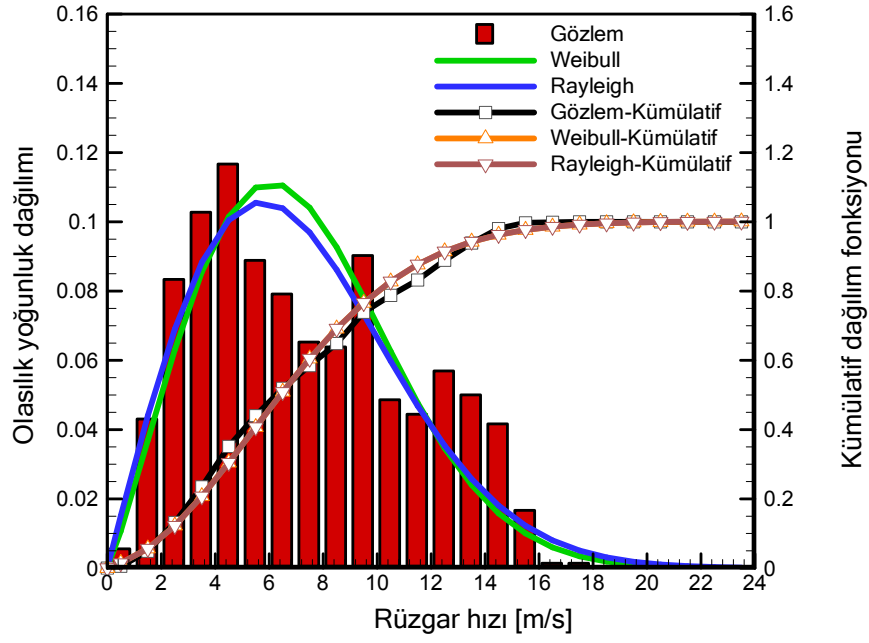
Şekil 4.8. Ocak ayı rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı



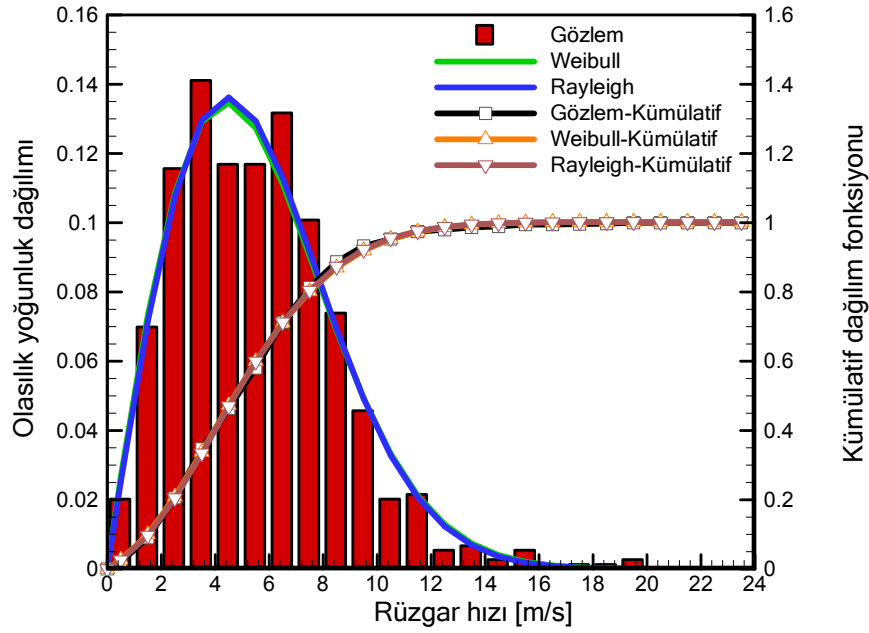
Şekil 4.9. Şubat ayı rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı



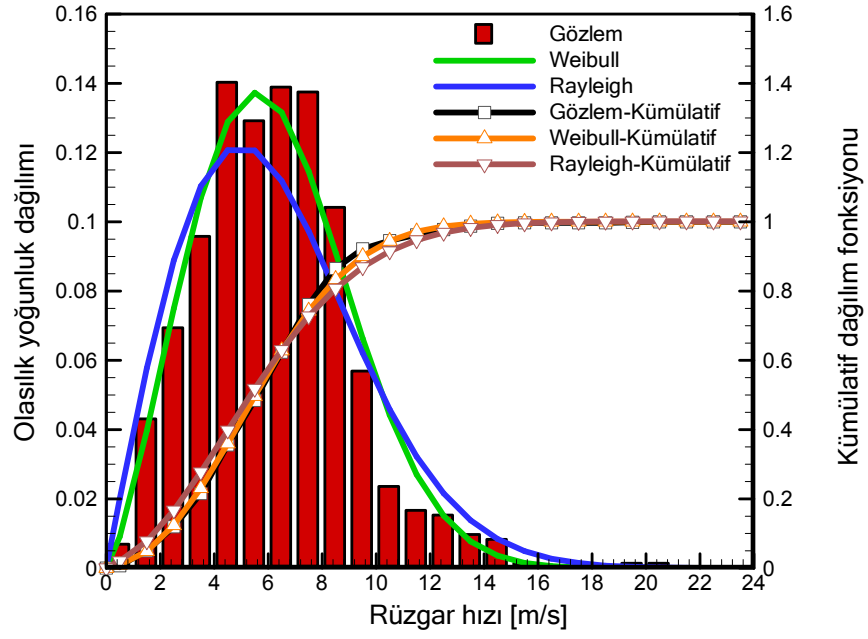
Şekil 4.10. Mart ayı rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı



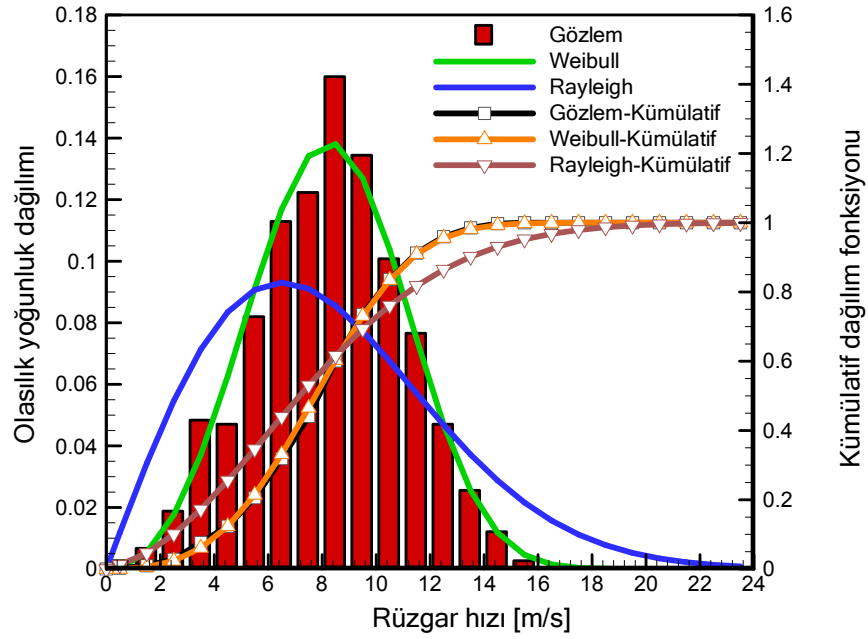
Şekil 4.11. Nisan ayı rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı



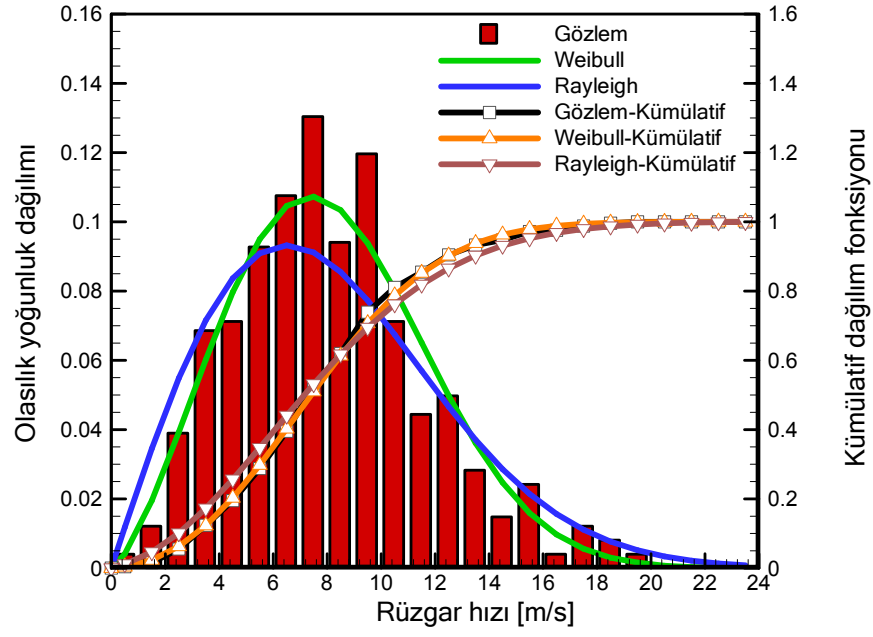
Şekil 4.12. Mayıs ayı rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı



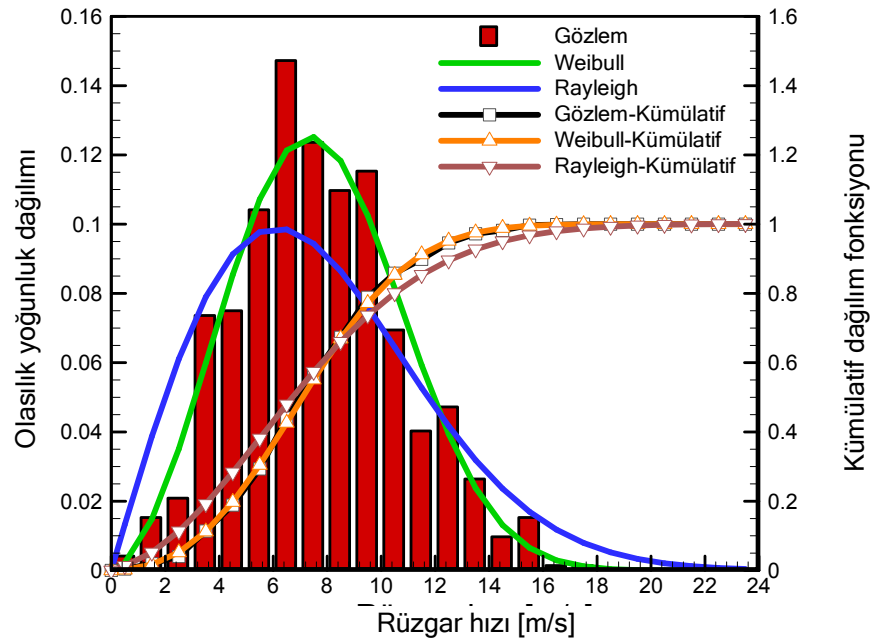
Şekil 4.13. Haziran ayı rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı



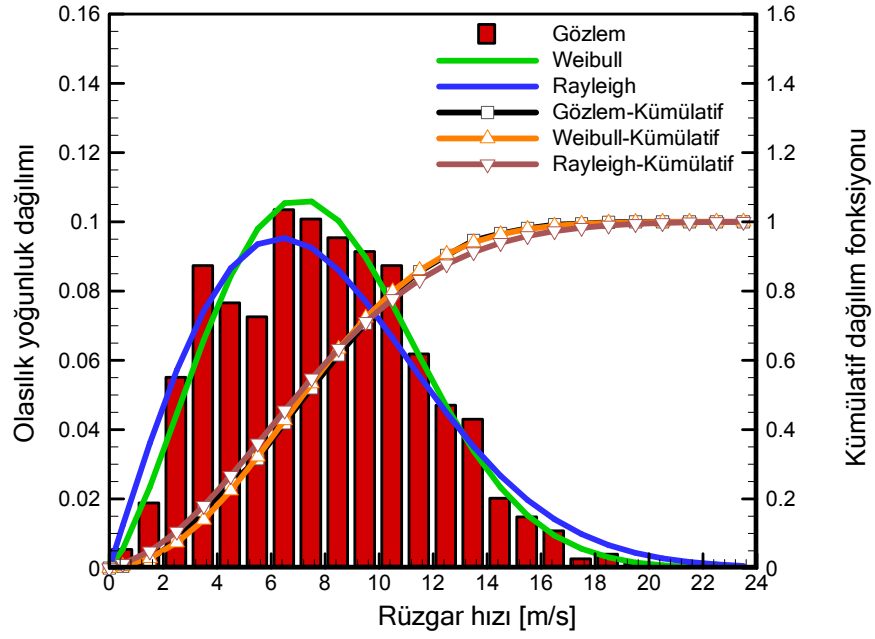
Şekil 4.14. Temmuz ayı rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı



