

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR KARAKTERİSTİĞİ VE ENERJİSİNE
ETKİ EDEN FAKTÖRLERİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Polat YETER**

Anabilim Dalı : Enerji Bilim ve Teknoloji

Programı : Enerji Bilim ve Teknoloji

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Önder GÜLER

OCAK 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR KARAKTERİSTİĞİ VE ENERJİSİNE
ETKİ EDEN FAKTÖRLERİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Polat YETER
(301081025)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Aralık 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Ocak 2011

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Önder GÜLER (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Güven KÖMÜRGÖZ (İTÜ)**

OCAK 2011

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasında, değerli vaktini ayırarak çalışmamı yönlendiren ve tecrübelerini aktaran danışmanım Doç. Dr. Sayın Önder Güler' e, karşılaştığım bir takım problemleri aşmam konusunda yardımlarını esirgemeyen ve tezi zamanında bitirebilmem için beni sürekli teşvik eden Araş. Gör. Seyit A. AKDAĞ'a ve en sıkıntılı anlarımda benden desteklerini esirgemeyen sevgili çalışma arkadaşlarıma özel teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bütün eğitim hayatım boyunca yanımda olan ve desteklerini bir an eksik etmeyen değerli aileme ayrıca teşekkür ederim.

Aralık 2010

Polat YETER

Makina Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ŞEKİL LİSTESİ	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. RÜZGAR.....	7
2.1 Küresel Rüzgarlar	11
2.2 Sürekli Rüzgar Tipleri	13
2.2.1 Alizeler	13
2.2.2 Batı rüzgarları	13
2.2.3 Kutup rüzgarları	13
2.3 Mevsimsel rüzgarlar	14
2.3.1 Muson rüzgarları	14
2.4 Yerel Rüzgarlar.....	14
2.4.1 Kara ve deniz meltemleri	14
2.4.2 Dağ ve vadi rüzgarları	15
3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ	17
3.1 Düşey eksenli rüzgar türbinleri.....	17
3.2 Yatay eksenli rüzgar türbinleri	18
3.3 Rüzgar Türbini Elemanları	19
3.4 Güç Kontrolü Sistemi	22
3.4.1 Stall kontrollü türbinler	23
3.4.2 Pitch kontrollü türbinler	24
3.4.3 Aktif stall kontrollü türbinler	25
4. RÜZGAR ENERJİSİ SANTRALİ PROJELENDİRİLMESİ VE	
KURULUMDA İZLENECEK YOLLAR	27
4.1 Rüzgar Enerjisi Santrali Proje Uygulaması.....	30
4.1.1 Uygun rüzgar türbini modelinin seçilmesi	30
4.1.2 İnşaat işleri	30
4.1.3 Nakliye işleri	32
4.1.4 Montaj işleri	33
4.1.5 Elektrik işleri	34
4.1.6 Devreye alma ve testler	34
5. RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİNİN HESAPLANMASI	37
5.1 Temel Denklemler	37
5.2 Rüzgar Güç Profili Kanunu	40
5.3 Rayleigh Dağılım Fonksiyonu.....	41
5.4 Weibull Dağılımı	42
6. RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİNDE GÖZ	
ÖNÜNDE BULUNDURULMASI GEREKEN FAKTÖRLER.....	45

6.1 Yunak Bölgesinin Profili	45
6.2 Rüzgar Hızı Persistansının Hesaplanması	49
6.2.1 Hız süreklilik eğrileri	50
6.2.1.1 Teorik ideal hız süreklilik eğrileri	50
6.2.2 Yunak bölgesi için rüzgar hızı persistansının belirlenmesi	51
6.3 Hava Yoğunluğu Değişiminin Rüzgar Enerjisi Üretimine Olan Etkisi	54
6.4 Rüzgar Enerjisi Üretimine Etki Eden Diğer Faktörler	73
6.4.1 Şiddetli yağmur	73
6.4.2 Dolu	74
6.4.3 Buzlanma	74
6.4.4 Yıldırım çarpmaları	74
6.4.5 Kar	75
6.4.6 Yüksek sıcaklık	75
6.5 Tahmin Edilen Enerji Üretim Değeriyle Gerçekleşen Üretim Değerlerinin Karşılaştırılması	76
7. SONUÇLAR.....	81
KAYNAKLAR.....	83
ÖZGEÇMİŞ	87

KISALTMALAR

DMİ	:Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü
RES	:Rüzgar Enerjisi Santrali
EPDK	:Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
TEİAŞ	:Türkiye Elektrik İletim A.Ş
EİE	:Elektrik İşleri Etüt İdaresi
TEDAŞ	:Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş
HSE	:Hız Süreklilik Eğrileri
THSE	:Teorik Hız Süreklilik Eğrileri

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1: Seçilmiş yenilenebilir enerji (YE) göstergeleri (2007-2009) [11].....	4
Çizelge 2.1: Atmosferik hareketlerin zaman ve alan ölçeği [24].....	10
Çizelge 2.2: Enlemlere göre hakim rüzgar yönü (Türksoy, 2001).....	11
Çizelge 5.1: Yüzey farklılıklarının rüzgar hızına etkisi.....	41
Çizelge 6.1: 1986 – 2007 yıllarına ait ortalama sıcaklık, hava yoğunluğu ve rüzgar hızı değerleri.....	46
Çizelge 6.2: Bir rüzgar türbinine ait güç eğrisi.....	55
Çizelge 6.3: 1986 – 2007 yılları GE 2,5MW xle' ye ait yıllık üretim ve kapasite faktörü değerleri.....	60
Çizelge 6.5: Yunak, 1997-2007 yılları DMİ verilerine dayanan istatistik veriler.	70
Çizelge 6.6: Yunak, 1997 - 2007 yılları stokastik potansiyel rüzgar gücü hesabı.....	72
Çizelge 6.7: Yunak, 1997 - 2007 yılları stokastik potansiyel rüzgar gücü hesap sonuçları.....	72
Çizelge 6.8: 2000 – 2003 yıllarına ait Bahçe ortalama sıcaklık, hava yoğunluğu ve rüzgar hızı değerleri.....	76

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: 1973-2008 yılları arası dünyada tüketilen enerji miktarının kaynak türlerine göre değişimi [3].	2
Şekil 1.2: Dünya ve Türkiye’de kişi başı enerji tüketiminin tarihsel değişimi[4].	2
Şekil 1.3: 2030 yılı için dünyada tüketilen enerji miktarının kaynak türlerine göre değişimi, iki farklı senaryo[3].	3
Şekil 2.1: Yüzeğe yakın rüzgar hızlarının şematik spektrumu. Van der Hoven (1957). S(n) spektral güç yoğunluğu [25].	8
Şekil 2.2: Atmosferdeki hareketlerin zamansal ve alansal ölçekleri [25].	9
Şekil 2.3: Genel sirkülasyonun şematik resmi.	12
Şekil 2.4: Vadi ve dağ rüzgarları [27].	16
Şekil 3.1: Dikey eksenli bir rüzgar türbini.	18
Şekil 3.2: Rüzgar türbini türleri.	19
Şekil 3.3: Rüzgar türbini elemanları ve yerleri.	20
Şekil 3.4: Stall kontrollü türbine ait güç eğrisi [33].	24
Şekil 3.5: Pitch kontrollü türbine ait güç eğrisi [34].	24
Şekil 3.6: Aktif stall ve aktif pitch kontrolü için pala dönüş yönleri.	25
Şekil 3.7: Aktif stall ve aktif pitch kontrollü türbinlerde güç kontrolü için gerekli pala döndürme açılarının kıyaslaması [30].	26
Şekil 4.1: Yatırım projelerinin hazırlama safhaları [24].	27
Şekil 4.2: RES projesi yönetim aşamaları [24].	28
Şekil 4.3: RES projesi yol haritası [24].	29
Şekil 4.4: RES projesi maliyet yüzdeleri [35].	30
Şekil 4.5: Servis yolu inşaatı.	31
Şekil 4.6: Rüzgar türbini temel yapımı.	32
Şekil 4.7: RES şematik görünüm.	32
Şekil 4.8: Türbin kule montajı	33
Şekil 4.9: Türbin hub ve kanatların montajı	34
Şekil 4.10: RES projesi gelişim süreci [24].	35
Şekil 4.11: RES projesi ayrıntılı iş planı. 54 adet 2,5MW’ lık türbin için.	35
Şekil 5.1: Rüzgarın türbine girerken dağılması.	38
Şekil 5.2: Betz limitinin değişimi	40
Şekil 5.3: Bir rüzgar türbinin güç ve c_p eğrisi.	40
Şekil 5.4: Yüzeğe farklılıklarının rüzgar hızına etkisi [25]	41
Şekil 6.1: Konya, Yunak bölgesi.	46
Şekil 6.2: Yunak bölgesi 1986-2007 ortalama yıllık rüzgar hızları.	47
Şekil 6.3: Yunak bölgesi 1986-2007 yılları ortalama aylık rüzgar hızları.	47
Şekil 6.4: Yunak bölgesi 1986-2007 yılları ortalama mevsimsel rüzgar hızları.	48
Şekil 6.5: Yunak bölgesi 1986-2007 yıllık ortalama sıcaklık ve hava yoğunluğu değişimi.	48
Şekil 6.6: Yunak bölgesi 10 m, 80 m ve 100 m için HSE’ si (1986 - 2007).	52