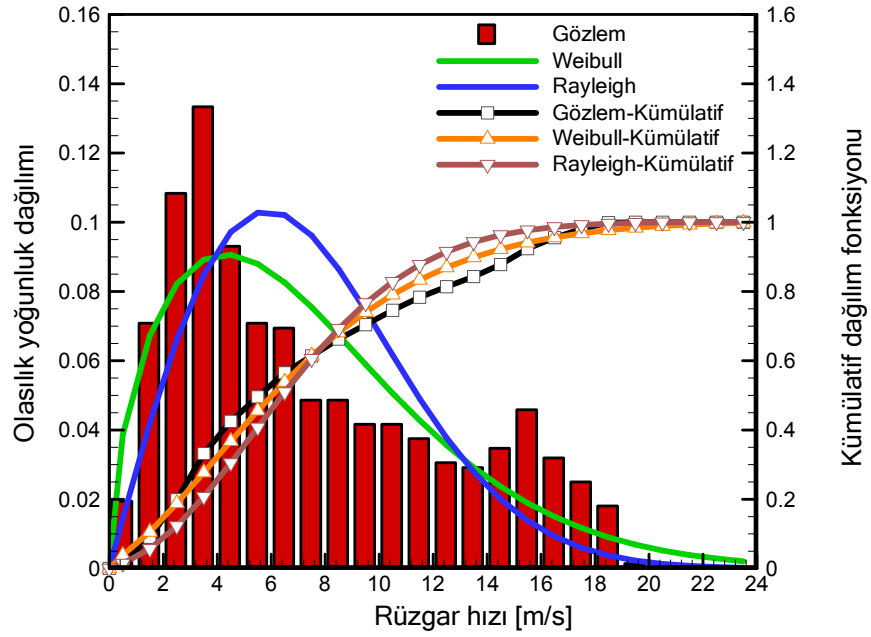
Şekil 4.15. Ağustos ayı rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı



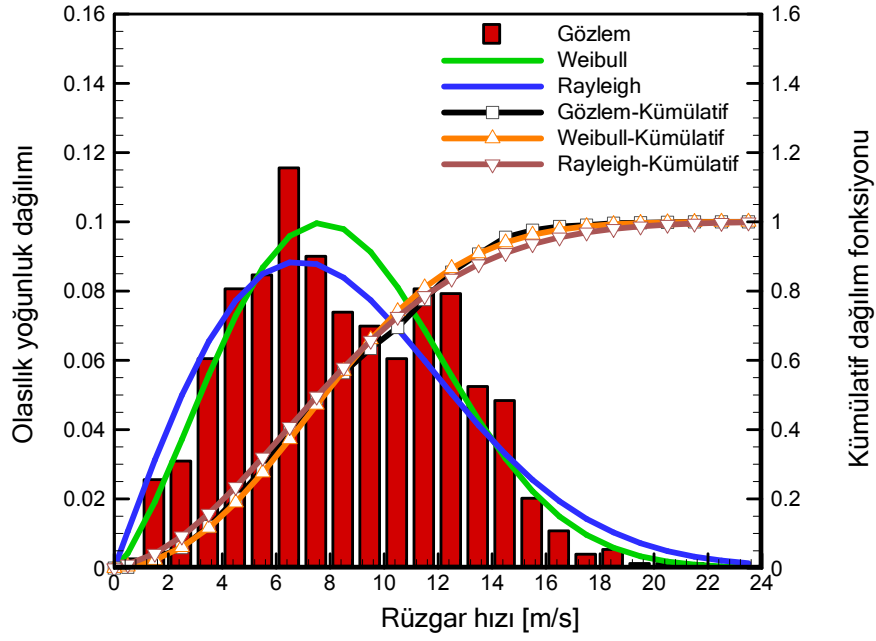
Şekil 4.16. Eylül ayı rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı



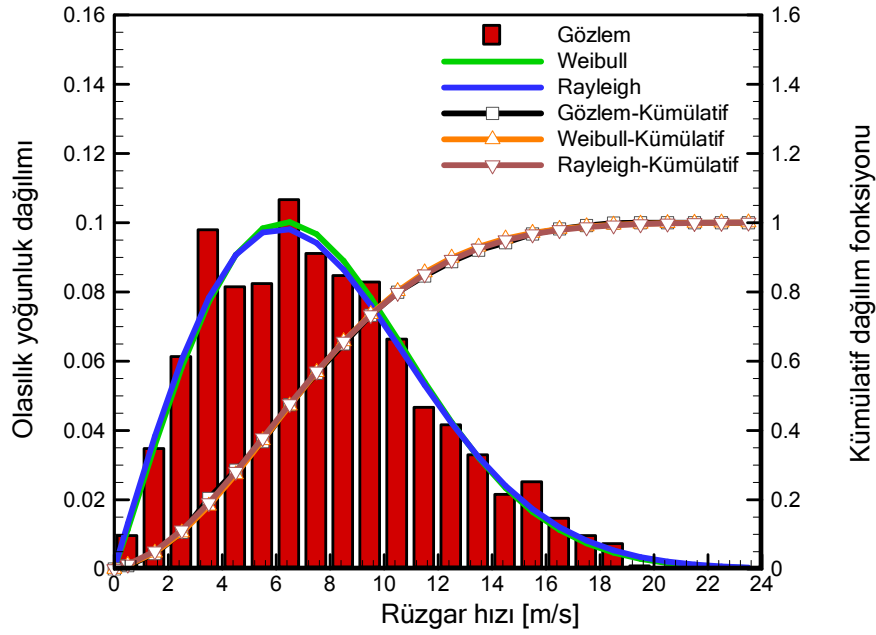
Şekil 4.17. Ekim ayı rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı



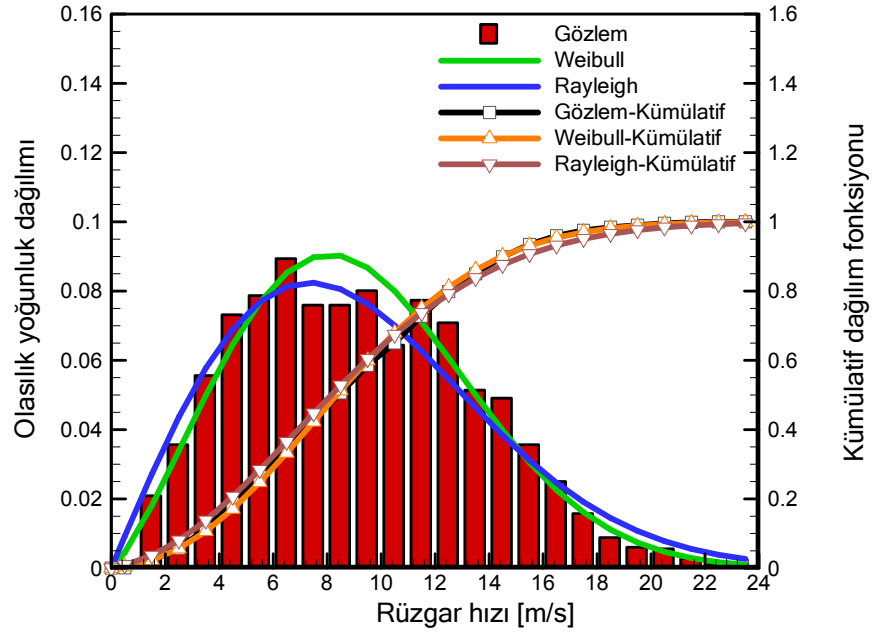
Şekil 4.18. Kasım ayı rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı



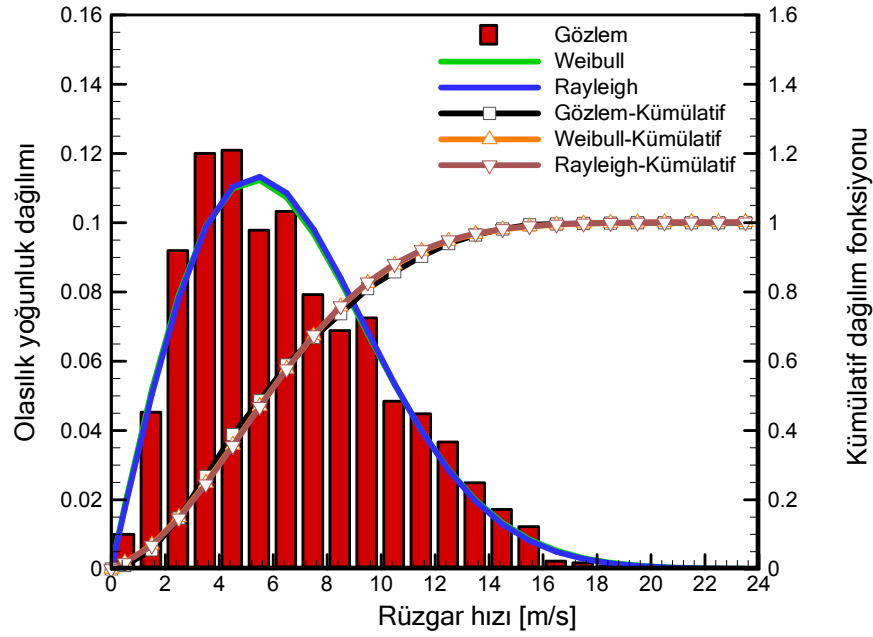
Şekil 4.19. Aralık ayı rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı



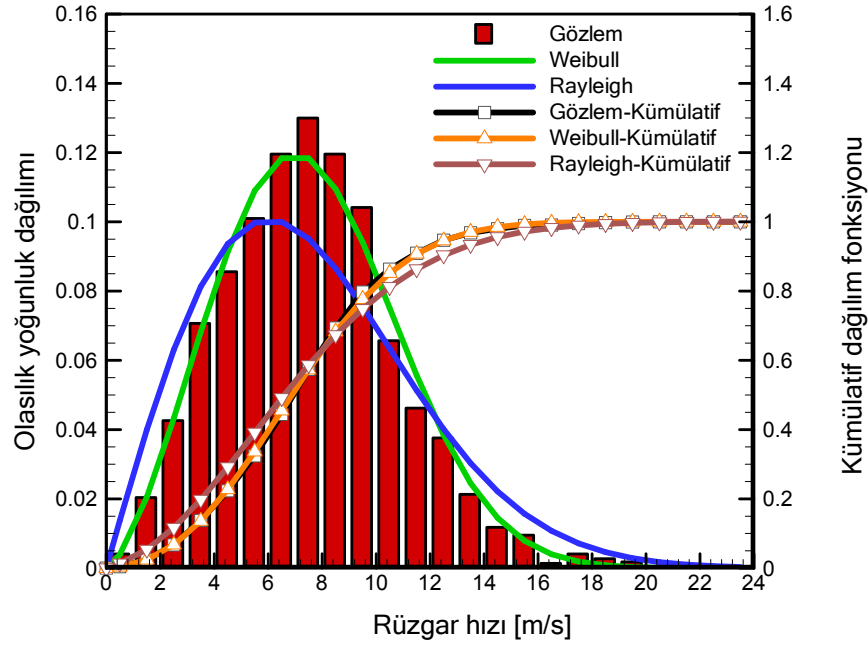
Şekil 4.20. Sonbahar mevsimi rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı



Şekil 4.21. Kış mevsimi rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı



Şekil 4.22. İlkbahar mevsimi rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı



Şekil 4.23. Yaz mevsimi rüzgar hızı olasılık yoğunluk dağılımı ve kümülatif dağılımı

4.5. Rüzgar Gücü Yoğunluğu

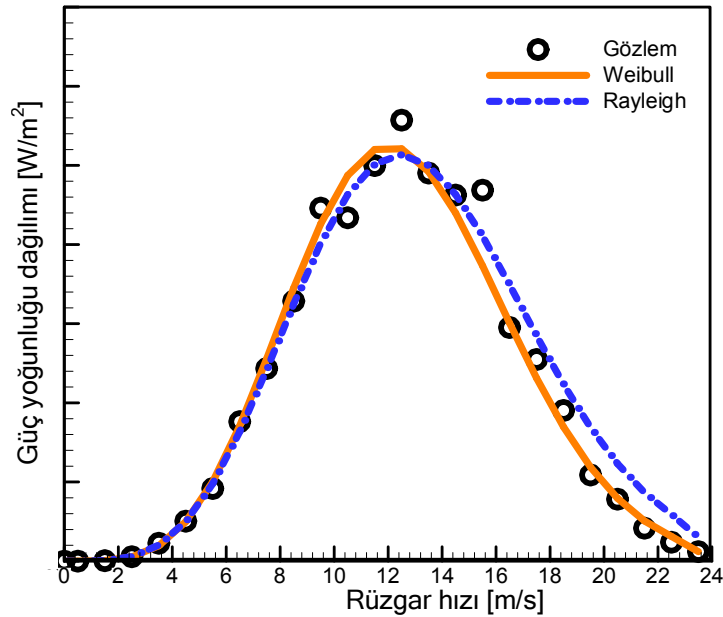
Güç yoğunluğu hesabı potansiyel bir alanda her hangi bir rüzgar enerjisi dönüşüm sistemini değerlendirmeye almadan o alandaki rüzgar enerjisi potansiyeli hakkında bilgi veren faydalı bir yöntemdir. Ortalama rüzgar hızı yanında güç yoğunluğu, rüzgarlı bir alandaki rüzgar enerjisi potansiyelinin önemli bir göstergesidir. Çizelge 4.7’de ay, mevsim ve yıl bazında İzmir-İzmir-İzmir’de 30 m yükseklikteki güç yoğunluğu değerlerinin gözlem frekans dağılımı, Weibull ve Rayleigh dağılımlarına göre değişimleri görülmektedir. Weibull dağılımına göre güç yoğunluğu mayıs ayında 206.84 W/m^2 değeri ile en küçük, ocak ayında ise 998.33 W/m^2 değeri ile en yüksek değerini almıştır. Genel olarak güç yoğunluğu değerleri aylık ortalama rüzgar hızlarının yüksek olduğu kış aylarında daha fazladır.

Şekil 4.24’de güç yoğunluğu dağılımının farklı dağılım fonksiyonlarına göre yıllık değişimleri görülmektedir. Weibull dağılımına göre 12.5 m/s rüzgar hızına karşılık gelen güç yoğunluğu 52.10 W/m^2 iken gözlem frekansı için bu değer 55.71 W/m^2 ’dir. Şekilde görüldüğü gibi düşük rüzgar hızlarında tüm dağılımlar benzer karakteristikler

sergilemiştir. Rüzgar hızlarındaki küçük değişimler güç yoğunluklarında daha büyük değişimlere neden olduğu için yüksek rüzgar hızlarında farklılıklar görülmektedir.

Çizelge 4.7.Güç yoğunluğu değerlerinin gözlem, Weibull, Rayleigh dağılımlarına göre değişimi

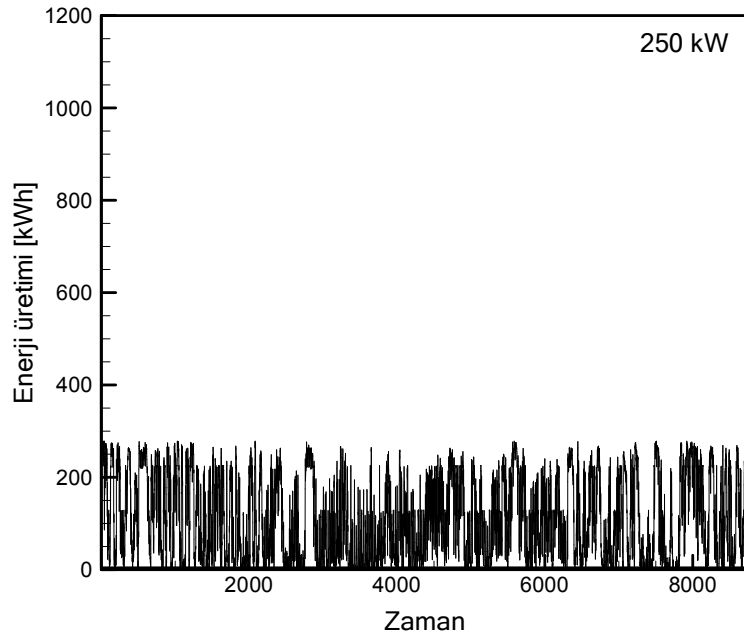
Periyot	Güç yoğunluğu [W/m^2]		
	Gözlem	Weibull	Rayleigh
Ocak	796.37	998.33	1101.47
Şubat	787.18	754.30	752.04
Mart	405.70	404.55	433.39
Nisan	464.32	466.64	466.18
Mayıs	213.41	206.84	203.30
Haziran	249.80	244.74	284.01
Temmuz	460.11	462.91	625.74
Ağustos	542.65	535.20	622.52
Eylül	419.88	418.10	527.28
Ekim	514.04	514.76	584.26
Kasım	642.15	591.65	465.04
Aralık	635.55	636.09	716.59
İlkbahar	360.02	356.92	352.10
Yaz	419.35	415.38	501.51
Sonbahar	525.23	520.66	534.49
Kış	809.81	799.08	862.70
Yıllık	527.07	520.71	549.23



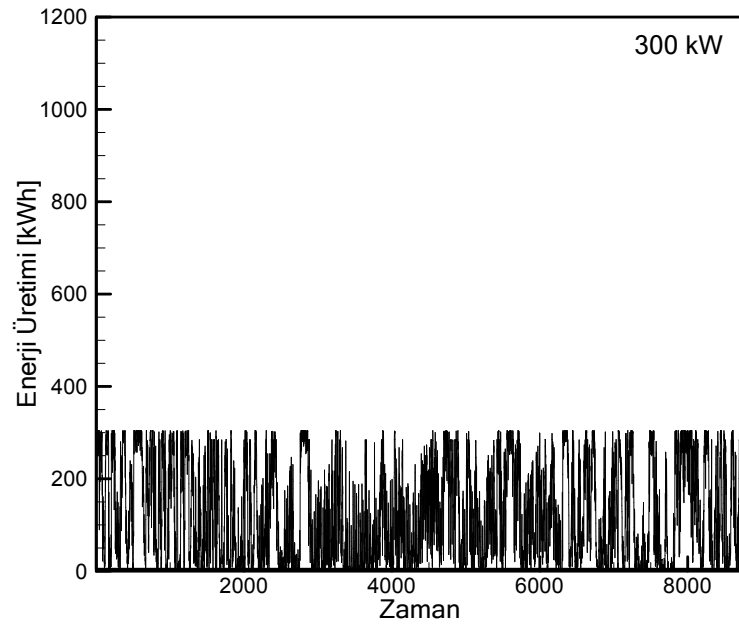
Şekil 4.24. Yıllık güç yoğunluğu dağılımı

4.6. Enerji Üretimi ve Tüketimi

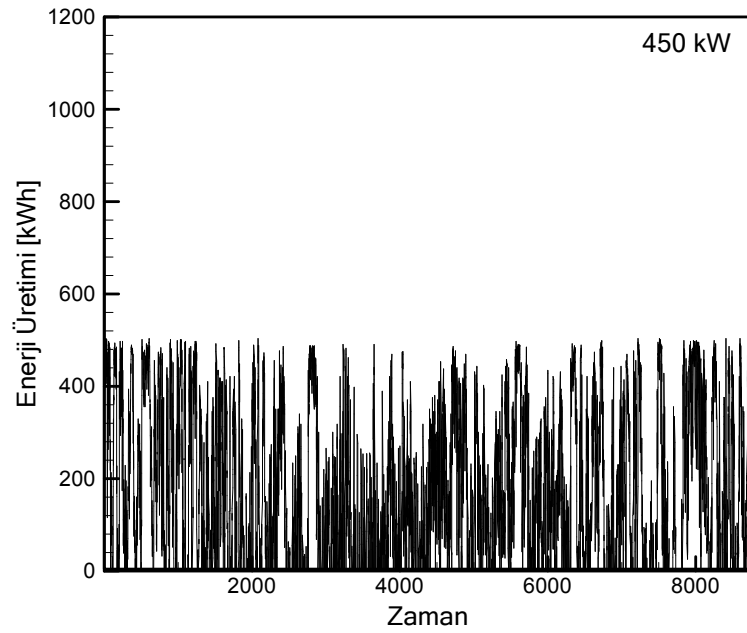
Bir rüzgar türbininden üretilen enerji miktarı rüzgar türbinin dizayn karakteristiklerine ve rüzgar hızı olasılık yoğunluğu ile gösterilen rüzgar kaynağının özelliklerine bağlıdır. Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi için hazırlanan enerji modeli ile gerçek rüzgar frekans dağılımının uygun bir şekilde eşleşmesi enerji üretiminin maksimize edilmesi açısından önemlidir. Bir rüzgar türbininden maksimum verimi elde etmek için o rüzgar türbinin kurulacağı bölgeye göre tasarlanması gerekir. Ancak her potansiyel bölge için rüzgar türbini tasarlamak ekstra maliyet gerektireceğinden pratik değildir. Bu yüzden genellikle rüzgar türbinleri pazarda var olan, potansiyel bölgenin karakteristikleriyle en iyi eşleşen, türbinlerden seçilir. Bu çalışmada elektrolizör için gerekli elektrik enerjisinin rüzgar türbinlerinden sağlanması hedeflenmiştir. Bu amaçla güçleri 250, 300, 450, 600, 800 ve 1000 kW olan rüzgar türbinleri ayrı ayrı ele alınmış enerji üretimi kesim 3.5'te açıklanan yöntemle belirlenmiştir. Karşılaştırma olması açısından tüm rüzgar türbinlerinin 70 m hub yüksekliğinde çalıştığı varsayılmıştır. İnverter verimi % 96 olarak kabul edilmiştir. Şekil 4.25-4.30 göz önünde bulundurulan rüzgar türbinlerinin enerji üretim değişimi görülmektedir.