Şekil 6.7: Yunak bölgesi 80 m ve 100 m için farklı katsayılarla elde edilen HSE' si (1986 - 2007).	53
Şekil 6.8: Yüksekliğe göre hava yoğunluğu değişimi.....	54
Şekil 6.9: GE 2,5 xle ve GE 1,5 sle $1,09 \text{ kg/m}^3$ için güç eğrileri.....	56
Şekil 6.10: 1986- 2007 yılları GE 2,5 MW xle ve GE 1,5 MW sle' ye ait ortalama yıllık üretim değerleri ($\alpha=0,25$).	59
Şekil 6.11: 1986 - 2007 yılları, GE 2,5 MW xle (100 m) ve GE 1,5 MW sle' ye (80 m) ait yıllık kapasite faktörleri ($\alpha=0,25$).	62
Şekil 6.12: Farklı Helmann katsayısı kullanılarak elde edilen üretim değerleri (GE 2,5MW).....	63
Şekil 6.13: 1986 yılı tahmin edilen üretim değerine göre yıllık enerji üretim farkları (100 metre, $\rho= 1,09 \text{ kg/m}^3$, $\alpha=0,20$).	64
Şekil 6.14: Maksimum üretim değerine göre yıllık enerji üretim farkları (GE 2,5MW, 100 metre, $\rho= 1,09 \text{ kg/m}^3$, $\alpha=0,20$).	65
Şekil 6.15: Minimum üretim değerine göre yıllık enerji üretim farkları (GE 2,5MW, 100 metre, $\rho= 1,09 \text{ kg/m}^3$, $\alpha=0,20$).	66
Şekil 6.16: 1986–1990 yılları ortalama üretim değerine göre yıllık enerji üretim farkları (GE 2,5MW, 100 metre, $\rho= 1,09 \text{ kg/m}^3$, $\alpha=0,20$).....	67
Şekil 6.17: Yunak bölgesi 1997 – 2007 yılları potansiyel rüzgar gücü sonuçları.....	71
Şekil 6.18: Bir türbinin güç eğrisine yağmurun etkisi [14].....	73
Şekil 6.19: Kanatta buzlanma sonucu oluşan sarkıklar.....	74
Şekil 6.20: Yıldırım çarpmış bir kanat.....	75
Şekil 6.21: Osmaniye, Bahçe bölgesi.....	77
Şekil 6.22: T1 rüzgar türbini ve B1 ölçüm direği yerleşimi.	77
Şekil 6.23: T1 rüzgar türbininden ve B1 ölçüm direğinden alınan rüzgar verileri. ..	78
Şekil 6.24: T1 rüzgar türbini ve B1 ölçüm direğinden alınan rüzgar hızlarına göre üretim değerleri ve T1 türbinine ait reel üretim değeri.....	79

SEMBOL LİSTESİ

A	: Alan
a	: Rüzgar hız oranı
ρ	: Hava yoğunluğu
α	: Helmann sabiti
$\bar{\rho}$: Ortalama hava yoğunluğu
c	: Ölçek parametresi
c_ρ	: Hava yoğunluğu değişkenlik katsayısı
c_p	: Elde edilebilecek en fazla güç oranı
c_{v^3}	: Hızın kübünün değişkenlik katsayısı
E	: Rüzgar güç yoğunluğu
\bar{E}	: Ortalama rüzgar güç yoğunluğu
$E(E)$: Stokastik terminolojide ortalama rüzgar güç yoğunluğu
$E(\rho)$: Stokastik terminolojide ortalama hava yoğunluğu
$E(v^3)$: Stokastik terminolojide ortalama rüzgar hızı kübü
$E(P)$: Stokastik terminolojide ortalama hava basıncı
$E(T)$: Stokastik terminolojide ortalama hava sıcaklığı
e	: Hata değeri
h_a	: Türbin yüksekliği
h_b	: Rüzgar hızının ölçüldüğü yükseklik
h_r	: Rüzgarın esme saati yüzdesi
k	: Şekil parametresi
$f(v)$: v hızının Weibull olasılığı
$F(v)$: v hızının Weibull kümülatifi
$cov(\rho, v^3)$: İki bağımlı değişkenin kovaryansı
m	: Kütle
\dot{m}	: Kütleli debi
N	: Veri serisi
p	: Persistans değeri
P_t	: Rotorun rüzgardan elde ettiği güç
P_r	: Türbine giden rüzgarın gücü
r	: Çapraz korelasyon katsayısı
R	: Gaz sabiti
S_ρ	: Hava yoğunluğunun zaman serilerinin standart sapması
S_{v^3}	: Rüzgar hızı kübünün zaman serilerinin standart sapması
T	: Hava sıcaklığı
P	: Hava basıncı
T_i	: Rüzgar hızının belirli bir değere eşit ya da ondan büyük olduğu zaman yüzdesi
v	: Rüzgar hızı
v_a	: İstenilen rüzgar hızı
v_b	: Ölçülen rüzgar hızı
v_j	: Saatlik ortalama rüzgar hızı

v_{max}	: Zaman serisindeki maksimum rüzgar hızı
v_{min}	: Zaman serisindeki minimum rüzgar hızı
v_{r_i}	: Herhangi bir rüzgar hızı
$v_{r_{ort}}$: Ortalama rüzgar hızı
v_*	: Tüm periyot boyunca sabit olan rüzgar hızı
Δv	: Rüzgar hızının bölüneceği her eşit dilimin büyüklüğü
π	: pi sabiti
θ	: Heaviside adım fonksiyonu

RÜZGAR KARAKTERİSTİĞİ VE ENERJİSİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLERİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışma kapsamında, ilk olarak bir rüzgar enerjisi santrali projelendirmesi ve kurulumda izlenecek yollar anlatılmıştır. Daha sonra, Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden (DMİ) alınan Konya - Yunak bölgesine ait 1986 – 2007 yılları arasında 10 metre yükseklikte ölçülen saatlik ortalama rüzgar şiddeti, basınç ve sıcaklık verileri kullanılarak bölgenin rüzgar karakteristiği hız süreklilik eğrileri yöntemi ile incelenmiştir. Ardından ölçüm değerlerinden elde edilen ve zamanla değişim gösteren hava yoğunluğu değerleri göz önünde bulundurularak farklı yüksekliklerde bulunan iki değişik rüzgar türbini modeli için yıllık rüzgar enerjisi hesaplamaları yapılmış ve hava yoğunluğunun standart ($1,225\text{kg/m}^3$) alınması durumuyla karşılaştırılmıştır. Burada ayrıca, 10 metredeki veriler türbin göbek yüksekliğine yükseltilirken kullanılan güç profil kanunundaki Helmann katsayısı için farklı değerler kullanılarak bu katsayının hesaplamalardaki önemi irdelenmiştir.

Rüzgar gücü potansiyeli hesaplamalarında kullanılan ve literatürde geçen hava yoğunluğunun rüzgar hızına bağlı değişikliği dikkate alınarak elde edilen bir düzeltme faktörüyle yapılan hesaplama metodu da bu kapsamda incelenmiştir. Sonuçta, bu 3 farklı metodla elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Rüzgar enerjisi üretimine etkisi olan bir takım meteorolojik etkenlerden; şiddetli yağmur, kar, dolu, buzlanma, yıldırım çarpmaları ve yüksek sıcaklıklar da bu çalışmada incelenmiştir.

Daha sonra, Osmaniye – Gökçedağ' da kurulu bulunan bir santraldeki ölçüm direğinden alınan 15 günlük saatlik ortalama rüzgar verileriyle bu ölçüm direğine en yakın rüzgar türbininin üretim değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca türbin üzerinden alınan saatlik ortalama rüzgar şiddeti verileri de kullanılarak üretim değerleri hesaplanmış ve aradaki farkların nedenleri incelenmiştir.

INVESTIGATION OF THE FACTORS AFFECTING THE WIND CHARACTERISTICS AND ENERGY.

SUMMARY

In this thesis, firstly, the design procedure of a wind power plant and the road map during the installation of a wind farm has been indicated. Then, wind characteristics of Konya – Yunak region has been analysed using the wind speed duration curves method by using the hourly average wind , pressure and temperature data of State Meteorological Works General Directorate (SMW) measured in 10 meters height in between the years 1986 and 2007. Besides by the help of the data received, the average air density values which varies in time has been calculated in order to make energy production calculations for two different types of wind turbine that has different hub heights. The energy production calculations have been made for both turbines by considering the standart air density, which is (1,225kg /m³), and annual average air density value of the site. During the calculations, different values for the Helmann coefficient, which takes place in the power profile law that is to increase the wind speed values from 10 meter to hub heights, are also considered.

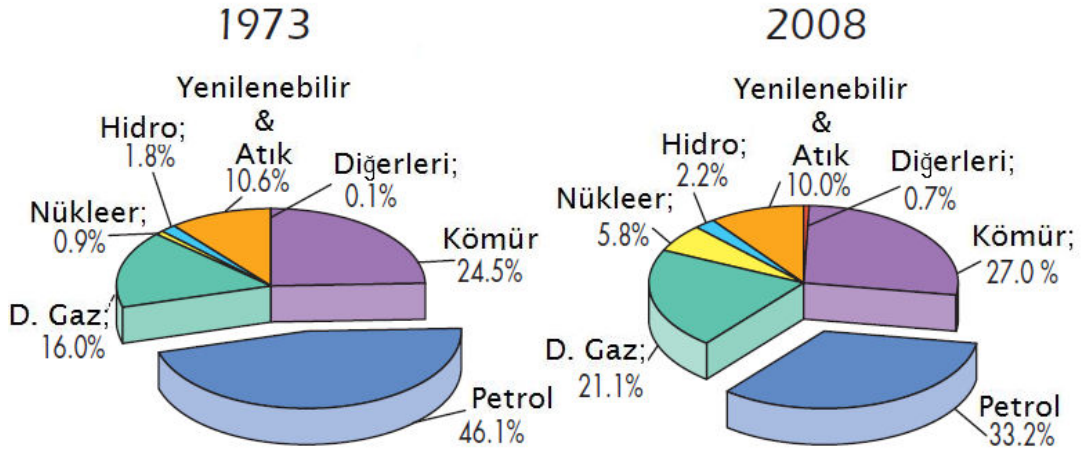
The formulation, which is used in literature that scrutinizes the variability of the air density depending on the variations of the wind speed has also been analyzed within the scope of this thesis. Eventually, the different results obtained with this three different approaches have been compared.