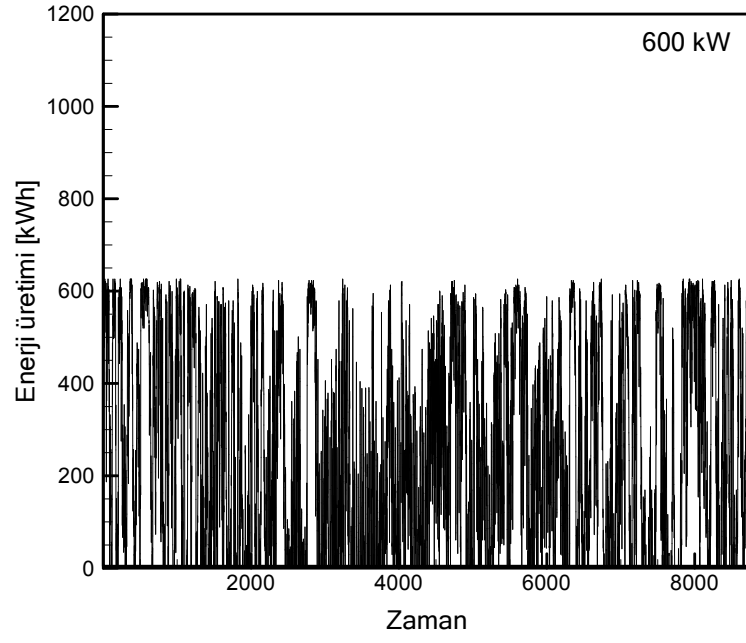
Şekil 4.25. 250 kW rüzgar türbini için enerji üretiminin değişimi



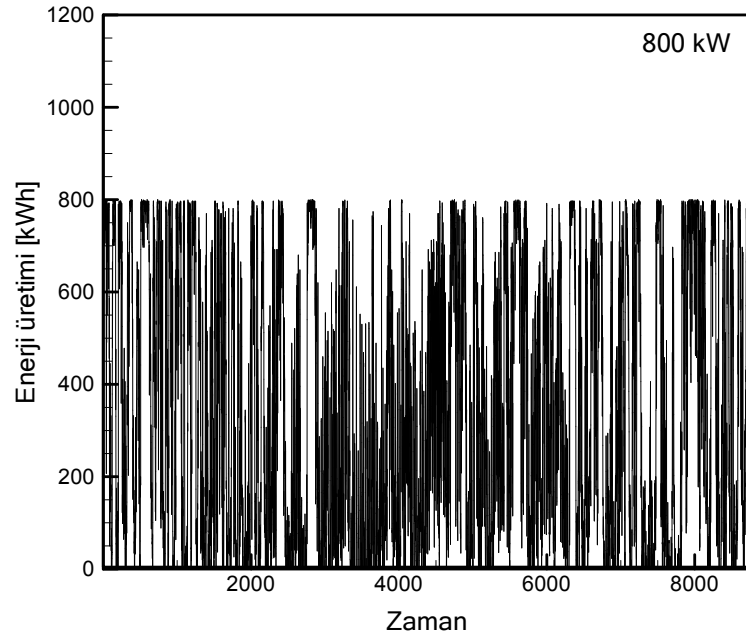
Şekil 4.26. 300 kW rüzgar türbini için enerji üretiminin değişimi



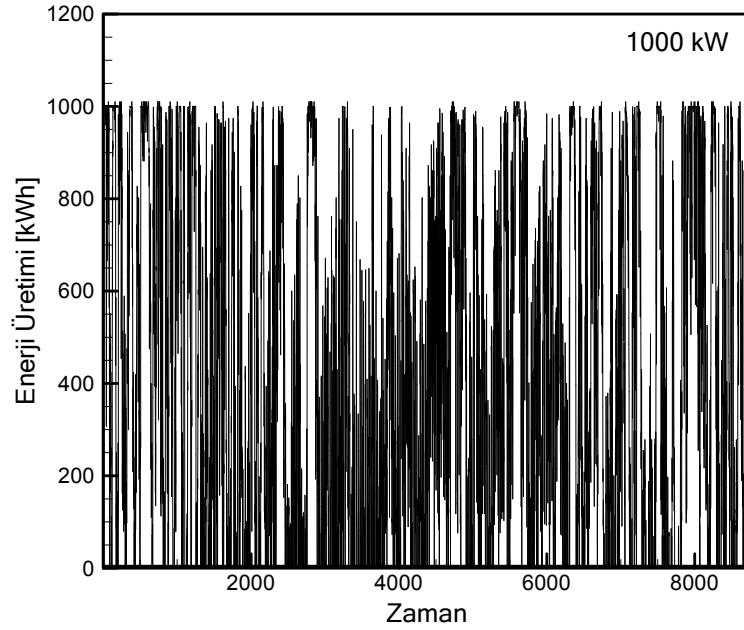
Şekil 4.27. 450 kW'lık rüzgar türbini için enerji üretiminin değişimi



Şekil 4.28. 600 kW'lık rüzgar türbini için enerji üretiminin değişimi



Şekil 4.29. 800 kW'lık rüzgar türbini için enerji üretiminin değişimi



Şekil 4.30. 1000 kW’lık rüzgar türbini için enerji üretiminin değişimi

Kesim 4.2’de açıklandığı gibi bu çalışmada 100 gün/kgH₂ kapasiteli elektrolizörün elektrik enerjisi ihtiyacının rüzgar türbininden karşılanması hedeflenmektedir. Ancak bir andaki rüzgar hızı rüzgar türbinin çalışmasını sağlayacak seviyede değilse elektrolizör elektrik enerjisi ihtiyacını şebekeden, bazı durumlarda ise hem rüzgar türbininden hem de şebekeden karşılayacaktır. Çizelge 4.8’de rüzgar türbinlerinden üretilen elektrik enerjisi miktarı ve şebekeyle olan enerji etkileşiminin yıllık değerleri görülmektedir. İzmir-Aliağa’da 250 kW gücünde rüzgar türbini kullanılması durumunda yıllık 994740 kWh elektrik enerjisi üretilebileceği, rüzgar enerjisi-hidrojen üretim sisteminin şebekeye 14797 kWh elektrik enerjisi vereceği, şebekeden ise 1130800 kWh elektrik enerjisi alacağı hesaplanmıştır. 1000 kW gücünde rüzgar türbini kullanılması durumunda ise yıllık 3827400 kWh elektrik enerjisi üretebileceği, rüzgar enerjisi-hidrojen üretim sisteminin şebekeye 5544100 kWh elektrik enerjisi vereceği, şebekeden ise 616790 kWh elektrik enerjisi alacağı hesaplanmıştır. 250 kW yerine 1000 kW’lık rüzgar türbini kullanılması durumunda şebekeden alınan elektrik enerjisi miktarı 514010 kWh azalmış, şebekeye verilen elektrik enerjisi miktarı 5529303 kWh artmıştır. Böylelikle hidrojenin üretiminde, bir çok ülkede olduğu gibi ülkemizde karbon esaslı yakıtların yakılmasıyla üretilen elektriğin kullanımı azalmış, bunun yanında şebekeye de daha temiz kaynak olan rüzgar enerjisinden üretilen elektrik enerjisi verilmiş

olmaktadır. Kapasite faktörü rüzgar türbinlerinin performanslarının değerlendirilmesinde önemli bir kriterdir. Kapasite faktörü $KF = \frac{YEÜ}{(8760 * \text{Türbin Gücü}) * 100 (\%)}$ olarak tanımlanacak olursa, 250 kW rüzgar türbinin kapasite faktörü % 45, 1000 kW rüzgar türbinin kapasite faktörü ise % 43 olmaktadır. Genel olarak bu çalışmada kullanılan rüzgar türbinlerinin kapasite faktörü % 40'ın üzerindedir. Bu değerler günümüzde % 25 olarak kabul edilen eşik değerinin üzerindedir.

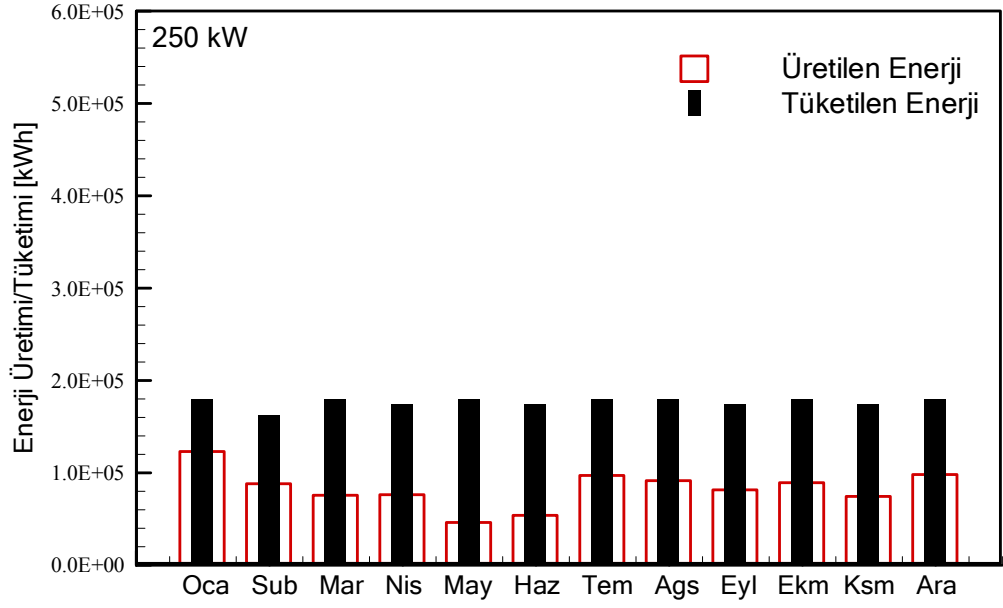
Çizelge 4.8. Farklı rüzgar türbini kullanım durumunda enerji akışı

Rüzgar Türbini	YEÜ (kWh)	YEET (kWh)	YŞVE (kWh)	YŞAE (kWh)
250 kW	9.9474E+05	2.1108E+06	1.4797E+04	1.1308E+06
300 kW	1.2817E+06	2.1108E+06	9.9316E+04	9.2834E+05
450 kW	1.8239E+06	2.1108E+06	5.4396E+05	8.3086E+05
600 kW	2.2731E+06	2.1108E+06	9.3544E+05	7.7309E+05
800 kW	3.0401E+06	2.1108E+06	1.6089E+06	6.7952E+05
1000 kW	3.8274E+06	2.1108E+06	5.5441E+06	6.1679E+05
YEÜ Yıllık enerji üretimi				
YEET Yıllık elektrolizör-kompresör sisteminin enerji tüketimi				
YŞVE Yıllık şebekeye verilen enerji				
YŞAE Yıllık şebekeden alınan enerji				

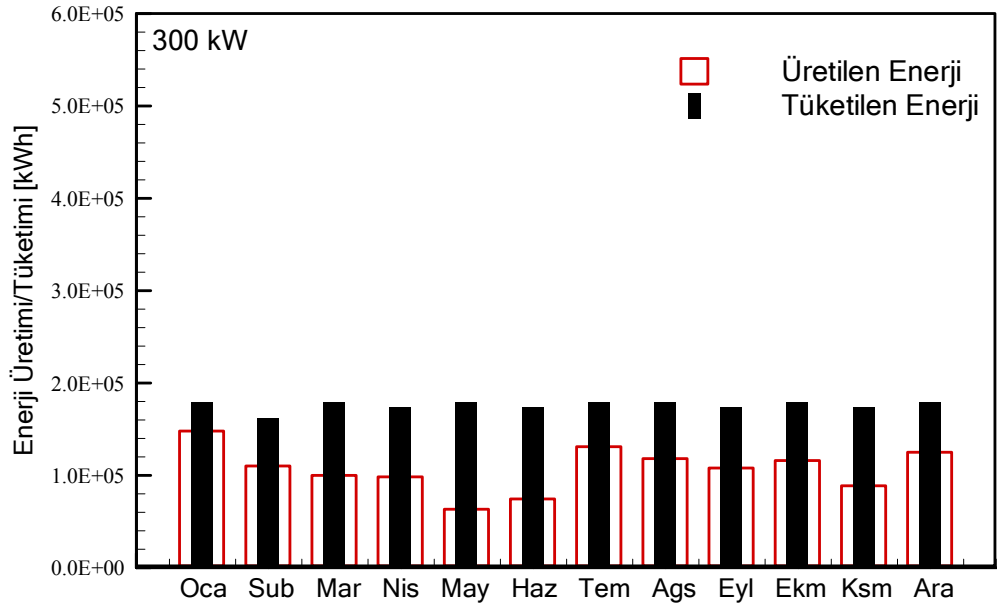
Şekil 4.31-4.36'da kullanılan rüzgar türbinlerine göre rüzgar türbini-hidrojen üretim sisteminde üretilen ve tüketilen elektrik enerjisi miktarlarının aylık değişimi görülmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi hidrojen üretim sisteminde 250 kW gücünde rüzgar türbini kullanılması durumunda ocak ayında 123000 kWh elektrik enerjisi üretilirken 179269.8 kWh elektrik enerjisi tüketilmesi gerekmektedir. Elektrik enerjisi üretiminin en az olduğu mayıs ayında ise, 46200 kWh elektrik enerjisi üretilirken 179269.8kWh elektrik enerjisi tüketilmesi gerekmektedir.