The factors that has affects on wind energy production; such as heavy rain, snow, hail, icing, lightning and high temperatures have been investigated within the frame of this thesis

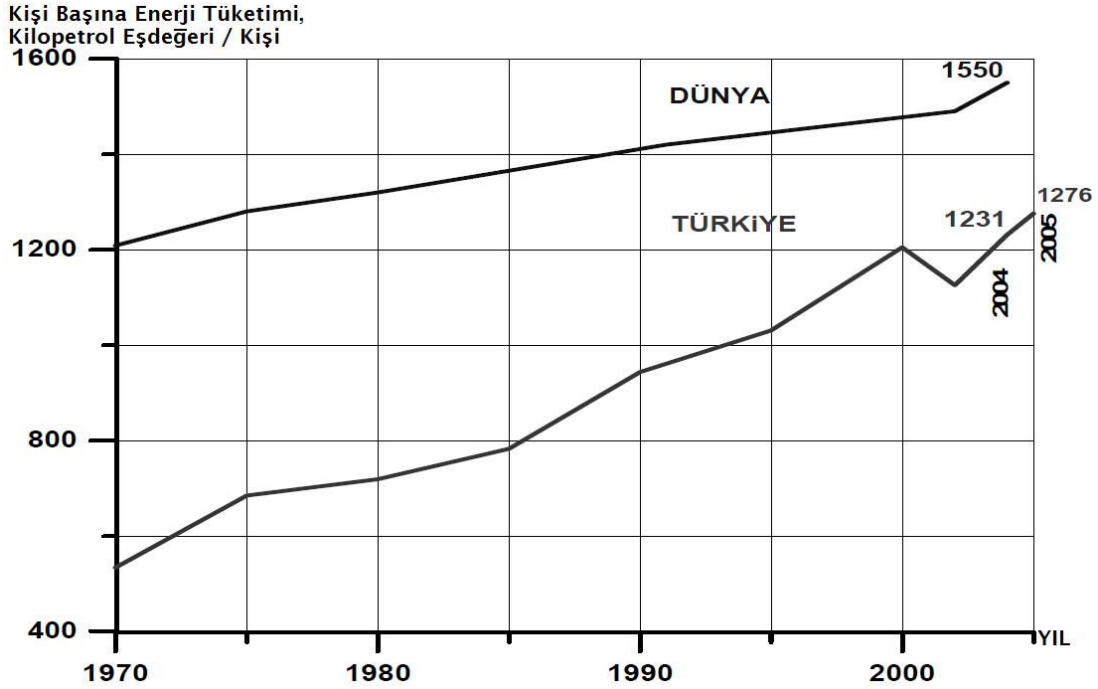
Lastly, the energy production values have been calculated using the data received from a wind farm, which is currently under operation. The hourly average wind speed data taken from both the mast and the anemometer, which is located on the wind turbine. Finally, these estimated values have been compared with the real energy production values of the wind turbine.

1. GİRİŞ

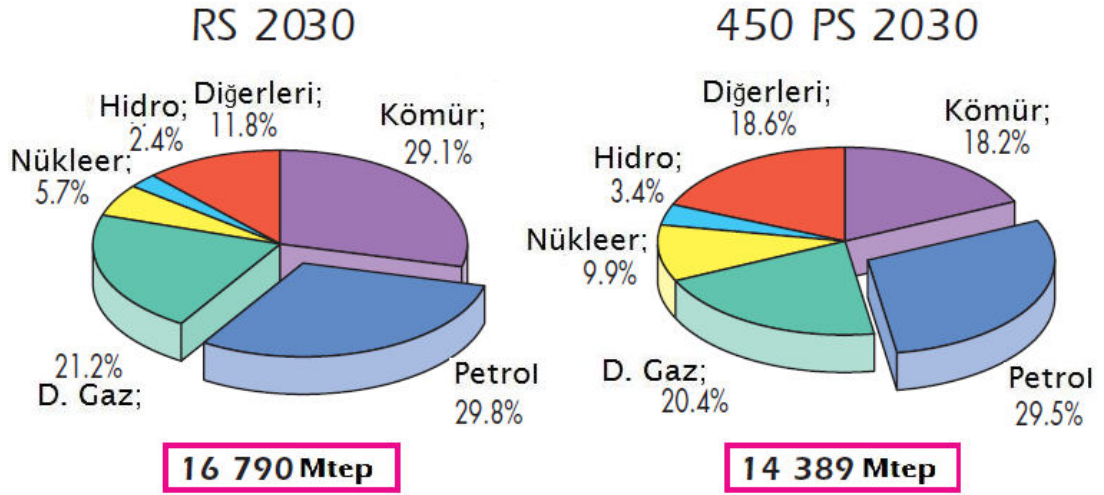
Uzun yıllardır elektrik enerjisi üretmek için kullanılan fosil yakıtlar nedeniyle büyük miktarda sera gazı salınımı atmosfere verilmiştir. Bunun sonucunda meydana gelen küresel ısınma ve küresel ısınmanın dünya üzerindeki tehlikeli etkileri, günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını kaçınılmaz hale getirmiştir [1,2]. Fosil yakıtların çevreye olan zararlarının yanında, 1970'lerde yaşanan petrol krizleri sonucunda gelişen arz güvenliği ve enerji çeşitliliği kavramları da ülkeleri yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarını kullanmaya yöneltmiştir [2]. Fosil kökenli yakıtlar yeryüzünde depo edilmiş halde bulunurlar ve belirli bir miktarlarda bulunmaktadır. Fosil yakıt rezervlerinin ömrü sınırlı olmasına karşın günümüz için fosil enerji kaynaklarının yokluğundan ya da eksikliğinden söz edilmesi mümkün değildir. Ancak enerji talebi sürekli artarken fosil rezervlerin azalması, son yıllarda petrol ve doğalgaz fiyatlarında artışa neden olmuştur. 1973 ve 2008 yılları arasında dünyada tüketilen enerji miktarının kaynak türlerine göre değişimi Şekil 1.1' de gösterilmektedir [3]. Şekil 1.2' de ise 2004 yılına kadar dünyadaki ve 2005 yılına kadar ülkemizde kişi başına tüketilen kilo petrol (kpe) enerjinin değişimi gösterilmektedir [4]. Enerji talebiyle ilgili yapılan projeksiyon çalışmaları, enerji tüketimindeki artışın sürekli olacağı doğrultusundadır. Ülkelerin gelişmişlik ve sanayileşmeleri kişi başına enerji tüketimi ve birim katma değer üretmek için harcanan enerjinin başka kavramlarla birlikte değerlendirilmesi ile ortaya çıkmaktadır [5]. Bundan ötürü, enerji kaynaklarına hakim olmak ve bunları yönetebilmek, bu kaynakları verimli şekilde kullanabilmek, gelişmişliğin ve ekonomik büyümenin sürekli olması bakımından önemlidir. Şekil 1.3' te ise 2030 yılında dünyada tüketilecek enerji miktarlarının kaynaklarına göre değişimi farklı iki senaryo için verilmektedir. Şekil 1.3' de belirtilen diğerleri kısmında yenilenebilir ve atık enerjileri tanımlamaktadır. Kısacası, sürekli artan enerji talebi, fosil esaslı kaynakların yol açtığı çevresel kirlilik ve artan enerji talebinden dolayı sürekli yükselen enerji maliyetleri ve ülkelerin dışa bağımlılık sorunları gibi nedenlerden dolayı alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı gün geçtikçe artmaktadır [6].



Şekil 1.1: 1973-2008 yılları arası dünyada tüketilen enerji miktarının kaynak türlerine göre değişimi [3].



Şekil 1.2: Dünya ve Türkiye’de kişi başı enerji tüketiminin tarihsel değişimi[4].



Şekil 1.3: 2030 yılı için dünyada tüketilen enerji miktarının kaynak türlerine göre değişimi, iki farklı senaryo[3].

Dünya enerji ihtiyacının giderek artması, fosil enerji kaynaklarının da hızla azalması ve bazı kaynakların tükenme noktasına yaklaşması, yeni ve alternatif enerji kaynaklarının araştırılması ve mevcut kaynaklardaki kayıp ve kaçakların ortadan kaldırılarak en verimli düzeyde kullanılmasını gerektirmektedir . Enerji kaynaklarına sahip olmak da yeterli değildir. Enerjiyi verimli kullanmak da sahip olmak kadar önemlidir [7]. Enerjinin yeterli, kaliteli, sürekli, düşük maliyetli ve çevreye uyumlu bir şekilde tüketicilerin kullanımına sunulması ekonomik dengeler ve kalkınma için olmazsa olmazlardandır [5].

Yenilenebilir enerji kaynakları, sürekli devam eden doğal süreçlerdeki varolan enerji akışından elde edilen enerjidir. Bu kaynaklar güneş, rüzgâr, hidrolik, biyokütle, dalga ve jeotermal olarak sıralanabilir [8]. Yenilenebilir enerjilerin kaynağı güneştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının iki önemli avantajı vardır. Birincisi yenilenebilir, dolayısıyla tükenmez olmaları. İkincisiyse, doğal süreçlerin parçası olmaları nedeniyle çevreye zararlı yabancı unsurlar salmamaları. Buna karşılık dezavantajları da bulunmaktadır. Coğrafi olarak her yerde bol bulunmamaları, yoğun enerji formları olmamaları nedeniyle geniş alanlardan toplanmak zorundadırlar [9]. Yenilenebilir enerji kaynakları, bugün için dünyada toplam enerji arzının %5' lik bir kısmını karşılamaktadır. Fakat bu kaynaklara geleceğin enerji kaynakları olarak bakılmaktadır. Sadece 2008 yılında 155,4 milyar dolar yatırım yapılan endüstrilerdeki yatırımların 2020 yılında 600 milyar dolara ulaşacağı tahmin edilmektedir [10]. Çizelge 1.1 yenilenebilir enerjilerin gelişimini çeşitli seçilmiş göstergeler üzerinden gözler önüne sermektedir [11]. Mevcut kapasitelerin ve üretim

miktarlarının artmasının yanı sıra, yenilenebilir enerji konusunda ulusal politika belirleyen ülkelerin sayısında da bir artış görülmektedir. Yenilenebilir enerji sektörü, 2008 yılında piyasalardaki büyük finansal krize rağmen büyümeye devam etmiştir ve sadece katma değer üretip temiz enerji yoluyla sürdürülebilir kalkınmaya destek olmakla kalmamakta aynı zamanda yeni istihdam alanları da yaratmaktadır [10]. Günümüzde teknolojik gelişmelere paralel olarak kullanımı en yaygın olan yenilenebilir enerji kaynaklarının başında ise rüzgar enerjisi uygulamaları gelmektedir [6]. Bu tez kapsamında da bir rüzgar enerjisi santralinin (RES) projelendirme ve kurulum aşamaları incelenmiştir.

Çizelge 1.1: Seçilmiş yenilenebilir enerji (YE) göstergeleri (2007-2009) [11].

Göstergeler	2007	2008	2009
YE için Yeni Kapasite Yatırımı (Milyar Dolar)	104	130	150
YE Kapasitesi (Giga Watt, Hidroenerji Hariç)	210	250	305
YE Kapasitesi (Giga Watt, Hidroenerji Dahil)	1085	1150	1230
Rüzgâr Gücü Kapasitesi (Giga Watt)	94	121	159
Ulusal YE Politikasına Sahip Ülke Sayısı	68	75	85
YE Üretimine Yasal Teşvik Veren Ülke Sayısı	51	64	75
YE Hedeflerini Kesin Oran Olarak Belirleyen Ülke Sayısı	50	55	56

Son yıllarda rüzgar enerjisi uygulamalarına yönelik tüm dünyada artan bir talep söz konusu olmaktadır. Bunun sonucunda da rüzgar potansiyeli ve rüzgar karakteristiği üzerine bir çok çalışma yapılmıştır ve yapılmaya devam edilmektedir. Tindal A., Harman K. ve diğerleri [12] yaptığı çalışmada rüzgar enerjisi santrallerinin kurulmasından önce tahmin edilen ortalama yıllık enerji üretimi değerleri ile santral işletmeye alındıktan sonra operasyon esnasında ölçülen değerlerle karşılaştırmıştır. ABD ve Avrupa'daki 510 rüzgar enerjisi santralinden elde eden sonuçlara göstermektedir ki; gerçekleşen yıllık üretim, inşaat öncesi yapılan projeksiyonların %93.3'ü kadardır ve alınan sonuca göre ortalama yıllık üretim değerleri fazla tahmin edilmektedir [13]. Yazarlar bu uyumsuzluğun nedenini yanlış ölçümler sonucu toplanan yetersiz ve düşük kalitedeki rüzgar verileri olarak değerlendirmektedir [12].

Rüzgar biliminde büyük ölçekli farklılıklar elverişli rüzgar kaynağı bölgelerinin belirlenmesine imkan tanır. Büyük ölçekli farklılıklar içerisinde, atmosferik sınır tabaka dahilinde rüzgar alanlarını etkileyen başlıca basınç ve sıcaklık gradyanları, yer kürenin dönmesi, yer yüzeyinin pürüzlülüğü, günlük atmosferik kararlılık durumunun seyri, sınır tabakanın derinliği, yatay hava hareketi, bulutlar, yağışlar ve

topoğrafik yapı gibi belirli meteorolojik elemanlar sayılabilir. Zaman ve konum olarak türbülans, dolu, buzlanma ve yıldırım gibi diğer atmosferik olayların da küçük ölçekte tanımlanması, rüzgar türbinlerinin işletimi, inşası, bakım-onarımı ve verilen teknoloji için optimum yerin seçilmesine yardımcı olur [14]. Buna göre, rüzgar enerjisi potansiyelinin doğru olarak belirlenebilmesi ve verimli kullanılabilmesi için göz önünde bulundurulması gereken bir takım hususlar bu çalışmada irdelenmiştir.

Bu çalışma kapsamında, rüzgar karakteristiğine ve enerjisine etki eden faktörler incelenmiştir. Bir bölgenin rüzgar karakteristiğini belirlemede önemli bir husus olan rüzgar hızı persistansıdır. Persistans bir bölgedeki rüzgar hızının sürekliliğini gösteren bir değerdir ve bir çok farklı yöntemle hesaplanabilmektedir. Bu metodlardan bazılarında Kasım K. Tarafından irdelenmiştir [15,16]. Bu yöntemler oto-korelasyon fonksiyonu yaklaşımı, bağıl olasılık fonksiyonu, lambert yöntemi, weibull dağılımı ve rüzgar hızı süreklilik eğrileri olarak sıralamak mümkündür. Ahmed H.K. ve Abouzeid M. yaptıkları çalışmada, bir bölgenin potansiyel rüzgar analizi yapılırken hız süreklilik eğrilerinin önemine değinmişlerdir[17]. Koçak, sıralanan metodlar içinden en pratiğini rüzgar hızı süreklilik eğrileri yöntemi olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada da rüzgar karakteristiği incelemelerinde bu yöntem kullanılmıştır.

Şen, yaptığı çalışmada rüzgar enerjisinin basit formülasyonunu mutlak sıcaklık, basınç ve rüzgar hızı türünden sunmuştur [18]. Yine Şen tarafından yapılan diğer çalışmada, sadece rüzgar hızındaki stokastik değişkenlikleri değil pratik uygulamalarda sabit alınan hava yoğunluğunu da göz önüne almaktadır ve önerdiği formülasyon ile hava yoğunluğunun rüzgar hızına bağımlı değişikliği de dikkate alınmaktadır [19]. Bilindiği gibi, standart atmosfer koşullarında, yani deniz seviyesinde ve hava sıcaklığı 15°C iken ortalama hava yoğunluğu $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ tür. Ancak hava yoğunluğunun sıcaklık, yükseklik ve rüzgar hızına da bağılı bir değişken olduğu da bilinmektedir. Yine Shata ve Hanitsch (2005) yaptıkları çalışma ile hava yoğunluğunun standart alınmadığı zaman elde edilebilir rüzgar enerjisi hesabında ortaya çıkan farklılıkları göstermiştir [20]. Reed'e (1979) göre deniz seviyesinden yüksekte bulunan istasyonlarda deniz seviyesindeki ortalama hava yoğunluğu değeri ile yapılan hesaplamalar, kullanılabilir rüzgar enerjisinin yaklaşık %30 oranında fazla tahmin edilmesine neden olmaktadır [19,21,22]. Bunun nedeni

hava yoğunluğunun sıcaklığa ve yüksekliğe bağlı değişmesidir. Bu çalışmada da rüzgar enerjisi denkleminde bulunan hava yoğunluğunun, standart hava yoğunluğu, ortalama hava yoğunluğu ve hava yoğunluğunun rüzgar hızına bağlı bir değişken olduğu göz önüne alındığı durumlar için rüzgar gücü potansiyeline yaptığı etki incelenmiştir. Ayrıca bu çalışmada, bir ölçüm direğinden alınan rüzgar şiddeti verilerinin türbin yüksekliğine yksektirmesinde kullanılan rüzgar güç profili kanununda bulunan Helmann katsayısına değişik değerler verilerek bu katsayısının önemi irdelenmiştir.

Rüzgar enerjisi üretimini etkileyen şiddetli yağmur, dolu, buzlanma, yıldırım çarpmaları, kar ve yüksek sıcaklıklar gibi bir takım meteorolojik faktörler de bu kapsamda incelenmiştir.

2. RÜZGAR

Dünyayı büyük bir ısı makinasına benzetmek mümkündür. Dünya, güneş gibi yüksek sıcaklıktaki bir rezervuardan ısıyı çeker ve daha düşük sıcaklıkta olan bir başka rezervuara yani uzaya iletir. Güneşten gelen enerjinin yaklaşık %1-2'si rüzgar enerjisine dönüşür. Bu proseste iş atmosferdeki gazlar aracılığıyla yapılmakta ve yer küre-atmosfer sınırının üzerinde gerçekleşmektedir. Karalar, denizler ve atmosfer farklı özgül ısılarına sahip oldukları için, güneşten alınan enerji sonrasında farklı ısılarına dolayısıyla farklı sıcaklıklara sahip olurlar. Sıcaklık dağılımı, coğrafik ve çevresel koşullara bağlıdır. Yer kürede ortaya çıkan sıcaklık ve buna bağlı basınç farklılıkları, rüzgarın oluşmasına neden olmaktadır. Yüksek basınç alanından alçak basınç alanlarına doğru hareket eden hava, rüzgar olarak adlandırılmaktadır. Yeryüzünde oluşan hava kütlesi hareketleri, yerin dönmesinden kaynaklanan “ Coriolis “ kuvvetten ve yeryüzü ile akışkan hava kütlesi arasındaki sürtünme kuvvetinden etkilenirler [23].

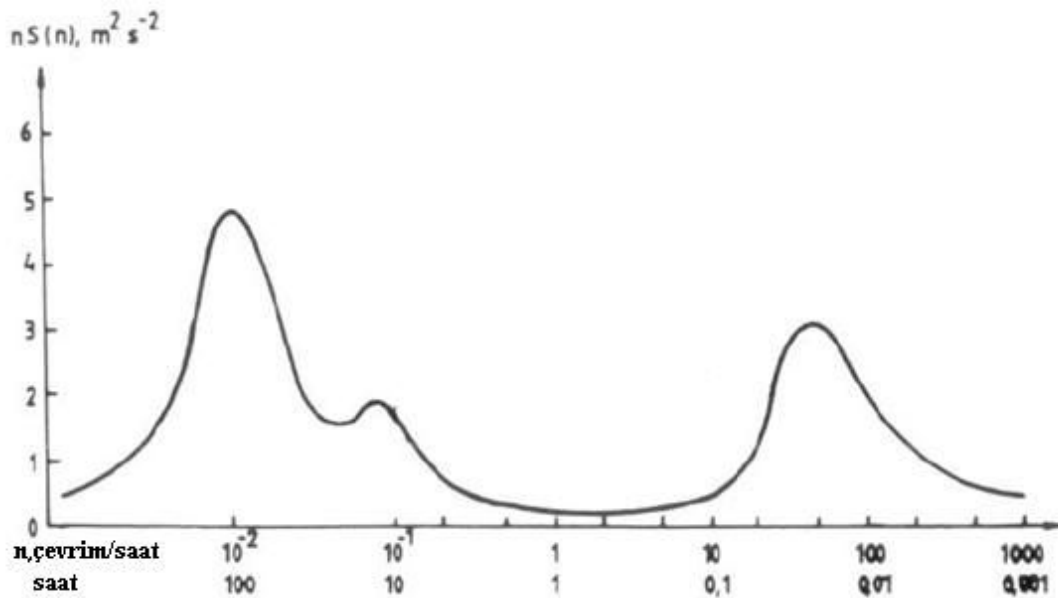
Kısacası, rüzgar enerjisinin kaynağı güneştir ver yer yüzünün eşit olmayan ısınması ve soğuması sonucu ortaya çıkan kuvvetlerin etkisi ile oluşan hava hareketidir. Yani, farklı sıcaklık dağılımlarının yarattığı fiziksel olaylar rüzgar oluşumuna neden olur. Farklı sıcaklık dağılımını ise, enlem, kara-deniz, yükseklik ve mevsimler etkilemektedir. Meteorolojik açıdan rüzgar aşağıda belirtilen yerlerde oluşabilir:

- Basınç gradyanının yüksek olduğu yerler,
- Yüksek, engebesiz tepe ve vadiler,
- Güçlü jeostrofik rüzgarların etkisi altında kalan bölgeler,
- Kıyı şeritleri,
- Kanal etkilerinin meydana geldiği dağ silsileleri, vadileri ve tepeler.