Hidrojen üretim sisteminde 1000 kW gücünde rüzgar türbini kullanılması durumunda ise ocak ayında 480000 kWh elektrik enerjisi üretilirken elektrolizörün elektrik enerjisi tüketimi 179269.8 kWh olmaktadır. Rüzgar enerjisi dönüşüm sisteminde elektrik enerjisinin üretiminin en az olduğu mayıs ayında, 168000 kWh elektrik enerjisi üretilmektedir. 1000 kW gücünde rüzgar türbinin kullanılması ile şebekeden alınan yani konvansiyonel kaynaklardan üretilen elektrik enerjisi kullanımını azaltmakta, kirletici emisyon salımı gibi doğaya zarar veren olumsuz etkiler ortadan kaldırılmaktadır.

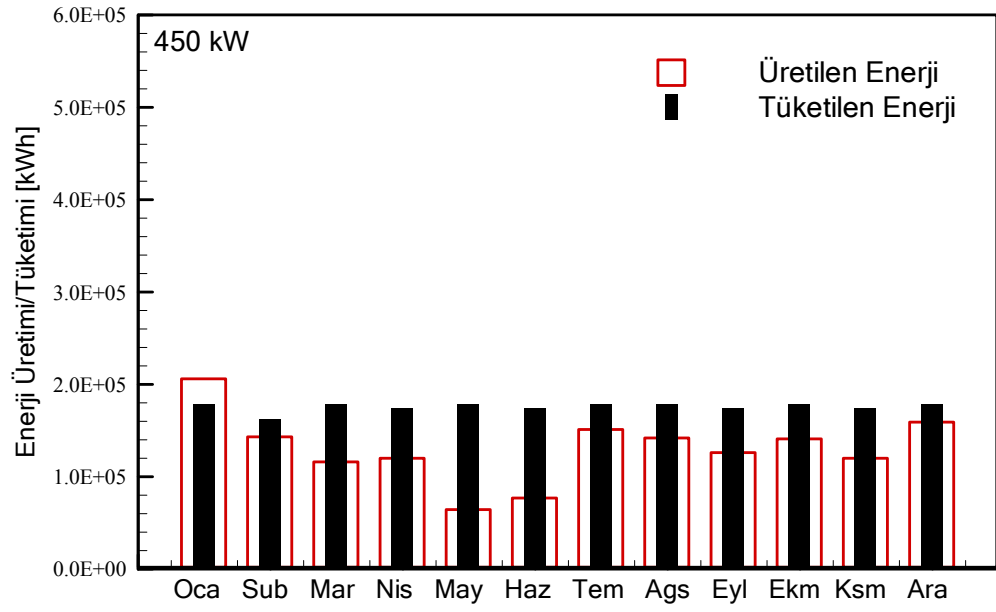
Ayrıca, hidrojen üretim sisteminin ihtiyacı dışındaki enerji şebekeye verilerek, şebekeye yenilenebilir enerji arzında katkı sağlanmaktadır.



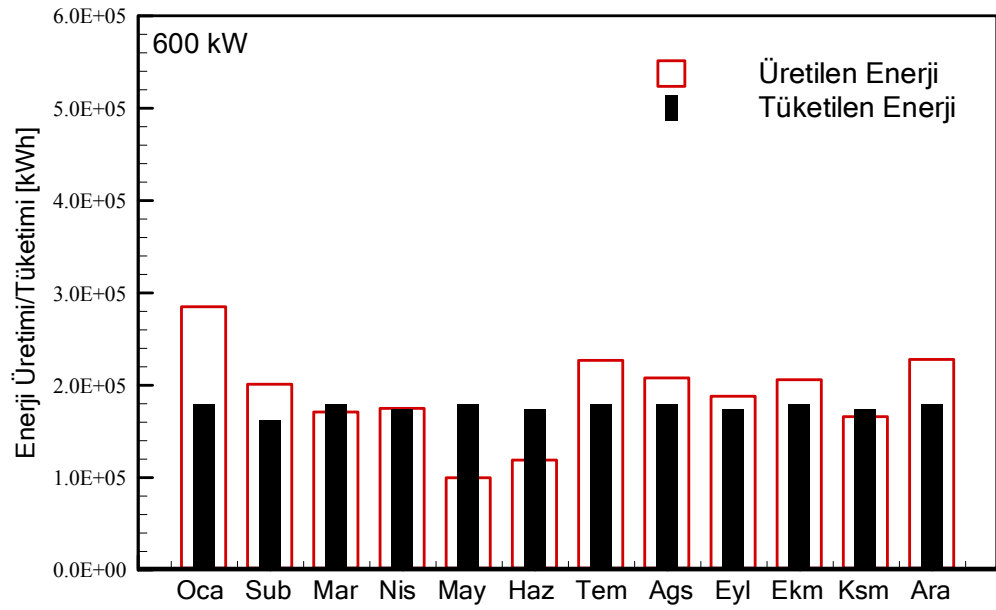
Şekil 4.31. 250 kW'lık rüzgar türbinli sistemde üretilen ve tüketilen enerji miktarları



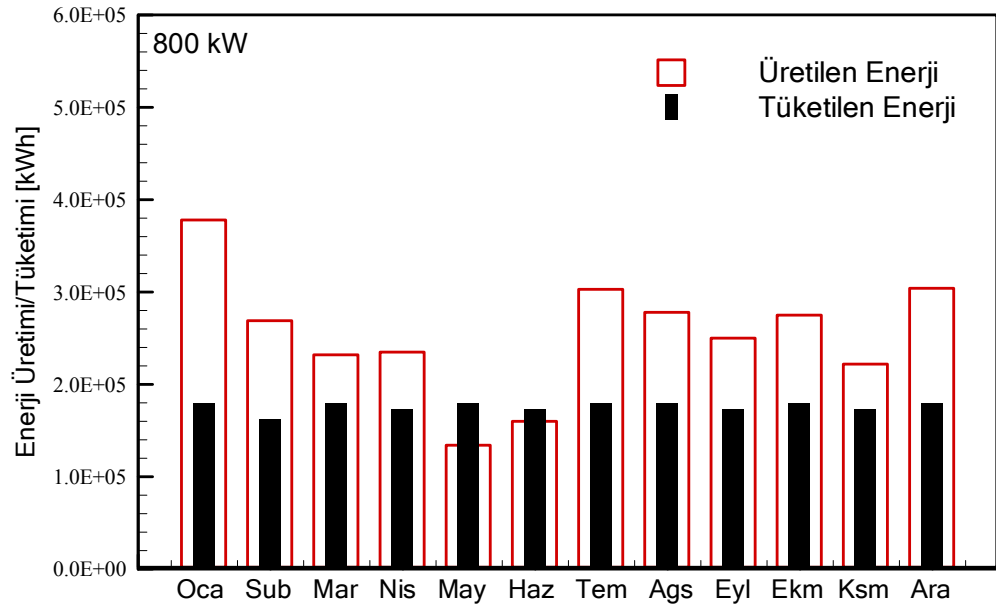
Şekil 4.32. 300 kW'lık rüzgar türbinli sistemde üretilen ve tüketilen enerji miktarları



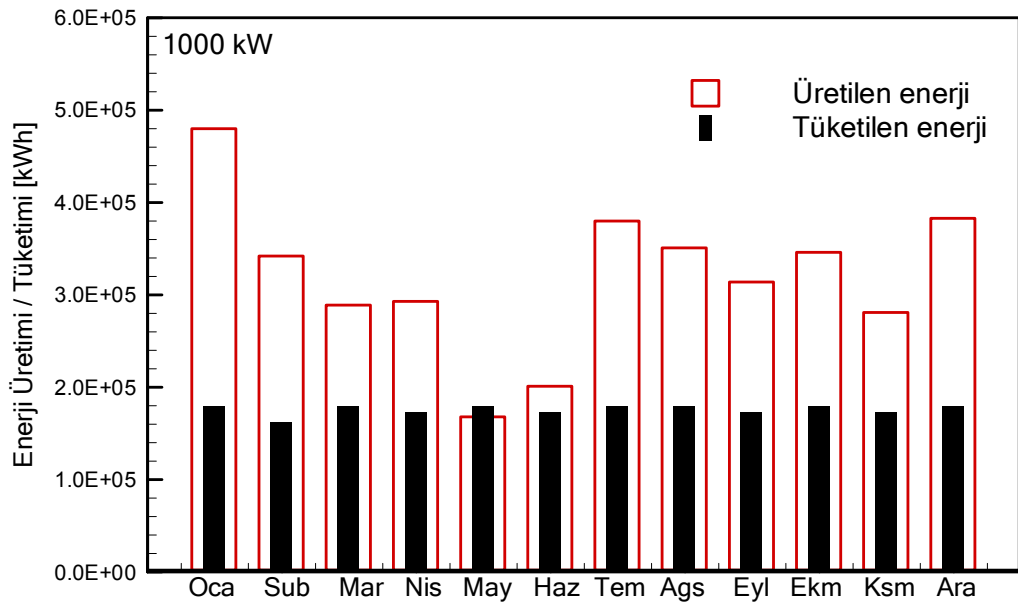
Şekil 4.33. 450 kW'lık rüzgar türbinli sistemde üretilen ve tüketilen enerji miktarları



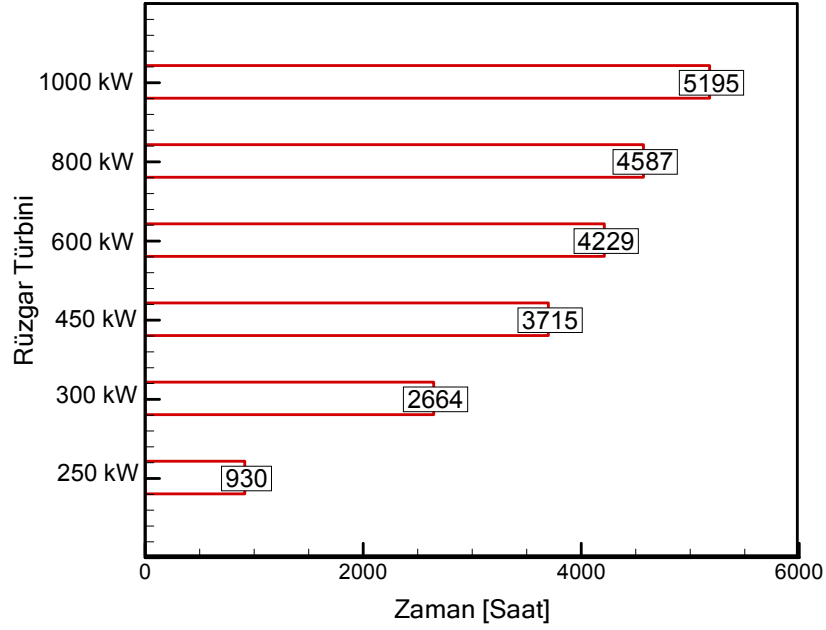
Şekil 4.34. 600 kW'lık rüzgar türbinli sistemde üretilen ve tüketilen enerji miktarları



Şekil 4.35. 800 kW'lık rüzgar türbinli sistemde üretilen ve tüketilen enerji miktarları



Şekil 4.36. 1000 kW'lık rüzgar türbinli sistemde üretilen ve tüketilen enerji miktarları



Şekil 4.37. Elektrolizör-kompresör sisteminin sadece rüzgar enerjisi kullanma süreleri

Şekil 4.37’de elektrolizör-kompresör sisteminin elektrik enerjisi ihtiyacını sadece rüzgar enerjisi dönüşüm sisteminden karşıladığı süreler görülmektedir. Hidrojen enerjisi üretim sisteminde 1000 kW gücünde rüzgar türbini kullanılması durumunda enerji tüketen sistemler yılda 5195 saat sadece rüzgar enerjisi kaynaklı elektrik enerjisi tüketmektedirler.