Rüzgarın oluşumunda topoğrafya ile ilişkisi de önemlidir. Topoğrafik özelliklerden dolayı meydana gelen rüzgar çeşitleri bulunmaktadır (dağ rüzgarı, vadi rüzgarı, kara ve deniz meltemleri) . Ayrıca, topoğrafyanın rüzgar üzerinde üç önemli etkisi bulunmaktadır. Bunlar, pürüzlülük, orografik etkiler ve perdeleme olarak

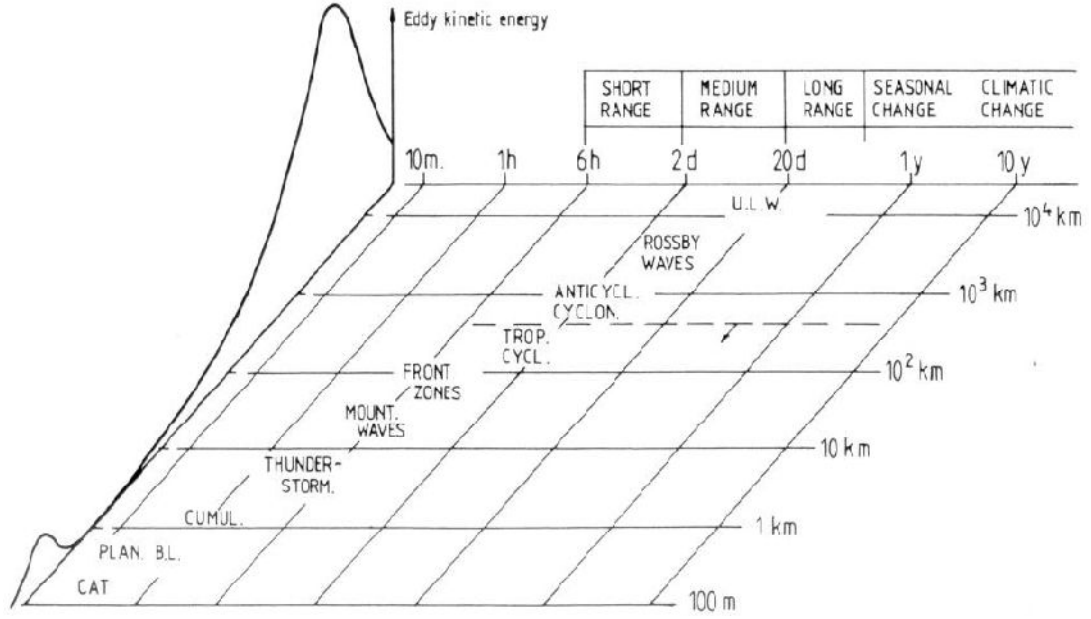
sayılmaktadır. Orografik etkenlerden kasıt, tepeler, sırtlar, basamaklı arazi yapısı, oluk vadi ve yüksek platoların bulunması sayılabilir. Bunlar da rüzgar üzerinde ilave bir etkiye sahiptir [24].

Atmosferde meydana gelen hareket, yani rüzgar farklı alan ve zaman ölçeklerine göre hareket etmektedir. Şekil 2.1 van der Hoven tarafından yapılan yüzeysel rüzgar kayıtlarının spektral analizini göstermektedir. Bu güç spektrumu herhangi bir yerin değişik tiplerdeki atmosferik hareketlerden nasıl etkilendiğini gözler önüne sermektedir [25].



Şekil 2.1: Yüzeysel rüzgar hızlarının şematik spektrumu. Van der Hoven (1957). S(n) spektral güç yoğunluğu [25].

Şekilde iki büyük ve bir küçük zirve görülmektedir. En büyük miktardaki enerji 100 saatlik veya kabaca 4 – 5 günlük periyotlarda bulunmaktadır. Bu zirve büyük ölçekli batıdan esen hareket sistemlerini temsil etmektedir. 10 – 15 saatlik olan ikinci zirve rüzgar hızlarının günlük değişimlerine karşılık gelirken, yüzeysel yakın 2 – 3 dakikalık hareketler genellikle türbülanslı veya fırtınalıdır. Şekil 2.1'in bir diğer özelliği de 0,1 saat ile 3 - 4 saat arasındaki çok az enerjili spektral boşluktur. Bu, atmosferde belirtilen zaman çerçevesi içinde görülen sürekli hareket sistemlerinin olmadığı zamana karşılık gelmektedir [25].



Şekil 2.2: Atmosferdeki hareketlerin zamansal ve alansal ölçekleri [25].

Şekil 2.2’ de konunun daha iyi anlaşılabilmesi için atmosferik hareketlerin alan ve zaman boyutlarını göstermektedir. Bu ölçek haritasında global ölçekli “Rossby dalgaları” dalgalarından, sinoptik ölçekteki kasırga ve tropik fırtınalara ve mezo ölçekli toz fırtınalarına kadar hava sistemleri verilmektedir.

Bu hareketlerden en büyüğü genel sirkülasyondur. Zaman boyutu olarak haftalardan yıllara kadar uzanabilmekte, alan boyutu ise 1000 km - 40000 km arasında değişmektedir. Ticaret rüzgarları ve jet akımları genel sirkülasyona örnek olarak verilebilir. Meteorolojik terminolojide sinoptik ölçek olarak bilinen sistemler günler ile haftalar arasında değişmekte, alan boyutu ise 100 km – 5000 km arasında değişen ölçektir. Mezo ölçekte görülen ve dakikalar ile günler arasında zaman ölçeğine sahip sistemler 1 km – 100 km arasında etki etmektedir. Kara ve deniz meltemleri, orajlar (thunderstorm) ve tornadolar mezo ölçekli atmosferik hareketlerdir. En küçük ölçek olan mikro ölçek hareketler ise, 1 km’nin altında bir alanda etkili olup, etki süresi saniyeler ile dakikalar arasında değişmektedir. Türbülans, zamansal olarak mikro ölçekli bir harekettir. Çizelge 2.1 ile bu sınıflandırma özetlenmektedir [24].

Çizelge 2.1: Atmosferik hareketlerin zaman ve alan ölçeği [24].

Adı	Zaman Ölçeği	Uzunluk	Örnek
Genel Sirkülasyon	Hafta - Yıl	1000 – 40000 km	Ticaret rüzgarları, jet akımı
Sinoptik Ölçek	Gün – Hafta	100 – 5000 km	Basınç sistemleri, tayfun
Mezo Ölçek	Dakika – Gün	1 – 100 km	Meltem, Tornado
Mikro Ölçek	Saniye - Dakika	< 1 km	Türbülans

Yukarıda da değinildiği gibi rüzgarlar, yer yüzündeki farklı güneş ısı dağılımının neden olduğu basınç ve sıcaklık farklarının dengelenmesi ile oluşan hava akımlarıdır. Dünyanın bir kısmında hava, kara ve deniz ısınırken, diğer yüzeyinde soğuma görülür. Dünyanın günlük dönüş hareketiyle bu ısınma ve soğuma periyodik şekilde devam eder. Dünyanın güneşe bağlı ekseninin eğiminin mevsimlere göre değişimi, ısı enerjisinin günlük dağılımının mevsimden mevsime farklılık göstermesine neden olmaktadır (Sadhy, 1995; Avşar vd., 2001). Atmosferin toplam enerjisi, kinetik ve potansiyel enerji olarak ikiye bölünmüştür ve temel olarak basınç kuvvetlerinin etkisiyle potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüşümünün bir sonucudur. Ekvator civarında yerle temas halinde bulunan sıcak ve nemli hava konveksiyonla yükselir, yükseldikçe soğur, belli bir seviyeye yükseldikten sonra daha soğuk olan kuzey enlemlere yükselir ve 30° Kuzey enlemlerine yaklaşıncaya kadar tekrar yeryüzüne doğru alçalır. Burada nispeten daha soğuk ve kuru olan hava ekvatora doğru yönelir. Buna ‘Hadley Sirkülasyonu’ adı verilir. Dünyanın dönüşüyle meydana gelen ‘Coriolis Kuvveti’ nedeniyle havanın hareketi, hareket yönünün sağına doğru saptırıldığından 0°-30° enlemleri arasında yer yüzeyinde oluşan rüzgarlar temel olarak Kuzey-Doğu karakterli olurlar. Benzer yapıda ancak bu kez dalgalar şeklinde bir karakteristik arz eden ve ‘Rossby Sirkülasyonu’ diye adlandırdığımız bir sirkülasyonda 30°- 90° enlemleri arasında gerçekleşir. Bu sirkülasyon sonucunda, 30° - 60° enlemleri arasında Güney- Batılı ve 60°-90° enlemleri arasında ise Kuzey-Doğulu rüzgarlar oluşur. Çizelge 2.2’de Kuzey ve güney yarım küre için atmosferik güney sirkülasyonuna göre rüzgar yönleri sunulmaktadır [26].

Çizelge 2.2: Enlemlere göre hakim rüzgar yönü (Türksoy, 2001).

Enlem	90-60 °	60-30 °	30-0 °	0-30 °	30-60 °	60-90°
Rüzgar Yönü	Kuzey-Doğu	Kuzey-Güney-Batı	Kuzey-Doğu	Güney-Doğu	Güney-Kuzey-Batı	Güney-Doğu

Dünyada meydana gelen rüzgarları küresel ve yerel rüzgarlar olmak iki başlığa ayırmak mümkündür.

2.1 Küresel Rüzgarlar

Rüzgarlar, dünya yüzeyi üzerinde basınç farklılıklarının nedeni olarak ortaya çıkmaktadır. Yeryüzü tarafından emilen güneş radyasyonu miktarı, kutuplara göre ekvatorda daha büyüktür. Isıdaki bu farklılık, atmosferin en alt tabakası olan troposferde çeşitli global ölçekte sirkülasyonların oluşumuna sebebiyet vermektedir. Her ne kadar rüzgar enerjisi uygulamalarında kullanılan rüzgarlar yerel rüzgarlar olsa da, dünyanın genel sirkülasyonuna da bakılmalıdır. Küresel ölçekte meydana gelen rüzgarlara atmosferin genel sirkülasyonu da denir. Atmosferik sirkülasyonu başlatan mekanizma, dünya yüzeyinin homojen olmayan ısınmasıdır. Genel sirkülasyonun anlaşılabilmesi için çeşitli modeller bulunmaktadır. Bunlar arasında tek hücre ve 3 hücre modelini incelemek gerekmektedir.

Tek hücre modeline göre dünya uniform bir şekilde sularla kaplıdır ve kara ile denizler arasındaki farklı ısınmanın meydana getirdiği fiziksel olaylar dikkate alınmamaktadır. Ayrıca güneş sürekli ekvator üzerindedir ve rüzgarlar mevsimlere göre değişmemektedir. Bu modelde dünyanın dönmediği kabul edilmektedir. Bu basit hücre modelidir ve atmosferin genel sirkülasyonunu açıklamaya yeterli değildir. Hadley'in tek hücre modeline alternatif olarak üç hücre modeli geliştirilmiştir [25].

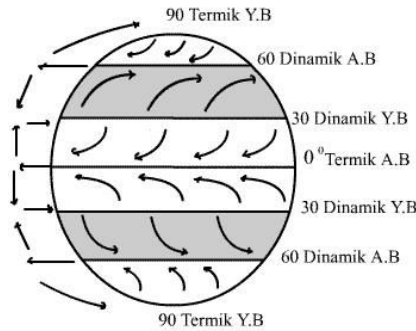
Üç hücre modeline göre de atmosferdeki genel hava dolaşımının temel nedeni, Ekvator kuşağının aşırı ısınması ve kutupların aşırı soğumasıdır. Ancak tek hücre modelinde belirtilen, 30° enlemleri ile 60° enlemleri arasında hareket eden batı yönlü rüzgar kuşakları yoktur [27]. Ekvator üzerinde ısınan sıcak hava, yatay basınç gradyanları zayıf ve rüzgarların da çok düşük şiddette estiği doldurular bölgesi bulunmaktadır. Bu kuşakta sıcak hava yükselerek büyük kümülüs ve fırtınalar meydana getirir, bunlara konvektif sıcak kuleler de denir, çünkü çok büyük miktarda

gizli ısı açığa çıkarırlar. Bu enerji, Hadley Hücresinin enerjisini de tedarik eder ve bunun tropopozza kadar ulaşmasını sağlar [25]. Bu teoriye göre, Ekvator çevresinin sıcak havası gezici siklonlarla kutuplara doğru parçalar halinde taşınır. Kutupların soğuk havası da gezici antisiklonlarla Ekvator'a doğru parçalar halinde taşınır. Bu iki farklı fiziksel karakterdeki hava karışmak istemeyip bir sınır ile ayrılır [27]. Bu sınır boyunca cephe oluşur. Bu orta hücreye de Ferrel Hücresi denir [25]. Bu iki bölge arasında hava kütlelerinin hareketi mevsimlere göre partiler halinde taşınır. Polart Hücre ise kutuplardaki soğuk havanın çökmesi ve daha düşük enlemlerdeki sıcak havanın yükselmesi ile oluşan direkt bir hücredir. Şekil 2.3' te üç hücreli genel sirkülasyonun şematik resmi verilmektedir.

Özet olarak, bu üç hücreli küresel dolaşım modeli, yer yüzeyinde de yüksek ve alçak basınç kuşaklarının oluşmasına ve bu kuşaklar arasında rüzgarlara neden olur. Ekvator bölgesindeki net enerji kazancı sonucunda ısınan hava tropopozza kadar yükselir ve tropopozda yayılarak kutuplara doğru yönelir. Yaklaşık 30° enlemlerine geldiğinde soğur ve çökmeye başlar. Bu enlemlerde tropopoz seviyesinden çöken hava adyabatik olarak ısınır ve bağıl nemi azalır. Yere doğru çöken hava yayılarak 60° enlemlerinde, kutuplarda net ısı kaybı nedeniyle soğuyan ve tropopozdan yere doğru çöktükten sonra yer seviyesinde ekvatora doğru yayılan soğuk hava ile karşılaşır ve yükselmeye zorlanır.

Bu dolaşım nedeniyle oluşan belli başlı basınç kuşakları:

- Ekvator bölgesinde alçak basınç kuşağı (intertropical convergence zone)
- 30° enlemlerinde sub-tropikal yüksek basınç kuşağı (at enlemleri)
- 60° enlemlerinde sub-polar alçak basınç kuşağı
- Kutuplarda yüksek basınç takkeleri.



Şekil 2.3: Genel sirkülasyonun şematik resmi.

2.2 Sürekli Rüzgar Tipleri

2.2.1 Alizeler

Alizeler, 30° kuzey ve 30° güney paralelleri çevresindeki dinamik yüksek basınç kuşaklarından, ekvatora doğru olan rüzgarlardır. Tam kuzey ve güneyden esmeleri gereken bu rüzgarlar, yer kürenin dönmesi sonucu yön değiştirir. Kuzey yarım küre'de kuzeydoğudan güneybatıya; güney yarım küre'de güneydoğudan kuzeybatıya doğru eser. Ekvator çevresinde yükselmiş olan hava da dengeyi sağlamak üzere üstten dönencelere doğru eserek üst alizeleri oluşturur. Alizeler, karaların doğu kıyılarında bol yağışlara neden olurken kara içlerinde ve karaların batı kıyılarında kuru rüzgârlar olarak eser. Denizlerin üzerinde karadakinden çok daha kuvvetli ve düzenli eserek gökyüzünün çoğu zaman açık olmasını sağlar. Bu nedenle alize rüzgârlarına açık olan adalar, en gözde turizm merkezleridir. Sürekli olmaları ve yönlerinin belirli olması nedeniyle alizeler, tarih boyunca yelkenli gemiler için elverişli bir ortam oluşturmuştur. Yelkenli gemiler devrinde, Amerika ile Avrupa arasındaki ticareti sağladığı için alizelere ticaret rüzgârları denmiştir [24,25,28].

2.2.2 Batı rüzgarları

Batı rüzgarları, 30° kuzey ve 30° güney paralellere dinamik yüksek basınç alanlarından 60° kuzey ve 60° güney paralellere dinamik alçak basınç alanlarına doğru esen rüzgârlardır. Bunlar dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesinden dolayı kuzey ve güney yarım kürede genellikle batıdan eserler. Başlangıçta sıcak ve kurudurlar. Ancak, denizler üzerinden geçerken nem kazanırlar. Orta kuşaktaki karaların batı kıyılarına bol yağış bırakırlar. 60° enlemleri civarında kutup rüzgarları ile karşılaşarak cephe yağışlarına yol açarlar [24,28].

2.2.3 Kutup rüzgarları

Kutup rüzgarları, Kış döneminde karalar denizlere göre daha çabuk soğurlar. Bu yüzden termik yüksek basınç özelliği kazanırlar. Deniz ve okyanuslar ılıktır. Termik alçak basınç durumundadır. Bu nedenler kış döneminde musonlar karalardan deniz ve okyanuslara eserler. Karadan estikleri için yağış potansiyeli fazla değildir. Kutuplardan 60 derece enlemlerine doğru eserler [24,28].

2.3 Mevsimsel rüzgarlar

Mevsimlere göre yön değiştiren rüzgarlardır. Bu rüzgarlar kışın soğuk olan karalardan denizlere doğru, soğuk ve kuru olarak eserler. Yazın ise ılık ve karalara göre daha sıcak olan denizlerden, soğuk karalara doğru ılık ve nemli olarak eserler. Devirli rüzgarların en çok bilineni Asya Kıtası ile Hint ve Pasifik Okyanusları arasında esen Muson rüzgarlarıdır [27].

2.3.1 Muson rüzgarları

Yaz aylarında Asya Kıtası güçlü bir şekilde ısınmaktadır ve alçak basınç merkezi meydana gelmektedir. Deniz yüzeyi sıcaklıkları biraz daha düşüktür. Haziran ayı başında soğuk nemli rüzgar, Hint Okyanusu'ndan Hindistan içlerine doğru eser. Bu güneydoğu muson rüzgarlarının başlangıcıdır. Haziran ayından Eylül ayına kadar sürekli eserek Hindistan'a büyük miktarda yağış bırakmaktadır. Kışın, kıta soğumaktadır ve bundan dolayı yüksek basınç alanı meydana gelmektedir. Deniz yüzeyi, karalara göre biraz daha sıcak olduğundan, rüzgar bu kez karadan denize doğru esmeye başlar. Muson yağmurları Afrika ve Güney Amerika'da da meydana gelmektedir fakat Hindistan'daki kadar kuvvetli değildir [24].

2.4 Yerel Rüzgarlar

Etki alanları dar ve yılın belli zamanlarında veya günün belli saatlerinde esen rüzgarlardır. Yerel basınç farkından dolayı oluşurlar. Bunların bir kısmı da atmosferdeki genel hava dolaşımının etkisi ile oluşurlar [27]. Rüzgar enerjisi uygulamalarında kullanılan rüzgarlar yerel rüzgarlardır [24].