4.7. Ekonomik Analiz

Bu çalışmada, elektrik enerjisi ve hidrojen maliyeti bir değere getirilmiş maliyet metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Rüzgar türbini-hidrojen üretim sisteminde farklı güçlerde 6 farklı rüzgar türbini kullanılmış, 100 kgH₂/gün kapasiteli proton geçirgen membran elektrolizör, rüzgar türbinlerinden üretilen elektrik enerjisiyle beslenmiştir. Rüzgar türbininden üretilen elektrik enerjisinin yetersiz olduğu durumlarda ihtiyaç duyulan enerji şebekeden satın alınmıştır. Satın alınan elektrik fiyatının 0.1098 \$/kWh olduğu kabul edilmiştir. Rüzgar türbininden üretilen elektriğin maliyetinin hesaplanmasında rüzgar türbini sisteminin maliyeti ve işletme-bakım masrafları dikkate alınmıştır. Çalışmada indirim oranı % 8 olarak kabul edilmiş, bu oran %8 ile % 11 arasında değiştirilerek birim elektrik enerjisi ve hidrojen üretim maliyeti üzerindeki etkisi

incelenmiştir. Rüzgar türbini spesifik maliyeti 700 \$/kW ve 1000 \$/kW alınarak bu maliyetlere göre elektrik enerjisi ve hidrojen maliyeti hesaplanmıştır. Çizelge 4.9 ve 4.10’da türbin spesifik maliyetinin 700 ve 1000 \$/kW olması durumunda birim elektrik enerjisi maliyeti görülmektedir. İndirim oranı % 8 ve türbin spesifik maliyeti 700 \$/kW olduğunda 250 kW gücündeki rüzgar türbininden üretilen elektriğin maliyeti 0.0621\$/kWh olarak, 1000 kW gücündeki rüzgar türbininden üretilen elektriğin maliyeti 0.0321\$/kWh olarak hesaplanmıştır. İndirim oranı % 8 ve türbin spesifik maliyeti 1000 \$/kW olduğunda 250 kW gücündeki rüzgar türbininden üretilen elektriğin maliyeti 0.0709\$/kWh olarak, 1000 kW gücündeki rüzgar türbininden üretilen elektriğin maliyeti 0.0413\$/kWh olarak hesaplanmıştır.

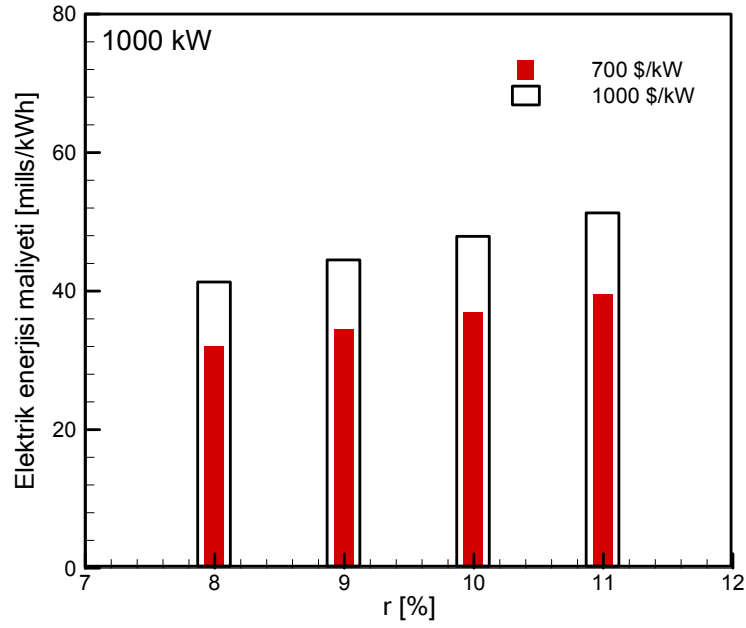
Çizelge 4.9.Birim elektrik enerjisi maliyeti [\$/kWh] -700 \$/kW

Rüzgar Türbini	r (indirim oranı %)			
	8	9	10	11
250 kW	0.0621	0.0655	0.0689	0.0725
300 kW	0.0514	0.0543	0.0573	0.0604
450 kW	0.0428	0.0455	0.0483	0.0511
600 kW	0.0397	0.0424	0.0452	0.0480
800 kW	0.0351	0.0376	0.0402	0.0428
1000 kW	0.0321	0.0345	0.0370	0.0395

Çizelge 4.10.Birim elektrik enerjisi maliyeti [\$/kWh] -1000 \$/kW

Rüzgar Türbini	r (indirim oranı %)			
	8	9	10	11
250 kW	0.0709	0.0751	0.0794	0.0839
300 kW	0.0596	0.0633	0.0671	0.0710
450 kW	0.0515	0.0550	0.0586	0.0623
600 kW	0.0490	0.0525	0.0562	0.0599
800 kW	0.0443	0.0477	0.0512	0.0547
1000 kW	0.0413	0.0445	0.0479	0.0513

Şekil 4.38’de 1000 kW rüzgar türbini kullanılması durumunda birim elektrik enerjisi maliyetinin r’ye göre değişimi görülmektedir. İndirim oranı % 11 olduğunda türbin spesifik maliyetlerine göre birim elektrik enerjisi üretim maliyeti 39.5 ile 51.3 mills/kWh arasında değişmektedir.



Şekil 4.38. Elektrik enerjisi maliyetinin r'ye göre değişimi

Çizelge 4.11 ve 4.12'de türbin spesifik maliyetinin 700 ve 1000 \$/kW olması durumunda hidrojen maliyeti görülmektedir. İndirim oranı % 8 ve türbin spesifik maliyeti 700 \$/kW olduğunda 250 kW gücündeki rüzgar türbininin kullanıldığı hidrojen üretim sisteminden üretilen hidrojenin maliyeti 6.4271\$/kgH₂ olarak, 1000 kW gücündeki rüzgar türbininin kullanıldığı hidrojen üretim sisteminden üretilen hidrojenin maliyeti 4.5288\$/kgH₂ olarak hesaplanmıştır. İndirim oranı % 8 ve türbin spesifik maliyeti 1000 \$/kW olduğunda 250 kW gücündeki rüzgar türbininin kullanıldığı hidrojen üretim sisteminden üretilen hidrojenin maliyeti 6.6632\$/kgH₂ olarak, 1000 kW gücündeki rüzgar türbininin kullanıldığı hidrojen üretim sisteminden üretilen hidrojenin maliyeti 4.9030\$/kgH₂ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.11. Hidrojen maliyeti [\$/kgH₂] -700 \$/kW

Rüzgar Türbini	r (indirim oranı %)			
	8	9	10	11
250 kW	6.4271	6.5668	6.7099	6.8563
300 kW	5.8152	5.9588	6.1060	6.2567
450 kW	5.3590	5.5022	5.6491	5.7994
600 kW	5.1403	5.2870	5.4375	5.5915
800 kW	4.7780	4.9252	5.0760	5.2304
1000 kW	4.5288	4.6757	4.8263	4.9805

Çizelge 4.12. Hidrojen maliyeti [$\$/\text{kgH}_2$] -1000 $\$/\text{kW}$

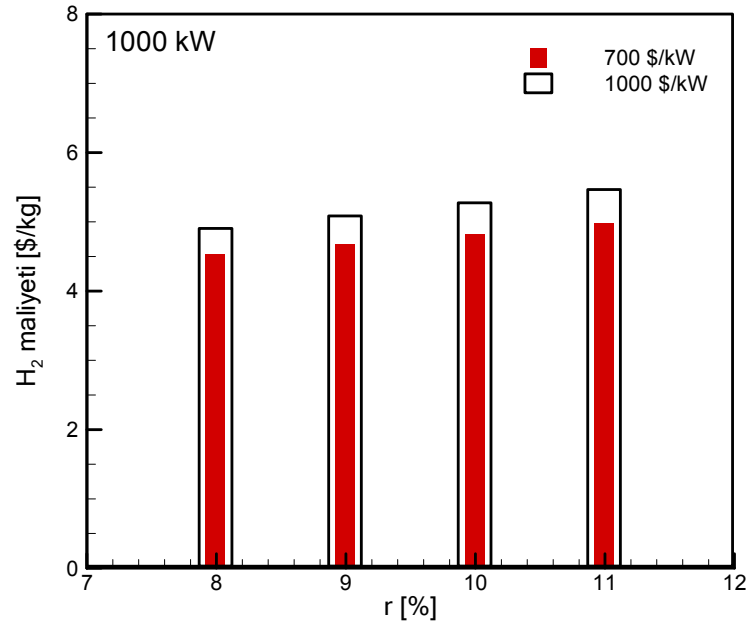
Rüzgar Türbini	r (indirim oranı %)			
	8	9	10	11
250 kW	6.6632	6.8253	6.9914	7.1614
300 kW	6.0805	6.2493	6.4224	6.5995
450 kW	5.6617	5.8337	6.0101	6.1906
600 kW	5.4788	5.6576	5.8411	6.0288
800 kW	5.1391	5.3205	5.5065	5.6969
1000 kW	4.9030	5.0854	5.2725	5.4639

Çizelge 4.13. Sistemde kullanılan elektrik enerjisinin şebekeden sağlanması durumunda hidrojen üretim maliyeti [$\$/\text{kg}$]

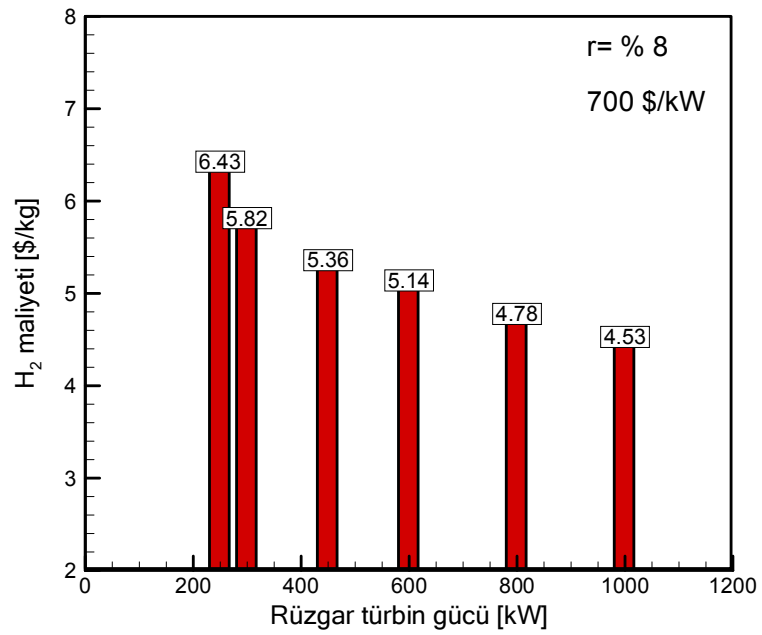
	r (indirim oranı %)			
	8	9	10	11
H ₂ Maliyeti ($\$/\text{kgH}_2$)	7.6237	7.6643	7.7058	7.7483

Çizelge 4.13'te Sistemde kullanılan elektrik enerjisinin şebekeden sağlanması durumunda hidrojen üretim maliyetinin indirim oranına göre değişimi görülmektedir. Çizelgeden görüldüğü gibi, tüm indirim oranı değerlerinde üretilen hidrojenin maliyeti rüzgar enerjisi destekli hidrojen üretim sisteminde hesaplanan üretim maliyeti değerinden daha fazladır. Şekil 4.39'de 1000 gücündeki rüzgar türbininin kullanıldığı hidrojen üretim sisteminden üretilen hidrojenin maliyetinin r'ye göre değişimi görülmektedir. İndirim oranı % 11 olduğunda türbin spesifik maliyetlerine göre hidrojen üretim maliyeti 4.9805 ile 5.4639 $\$/\text{kgH}_2$ arasında değişmektedir. Hidrojen üretim maliyeti 4.5288 $\$/\text{kgH}_2$ olarak alındığında ve 1 kg H₂ ile 96.54 km yol kat eden bir otomobil için (Honda, 2012), km başına yakıt tüketimi yaklaşık 9 kr olarak hesaplanabilir. 1 Dolar=1.89 TL olarak kabul edilmiştir.

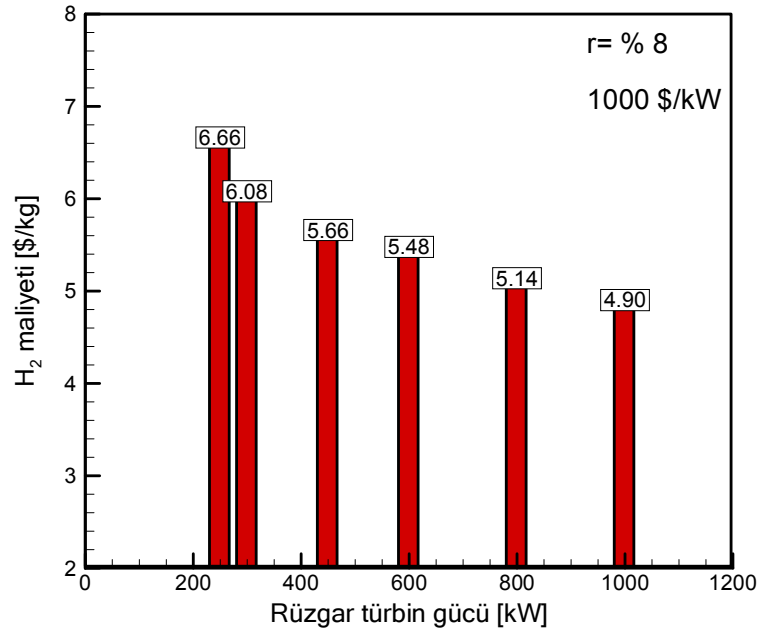
Şekil 4.40 ve 4.41'de hidrojen üretim maliyetinin rüzgar türbin gücüne göre değişimi görülmektedir. Rüzgar türbin gücü arttıkça sistemde üretilen elektrik enerjisi üretimi artmakta, elektrik enerjisi üretim maliyeti azalmaktadır. Böylece ulusal şebekeden daha az elektrik enerjisi alınmakta ve dolayısıyla hidrojen üretim maliyeti azalmaktadır.



Şekil 4.39. Elektrik enerjisi maliyetinin r'ye göre değişimi

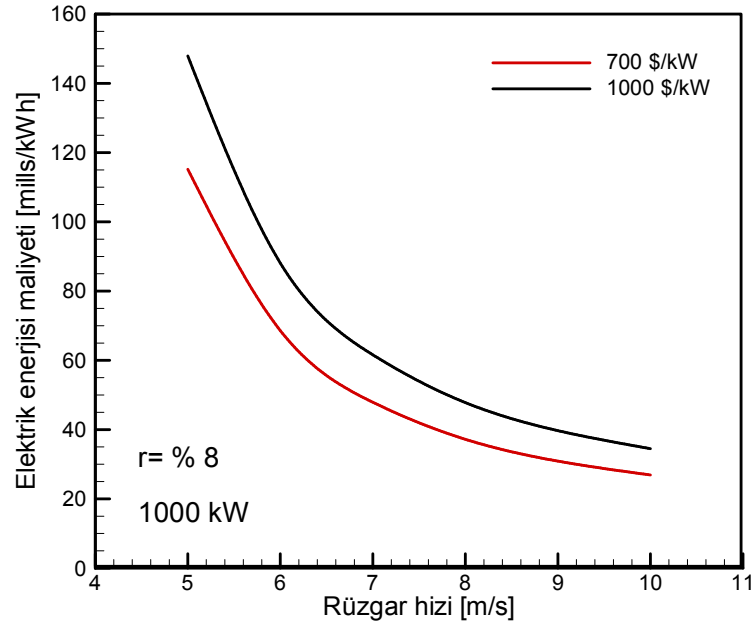


Şekil 4.40. Hidrojen üretim maliyetinin rüzgar türbin gücüne göre değişimi [$I_{RT}=700$ \$/kW]

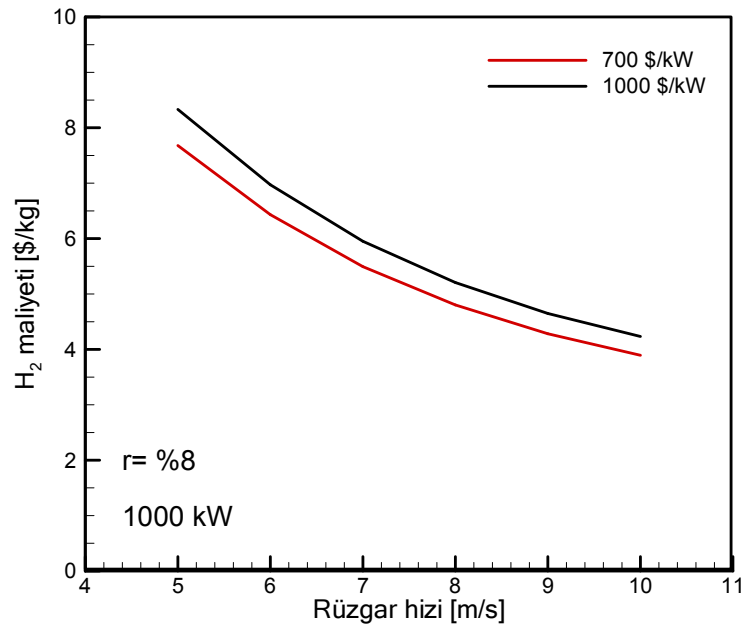


Şekil 4.41. Hidrojen üretim maliyetinin rüzgar türbin gücüne göre değişimi [$I_{RT}=1000$ \$/kW]

Rüzgar santrallerinde birim elektrik enerjisi üretim maliyetini etkileyen en önemli faktörlerden biri rüzgar hızıdır. Çünkü rüzgar hızı arttıkça üretilen elektrik enerjisi miktarı artacak aynı yatırımla daha fazla elektrik enerjisi üretilerek birim elektrik enerjisi maliyeti azalacaktır. Bu çalışmada da elektrik enerjisi ve hidrojen maliyeti üzerine rüzgar hızının etkisi % 8 indirim oranı ve farklı türbin spesifik maliyetleri için incelenmiştir. Şekil 4.42’de elektrik enerjisi maliyetinin rüzgar hızına göre değişimi görülmektedir. Türbin spesifik maliyetinin 700 \$/kW olduğu sistem ele alındığında, ortalama rüzgar hızının 5 m/s’den 10 m/s’ye artmasıyla birim elektrik enerjisi üretim maliyeti 115.2 mills/kWh’den 26.9 mills/kWh’e düşmektedir. Türbin spesifik maliyetinin 1000 \$/kW olduğu sistem ele alındığında ise, 147.9 mills/kWh’den 34.5 mills/kWh’e düşmektedir. Şekil 4.43’de hidrojen üretim maliyetinin rüzgar hızına göre değişimi görülmektedir. Türbin spesifik maliyetinin 700 \$/kW olduğu sistemde, ortalama rüzgar hızının 5 m/s’den 10 m/s’ye artmasıyla hidrojen üretim maliyeti 7.6795\$/kgH₂’den 3.8948\$/kgH₂’e düşmektedir. Türbin spesifik maliyeti 1000 \$/kW olduğunda ise, 8.3327\$/kgH₂’den 4.2339\$/kgH₂’e düşmektedir.



Şekil 4.42. Elektrik enerjisi maliyetinin rüzgar hızına göre değişimi



Şekil 4.43. Hidrojen maliyetinin rüzgar hızına göre değişimi

BÖLÜM V

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde küresel ısınma, çevre kirliliği ile ilgili endişeler, fosil yakıtların hızla tükenmesi ve giderek artan enerji gereksinimi enerji üretiminde dikkatlerin yenilenebilir enerji kaynaklarına çevrilmesine neden olmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde kullanımı en hızlı gelişen kaynak rüzgar enerjisidir. Diğer taraftan yüksek enerji içeriği, yakıt hücrelerinde kullanılabilme özelliği ve alevli yanmaya uygunluğu gibi birçok olumlu özelliği, hidrojeni karbonsuz enerji üretimine geçişte önemli bir noktaya getirmiştir. Sentetik bir yakıt olan hidrojenin çok farklı yöntemlerle üretilmektedir. Klasik üretim yöntemlerinden biri elektrolizdir.

Bu çalışmada son zamanlarda bir enerji kaynağı ve taşıyıcısı olarak giderek önem kazanan hidrojenin rüzgar enerjisi ile üretilen elektrikle beslenen proton geçirgen membran elektrolizör ile üretilmesinin tekno-ekonomik analizi yapılmıştır. Çalışmada ele alınan ve İzmir-Aliağa'ya kurulması düşünülen hidrojen üretim sistemi; rüzgar türbini, inverter, PEM elektrolizör, hidrojen tankı ve dispenserden oluşmaktadır. İzmir-Aliağa rüzgar gözlem istasyonuna ait 2010 yılı rüzgar verileri kullanılarak bu bölgenin rüzgar enerjisi potansiyeli incelenmiştir. Rüzgar karakteristikleri belirlenirken rüzgar hızları için Weibull ve Rayleigh dağılımları incelenmiş, Weibull dağılım parametreleri (k ve c) Grafik, Maksimum Olabilirlik (MLH), Standart Sapma-Ortalama Hız (SS-OH) ve Enerji Model Faktörü (EPF) yöntemleriyle ay, mevsim ve yıl bazında belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar R^2 , RMSE ve Ki-kare (χ^2) hata analizi yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen hata analizi sonuçlarına göre bir çok durum için en uygun yöntem olan Standart Sapma-Ortalama Hız Metoduna göre Weibull şekil parametresi (k) 2.13, ölçek parametresi (c) 8.80 m/s olarak ve ayrıca bölgenin güç yoğunluğu değeride 520.71 W/m^2 olarak hesaplanmıştır. Yıllık ortalama rüzgar hızının 7.79 m/s olduğu bölgede en yüksek güç yoğunluğu (Weibull dağılımına göre) 799.08 W/m^2 değeri kış mevsiminde hesaplanmıştır.

Diğer taraftan $100 \text{ kgH}_2/\text{gün}$ kapasiteli hidrojen üretim sisteminde 250 kW, 300 kW, 450 kW, 600 kW, 800 kW ve 1000 kW gücündeki 6 farklı rüzgar türbini ayrı ayrı

değerlendirilerek ve Bir Değere Getirilmiş Maliyet Metodu kullanılarak birim elektrik enerjisi ve hidrojen üretim maliyeti hesaplanmıştır. Günlük 100 kg H₂ üretme kapasitesine sahip sistemin 1000 kW gücündeki rüzgar türbini ile çalıştırılması durumunda en düşük hidrojen maliyeti 4.5288 \$/kgH₂ olarak birim elektrik enerjisi maliyeti ise 0.0321 \$/kWh olarak hesaplanmıştır. Gerek elektrik üretiminde gerekse hidrojen üretiminde çevresel endişeler değerlendirildiğinde bu çalışmada yapılan ekonomik kabuller altında araştırılan bölgede ekonomik olarak elektrik enerjisi ve hidrojen üretilebileceği görülmektedir.

Bir çok otomobil firması önümüzdeki yıllarda hidrojenle çalışan araçlarını piyasaya süreceklərini duyurmuşlardır. Bu nedenle Amerika'da ve Avrupa'da bir çok ülkede hidrojen dolum istasyonlarının sayısı giderek artmaktadır. Hidrojenin doğaya zarar vermeyen yollarla üretilmesi çok önemlidir. Bu noktada rüzgar enerjisi çok önemli bir yere sahiptir. Rüzgar enerjisi potansiyeli oldukça fazla olan ülkemizde rüzgar enerjisi kaynaklı hidrojen üretim sistemleri kurulmalıdır. Rüzgar enerjisi bölge-esaslı bir kaynak olduğu için potansiyel bulunan tüm alanlarda teknik ve ekonomik analiz yapılmalıdır. Ayrıca güneş enerjili hibrit sistemlerde düşünölmeli ve bu konuda çalışmalar yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

Adaramola, M.S., Paul, S.S. and Oyedepo, S.O., “Assessment of electricity generation and energy cost of wind energy conversion systems in north-central Nigeria”, *Energy Conversion and Management* 52, 3363–3368, 2011.

Aguado, M., Ayerbe, E., Azca´rate, C., Blanco, R., Garde, R., Mallor, F. and Rivas, D.M., “Economical assessment of a wind–hydrogen energy system using WindHyGen software”, *International Journal of Hydrogen Energy* 34, 2845–2854, 2009.

Ahmed, A.S., “Analysis of electrical power form the wind farm sitting on the Nile River of Aswan, Egypt”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 1637–1645, 2011.

Akdağ S.A., Rüzgar Enerjisi Potansiyeli ve Ekonomik Analizinde Weibull Dağılımının Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, s.42, 2008.

Akdag, S.A. and Guler, O., “Evaluation of wind energy investment interest and electricity generation cost analysis for Turkey”, *Applied Energy* 87, 2574–2580, 2010.

Akkaya, S. Yenilenebilir enerji kaynaklarının türkiye açısından önemi ve bir rüzgar enerjisi uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, s. 1-2, 2007.

Akpınar, S. and Kavak Akpınar, E., “Estimation of wind energy potential using finite mixture distribution models”, *Energy Conversion and Management* 50, 877–884, 2009.

Aybers, N., Sahin, B. Enerji Maliyeti, *Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası*, 1995.

Bagiorgas, H.S., Assimakopoulos, M.N., Theoharopoulos, D., Matthopoulos, D. and Mihalakakou, G.K., “Electricity generation using wind energy conversion systems in the area of Western Greece” *Energy Conversion and Management* 48(5), 1640–1655, 2007.

Becerikli F. Yüksek Basınçlı Pem (Proton Geçirgen Membran) Elektrolizör Gelistirilmesi ve Çalışma Parametrelerinin Performansa Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, s. 12, 2011.

Bernal-Agustín, J.L. and Dufo-Lo'pez, R., “Hourly energy management for grid-connected wind–hydrogen systems”, *International Journal of Hydrogen Energy* 33, 6401–6413, 2008.

Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. and Bossanyi, E., Wind Energy Handbook, *Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.*, 2001.

Chang, T.P., “Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application”, *Applied Energy* 88, 272–282, 2011.

Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, **9. Kalkınma planı (2007-2013) enerji özel ihtisas komisyon raporu**, DPT, Ankara, s.5, 2006.

Energy Policies of IEA Countries-Turkey 2009 Review, International Energy Agency, ISBN-978-92-64-06041-8, 2009.

Freris, L., Infield, D., Renewable Energy in Power Systems, *John Wiley & Sons, Ltd.*, 2008.

FSEC, Florida Solar Energy Center, <http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/hydrogen/basics/production.htm>, 2012.

Garciaa, R.S. and Weisserb, D., “A wind–diesel system with hydrogen storage: Joint optimisation of design and dispatch”, *Renewable Energy* 31, 2296–2320, 2006.

Geer, T., Manwell, J. F. and McGowan, J. G., “A Feasibility Study of a Wind/Hydrogen System for Martha’s Vineyard, Massachusetts”, *American Wind Energy Association, Windpower 2005 Conference*, May 2005.

Global Wind Energy Council, *Global Wind Report-Annual market update 2011*, http://www.gwec.net/fileadmin/documents/NewsDocuments/Annual_report_2011_lowres.pdf, 2011.

Gökçek, M., Bayülken, A. and Bekdemir S., “Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Kırklareli, Turkey”, *Renewable Energy* 32, 1739–1752, 2007a.

Gökçek M., Erdem H.H. and Bayülken, A., “A Techno-Economical Evaluation for Installation of Suitable Wind Energy Plants in Western Marmara, Turkey”, *Energy Exploration & Exploitation* 25(6), 407–428, 2007b.

Gökçek, M., Metan ve metan-hidrojen karışım yakıtlarının kullanıldığı gaz türbinlerinde yanmanın ve azotoksit oluşumunun modellenmesi, Doktora Tezi, *Y.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, s.1-2, 2008.

Gökçek, M., “Hydrogen generation from small-scale wind-powered electrolysis system in different power matching modes” *International Journal of Hydrogen Energy* 35, 10050-10059, 2010a.

Gökçek, M., Developing Wind Energy in Turkey, Paths to Sustainable Energy, Jatin Nathwani and Artie Ng (Ed.), ISBN: 978-953-307-401-6, *InTech*, 2010b.

Greiner, C.J., Korpås, M. and Holen, A.T., “A Norwegian case study on the production of hydrogen from wind power”, *International Journal of Hydrogen Energy* 32, 1500–1507, 2007.

Gsänger, S. and Pitteloud, J., World Wind Energy Association (WWEA), 2011 Report, May 2012.

Hamane, L.A., Belhamel, M., Benyoucef, B. and Hamane, M., “Feasibility study of hydrogen production from wind power in the region of Ghardaia”, *International Journal of Hydrogen Energy* 34, 4947–4952, 2009.

Hidronerji, <http://www.hidronerji.com.tr/detay.aspx?face=e&do=12>, 2012.

Holmes, J.D., Wind Loading of Structures, *Taylor & Francis*, ISBN-13: 978-0419246107, 2001.

Honda, <http://automobiles.honda.com/fcx-clarity/specifications.aspx>, 2012.

Islam, M.R., Saidur, R. and Rahim, N.A., “Assessment of wind energy potentiality at Kudat and Labuan, Malaysia using Weibull distribution function”, *Energy* 36, 985-992, 2011.

INL, Idaho National Laboratory, <https://inlportal.inl.gov/portal/server.pt/community/home/255>, 2012.

Johnson, G.L., Wind Energy Systems, Prentice Hall, ISBN: 978-0139577543, 1985.

Justus, C.G. and Mikhail, A. “Height variation of wind speed and wind distribution statistics”, *Geophys Res Lett* 3, 261–264, 1976.

Keyhani, A., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Khanali, M. and Abbaszadeh R., “An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran”, *Energy* 35, 188–201, 2010.

Khan, M.J. and Iqbal, M.T., “Analysis of a small wind-hydrogen stand-alone hybrid energy system”, *Applied Energy* 86, 2429–2442, 2009.

Koç, M.Ü., Yenilenebilir enerji kaynaklarının türkiye’de yaz kış klimasında uygulama alanlarının belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, s.3-5, 2002.

Korpas, M. and Greiner C.J., “Opportunities for hydrogen production in connection with wind power in weak grids”, *Renewable Energy* 33, 1199–1208, 2008.

Lee, J.Y., An, S., Cha, K. and Hur, T., “Life cycle environmental and economic analyses of a hydrogen station with wind energy”, *International Journal of Hydrogen Energy* 35, 2213–2225, 2010.

Li, C.H., Zhu, X.J., Cao, G.Y., Sui, S. and Hu, M.R., “Dynamic modeling and sizing optimization of stand-alone photovoltaic power systems using hybrid energy storage technology”, *Renewable Energy* 34, 815–826, 2009.

Lu, L., Yang, H. and Burnet, J., “Investigation on wind power potential on Hong Kong islands—an analysis of wind power and wind turbine characteristics”, *Renewable Energy* 27, 1–12, 2002.

Mantz, R.J. and De Battista, H., “Hydrogen production from idle generation capacity of wind turbines”, *International Journal of Hydrogen Energy* 33, 4291-4300, 2008.

Mathur, J., Agarwal, N., Swaroop, R. and Shah, N., “Economics of producing hydrogen as transportation fuel using offshore wind energy systems”, *Energy Policy* 36, 1212–1222, 2008.

Nouni, M.R., Mullick, S.C. and Kandpal, T.C., “Techno-economics of small wind electric generator projects for decentralized power supply in India”, *Energy Policy* 35, 2491–2506, 2007.

Ohunakin, S.O., Ojolo, S.J., Ogunsina, S.B. and Dinrifo, R.R., “Analysis of cost estimation and wind energy evaluation using wind energy conversion systems (WECS) for electricity generation in six selected high altitude locations in Nigeria”, *Energy Policy*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.05.064>, 2012.

Ohunakin, O.S., “Assessment of wind energy resources for electricity generation using WECS in North-Central region, Nigeria”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 1968–1976, 2011.

Oi, T. and Wada, K., “Feasibility study on hydrogen refueling infrastructure for fuel cell vehicles using the off-peak power in Japan”, *International Journal of Hydrogen Energy* 29, 347 – 354, 2004.

Ouammia, A., Dagdougui, H., Sacile, R. and Mimet, A., “Monthly and seasonal assessment of wind energy characteristics at four monitored locations in Liguria region (Italy)”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 1959–1968, 2010.

Patel, M.R., Wind and Solar Power Systems Design, Analysis, and Operation, Second Edition, *CRC Press*, ISBN: 978-0-8493-1570-1, 2005.

Rocha, P.A.C., Coelho de Sousa R., Freitas de Andrade C. and Vieira da Silva M.E, “Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil”, *Applied Energy* 89, 395–400, 2012.

Sawin, J., *Renewables 2011 global status report*, REN21.Paris, 2011.

Sathyajith, M., Wind energy fundamentals, resource analysis and economics, *Berlin Heidelberg: Springer-Verlag*, 2006.

Shakya, B.D., Aye, L. and Musgrave, P., “Technical feasibility and financial analysis of hybrid wind–photovoltaic system with hydrogen storage for Cooma”, *International Journal of Hydrogen Energy* 30, 9–20, 2005.

Sherif, S.A., Barbir F. and Veziroglu, T.N. Wind energy and the hydrogen economy—review of the technology, *Solar Energy* 78, 647–660, 2005.

Sopian, K., Ibrahim, M.Z., Wan Daud, W.R., Othman, M.Y., Yatim, B. and Amin, N., “Performance of a PV–wind hybrid system for hydrogen production”, *Renewable Energy* 34, 1973–1978, 2009.

Streicher, M., Wiese, W. and Kaltschmitt, A., Renewable Energy-Technology, Economics and Environment, XXXII, *Springer*, 2007.

Şenaktaş B., Hidrojen Enerjisi, Üretimi ve Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, s. 28-63, 2005.

TBMM, Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanımına ilişkin kanunda değişiklik yapılmasına dair kanun, <http://www.tbmm.gov.tr/kanunlar/k6094.html>, 2010.

Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, *Türkiye rüzgar enerjisi istatistik raporu*, <http://www.tureb.com.tr>, Şubat 2012.

Twidell, J. and Weir, T., Renewable Energy Resources, Second edition, *Taylor and Francis*, 2006.

Ulleberg, Ø., Nakken, T. and Ete', A., “The wind/hydrogen demonstration system at Utsira in Norway: Evaluation of system performance using operational data and updated hydrogen energy system modeling tools”, *International Journal of Hydrogen Energy* 35, 1841– 1852, 2010.

Veziroğlu T.N. and Barbir F., Hydrogen energy technologies, Emerging Technology Series, UNIDO, Viena, 1998.

World Energy Outlook, International Energy Agency, ISBN: 978 92 64 08624 1, 2011.

World Energy Outlook, International Energy Agency, ISBN: 978 92 64 08624 1, 2010.

Yıldız, T., Türkiye enerji politikalarımız, http://www.enerji.gov.tr/yayinlar_raporlar, Kasım 2011.

Zhou, J., Erdem, E., Li, G. and Jing S., “Comprehensive evaluation of wind speed distribution models: A case study for North Dakota sites”, *Energy Conversion and Management* 51, 1449–1458, 2010.

Zhou, W., Yang, H. and Fang, Z., “Wind power potential and characteristics analysis of the Pearl River Delta Region”, *Renewable Energy* 31, 739–753, 2006.

ÖZ GEÇMİŞ

Hakan Uçar 02.06.1976 tarihinde Kütahya’ da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Niğde Ulukışla’da, lise öğrenimini ise Ankara’da tamamlamıştır. 2000 yılında Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2000-2007 yılları arasında özel sektörde çalışmıştır. 2007 yılından beri Niğde Belediyesinde görev yapmaktadır.