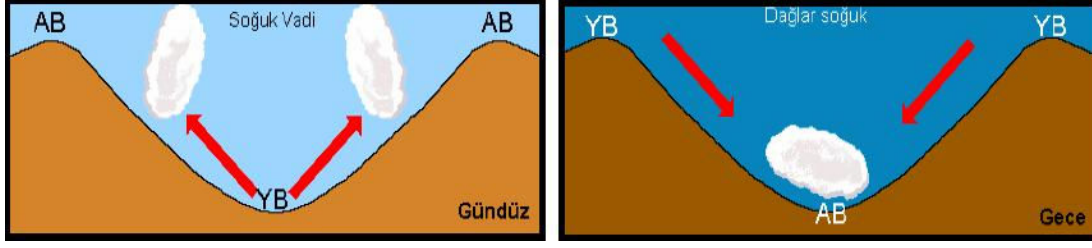
2.4.1 Kara ve deniz meltemleri

Kara ve deniz meltemleri, kara ile deniz arasındaki sıcaklık gradyanının bir sonucudur. Güneşten gelen enerji karalar ve denizler tarafından farklı şekillerde yutulur, bu farklı yutulmalar sonucunda kara ve deniz arasında sıcaklık farklılığı ortaya çıkar. Deniz meltemi, bezen önemli hızlara ulaşabilmektedir. Deniz seviyesi üzerinde 10 metrede 6-9 m/s hızlara kadar çıkabilmektedir. Ve karaların içine doğru bazen 50 km kadar bir derinliğe ulaşabilmektedir. Lokal deniz meltemi, genellikle sadece en alçak 100 metre seviyesine kadar etkili olabilmektedir. Deniz meltemi, özellikle yazın yüksek basınç yapı süresince esen rüzgar hızı düşük olduğundan daha

sık görülmektedir. Deniz melteminin gelişimi genellikle sabah başlar ve öğleden sonra sona erer. Buna karşın, kara meltemi geceleyin başlar ve bir kaç saat içinde sona erer. Kara meltemi, deniz meltemine göre daha zayıftır. Rüzgar deniz melteminden oluştuğunda, daha pürüzsüz deniz yüzeyi üzerinden geldiğinden rüzgar yüzey sürtünmelerinden daha az etkilenir ve hızı daha yüksektir. Genelde deniz seviyesindeki rüzgar hızları dağdakiler kadar yüksek değildir [24]. Deniz seviyesinde türbülans daha azdır ve deniz meltemleri, deniz seviyesi üzerindeki nemli ve tuzlu havayı beraberinde taşıdıklarından korozyon yüzünden denize yakın bulunan RES'ler daha az ömürlü olabilmektedir.

2.4.2 Dağ ve vadi rüzgarları

Geceleri nem oranı düşük olan dağ yamaçlarından, sıcaklık kaybı; nem oranı daha fazla olana vadilere göre daha fazladır. Yani geceleri dağ yamaçları vadilere göre daha çabuk soğurlar. Böylece dağ yamaçları yüksek basınç alanı, vadi tabanları da alçak basınç alanı durumundadır. Geceleri dağ yamaçlarından vadilere doğru esen rüzgarlara dağ meltemi denir. Dağ meltemi sıcak yaz gecelerinde serinletici etkiye bulunur. Vadi meltemi ise, vadi tabanları dağ yamaçlarına oranla daha fazla neme sahiptir. Bundan dolayı gündüzleri vadiler, dağ yamaçlarına göre daha geç ısınır ve yerel alçak basınç alanı durumuna gelirler. Dağ yamaçları, nem miktarının az olması ve bakının da etkisi ile daha çabuk ısınırlar ve yerel alçak basınç alanı durumuna gelir. Gündüz yüksek basınç alanı olan vadilerden, alçak basınç alanı olan dağlara doğru esen rüzgarlara vadi meltemi denir [27]. Vadideki hava parseli gün boyu ısındığından eğimli yüzey boyunca yükselir. Bu oluşan rüzgara anabatik rüzgar da denir. Bu rüzgarların hızları 3 m/s civarında olup rüzgar enerjisi için oldukça düşüktür. Buna karşın dağ yüzeyindeki hava gece boyunca soğuduğundan, vadiye doğru hareket eder ve bu oluşan rüzgara katabatik rüzgar denir. Katabatik rüzgarlar bazen çok güçlü olabilmektedirler. Hızları bazen 20 – 30 m/s hızlarına çıkabilmektedir [24]. Şekil 2.4' te dağ ve vadi rüzgarları gösterilmektedir.



Şekil 2.4: Vadi ve dağ rüzgarları [27].

3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ

Kullanımdaki rüzgar türbinleri dönme eksenine göre yatay eksenli ve düşey eksenli olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar.

3.1 Düşey eksenli rüzgar türbinleri

Adından da anlaşılacağı gibi, türbin mili düşey ve rüzgarın geliş yönüne diktir. Savonius tipi, Darrieus tipi gibi çeşitleri vardır. Daha çok deney amaçlı üretilmişlerdir ve ticari amaçla kullanımları çok azdır. Şekil 3.1’te darrieus tipi düşey eksenli rüzgar türbininde, düşey şekilde yerleştirilmiş iki tane kanat vardır. Kanatlar, yaklaşık olarak türbin mili uzun eksenli olan bir elips oluşturacak biçimde yerleştirilmişlerdir. Kanatların içbükey ve dışbükey yüzeyleri arasındaki çekme kuvveti farkı nedeniyle dönme hareketi oluşur. Yapısı gereği Darrieus tipi rüzgar türbinlerinde, devir başına iki kere en yüksek tork elde edilir. Rüzgarın tek yönden estiği düşünülürse; türbinin verdiği güç, sinüs şeklinde bir eğri oluşturur. Dikey eksenli rüzgar türbinleri her iki yöne de dönebilirler dolayısıyla değişen rüzgar yönlerinde dönebilirler. Böylece rüzgarı her yönden alabilmektedirler. Dönüşün dikey eksenli, sürücünün toprak seviyesine dahi yerleştirilmesine izin vermektedir. Bu tipteki rüzgar türbinlerinin güç katsayısı düşüktür. Bu nedenle güç üretiminde tercih edilmezler.

Bu türbinlerin avantajları şöyle sıralanabilir:

- Jeneratör ve dişli kutusu yere yerleştirildiği için, türbini kule üzerine yerleştirmek gerekmez. Böylece kule masrafı olmaz.
- Türbini rüzgar yönüne çevirmeye gerek yoktur. Yani dümen sistemine ihtiyaç yoktur.
- Türbin mili hariç diğer parçaların bakım ve onarımı kolaydır.
- Elde edilen güç toprak seviyesinde çıktığından, nakledilmesi daha kolaydır.

Dezavantajları ise şöyledir:

- Yere yakın oldukları için alt noktadaki rüzgar hızları düşüktür.

- Verimi düşüktür.
- Çalışmaya başlaması için bir motor tarafından ilk hareketin verilmesi gerekir. Dolayısıyla ilk hareket motoruna ihtiyaç vardır.
- Ayakta durabilmesi için tellerle yere sabitlenmesi gerekir. Bu da pek pratik değildir.
- Türbin mili yataklarının değişmesi gerektiğinde, makinenin tamamının yere yatırılması gerekir[29].



Şekil 3.1: Dikey eksenli bir rüzgar türbini.

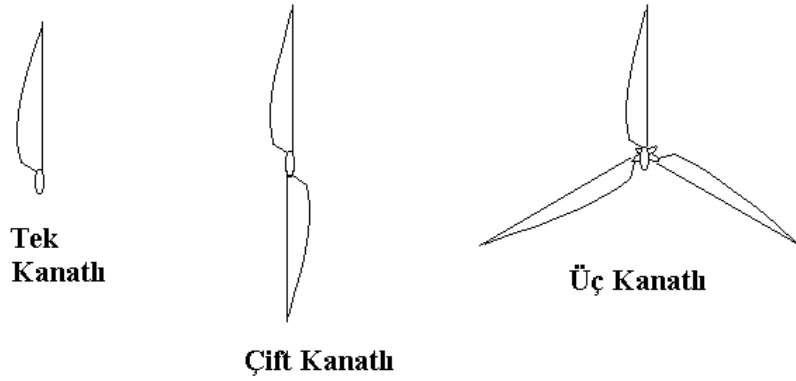
3.2 Yatay eksenli rüzgar türbinleri

Bu tip türbinlerde dönme eksenini rüzgar yönüne paraleldir. Kanatları ise rüzgar yönüyle dik açı yaparlar. Ticari türbinler genellikle yatay eksenlidir. Rotor, rüzgarı en iyi alacak şekilde, döner bir tabla üzerine yerleştirilmiştir. Yatay eksenli türbinlerin çoğu, rüzgarı önden alacak şekilde tasarlanırlar. Rüzgarı arkadan alan rüzgar türbinlerinin ise, yaygın bir kullanım yeri yoktur. Rüzgarı önden alan türbinlerin iyi tarafı, kulenin oluşturduğu rüzgar gölgenmesinden etkilenmemesidir. Kötü tarafı ise, türbinin sürekli rüzgara bakması için dümen sisteminin gerekliliğidir.

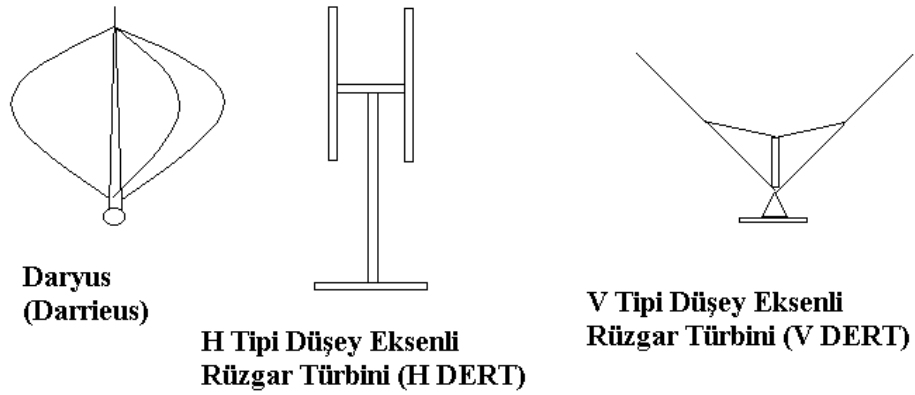
Rüzgarı arkadan alan türbinlerde ise; eğer rotor ve gövde uygun şekilde tasarlanmışsa, dümen sistemine ihtiyaç kalmamaktadır. Bundan dolayı daha hafiftirler, fakat büyük çaplı türbinlerde rüzgarın arkadan gelmesi tercih

edilmemektedir. Bunun nedeni, serbestçe dönmeye bırakılan türbinin elektrik enerjisini taşıyan kabloları burmasıdır. 1000 amper gibi yüksek akımlarla çalışan bu sistemde, akımın mekanik sistemlerle de toplanması sağlıklı değildir. Fakat küçük çaplı türbinlerde kolaylıkla uygulanabilirler. Şekil 3.2’ de yatay ve düşey eksenli türbin tipleri detaylı olarak gösterilmektedir [29].

Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri



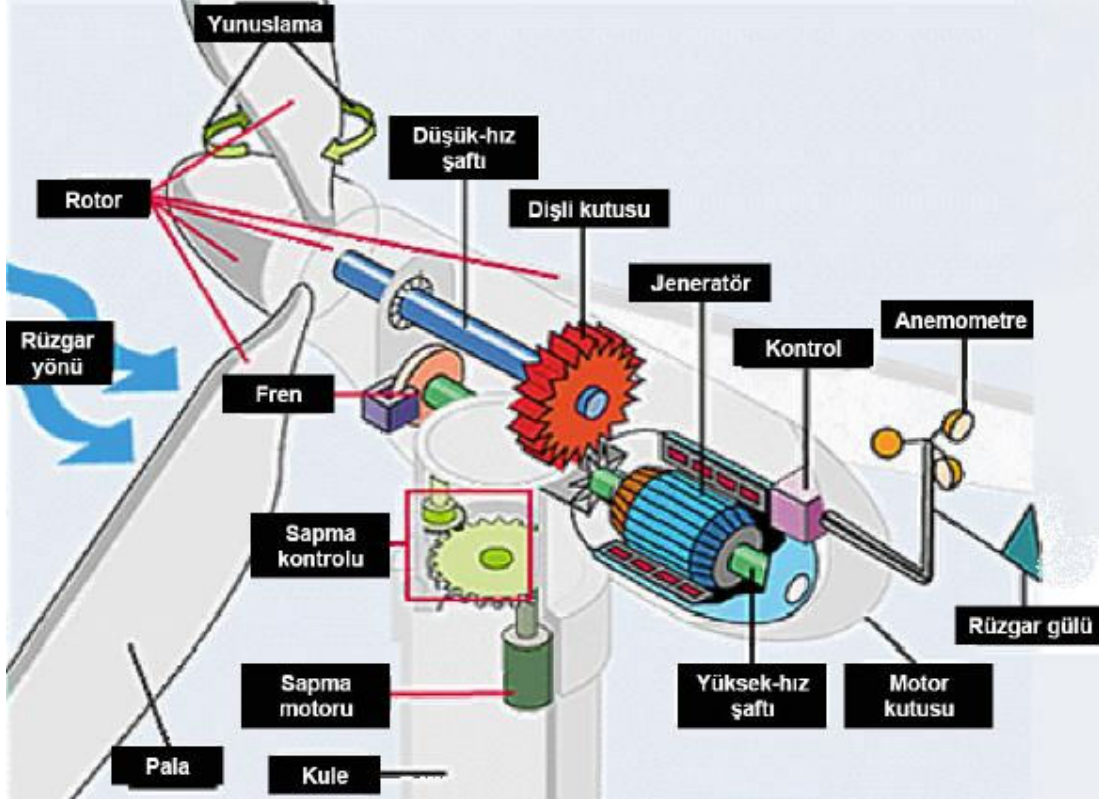
Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri



Şekil 3.2: Rüzgar türbini türleri.

3.3 Rüzgar Türbini Elemanları

Bir rüzgar türbini başlıca; dişli kutusu, rotor, anemometre, otomatik yöneltme düzeni, frenleme düzeni, yaw mekanizması ve kuleden meydana gelmektedir. Şekil 3.3’de tipik bir rüzgar türbinine ait elemanlar ve konumları görülmektedir. Bu ekipmanlar aşağıda kısaca açıklanmıştır.



Şekil 3.3: Rüzgar türbini elemanları ve yerleri.

- **Makine Yeri (Nacelle) :**

Makine yeri, rüzgâr türbininin dişli kutusu ve elektrik güç üretici dahil kilit parçalarını içerir. Servis personeli, makine yerine çark kulesinden girebilir. Makine yeri solunda, kanatlar ve göbek bulunur.

- **Pervane Kanatları:**

Pervane kanatları, rüzgârı yakalar ve rüzgârın gücünü pervane göbeğine aktarır. Modern bir 800 kW rüzgâr türbininde her pervane kanadının uzunluğu 30 metre kadardır ve bir uçak kanadı gibi tasarlanır.

- **Göbek (Hub):**

Rüzgar kanatlarının bağlandığı kısım olan rotor göbeği, rüzgar türbininin düşük hız mili ile bağlantılıdır.

- **Düşük Hız Mili:**

Rüzgâr türbininin düşük hız mili, pervane göbeğini dişli kutusuna bağlar. Bu mil aerodinamik frenlerin çalışması için hidrolik sisteme ait borular içerir.

- **Dişli Kutusu:**

Dişli kutusunda, solda düşük hız mili bulunur. Sağdaki yüksek hız milinin, düşük hız milinden 50 kat hızlı dönmesini sağlar.

- **Mekanik Frenli Yüksek Hız Mili:**

Mekanik frenli yüksek hız mili, dakikada yaklaşık 1500 devir hız ile döner ve elektrik güç üreticini çalıştırır. Bir acil durum mekanik freni vardır. Mekanik fren, aerodinamik frenlerin çalışmaması durumunda veya türbin bakımdayken kullanılır.

- **Elektrik Güç Üretici:**

Elektrik güç üretici, genelde bir eşzamanlı güç üretici veya eşzamansız güç üreticidir.

- **Elektronik Kontrol Ünitesi:**

Elektronik kontrol ünitesi, rüzgâr türbininin durumunu sürekli izleyen ve eğim mekanizmasını kontrol eden bir bilgisayar içerir. Bir arıza halinde örneğin, dişli kutusu veya güç üreticinin fazla ısınması durumunda rüzgâr türbinini otomatik olarak durdurur ve telefon modem hattı vasıtasıyla türbin kontrol sistemine uyarı verir.

- **Hidrolik Sistem:**

Hidrolik sistem, rüzgâr türbininin aerodinamik frenlerini içerir.

- **Soğutma Birimi:**

Soğutma ünitesi, elektrik güç üreticini soğutmak için kullanılan bir soğutma ünitesi içerir. Ayrıca dişli kutusundaki yağı soğutmak için kullanılan bir soğutma ünitesi içerir.

Türbinlerin çoğunda jeneratördeki hava kanallarından bir fan ile hava sirkülasyonu sağlanması metodu ile soğutulmaktadır. Soğutma birimi fanı elektrik jeneratörünü soğutur. Ayrıca dişli kutusunun yağını soğutan bir yağ soğutma birimini de bulundurur. Bazı türbinler su-soğutmalı jeneratörlere sahiptir. Fakat birkaç üretici firma su ile soğutulan jeneratörler kullanırlar. Su ile soğutulan jeneratörler daha küçük yapılabilir. Ayrıca elektriksiz olarak daha sorunsuz ve verimlidir. Ancak bu sistemde soğutma suyu için sıvı tankı gereklidir. Bu tankın veya radyatörün nacelleye yerleştirilmesi problem yaratır.

- **Kule:**

Rüzgâr türbinini kulesi, makine yerini ve pervaneyi taşır. Genelde kulenin yüksek olması bir avantajdır, zira zeminden uzaklaştıkça rüzgâr hızları artar. Tipik 800 kW rüzgâr türbininde 50 - 70 metrelik bir kule bulunur. Kuleler, dairesel veya kafes

biçiminde olabilir. Dairesel kuleli türbinlerin tepesine ulaşmak için bir iç merdiven bulunmaktadır bu da personelin türbinlere bakması için daha güvenlidir. Kafes kulelerin avantajı ise sadece daha ucuz olmalarıdır.

- **Eğim Mekanizması:**

Eğim mekanizması, pervane ile birlikte makine yerini rüzgâra karşı döndürmek üzere elektrik motorlarından yararlanır. Eğim mekanizması, yelkovanı kullanarak rüzgâr yönünü algılayan elektronik kontrol ünitesi tarafından çalıştırılır. Rüzgâr, yön değiştirdiğinde normalde çark bir defada sadece birkaç derece eğilir.

- **Anemometre ve Rüzgar Gülü:**

Anemometre (Rüzgâr ölçer) ve rüzgar gülü, rüzgâr hızı ve yönünü ölçmek için kullanılır. Anemometreden gelen elektronik sinyaller, rüzgâr çarkının elektronik kontrol ünitesi tarafından rüzgâr şiddeti yaklaşık 5 m/s'ye yaklaştığında rüzgâr türbinini çalıştırmak için kullanılır. Bilgisayar, rüzgar türbini ve çevresini korumak için rüzgâr hızı 25 m/s'yi aştığında çark otomatik olarak durdurur. Rüzgar gülü sinyalleri, rüzgâr türbininin elektronik kontrol ünitesi tarafından algılanır ve rüzgâr türbinini rüzgâra karşı döndürmek üzere kullanılır.

3.4 Güç Kontrolü Sistemi

Rüzgar türbinleri, nominal gücü vermek üzere tasarlandıkları hızların (nominal hız) üzerinde, türbinin zarar görmesini önlemek amacıyla kontrol sistemlerine sahiptirler. Bu sistemler, türbin nominal hızı aştıktan sonra palaların aerodinamik performansını düşürerek jeneratörde oluşabilecek aşırı yüklemeyi önlerler. Bu amaçla kullanılacak 5 temel tasarımdan söz edilebilir. Bunlar kullanım yaygınlıklarına göre:

- Pasif Stall Kontrolü
- Aktif Pitch Kontrolü
- Aktif Stall Kontrolü
- Sapma Kontrolü
- Pasif Pitch Kontrolü

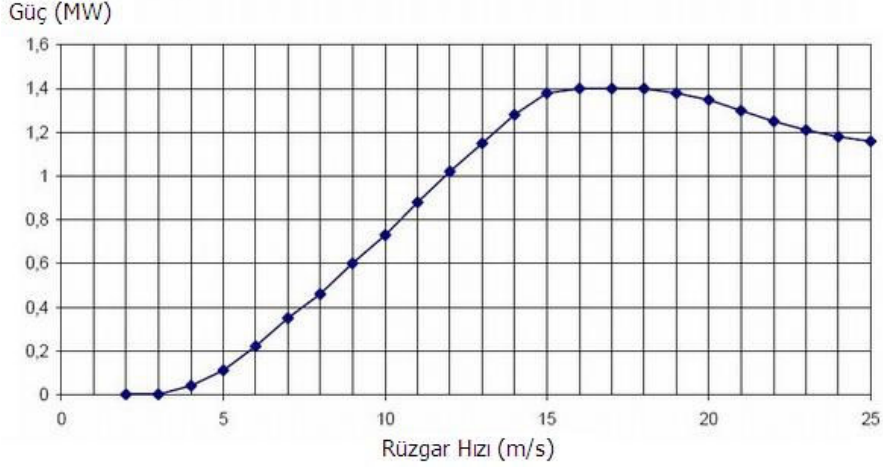
Bu beş tasarımdan ilk üçü daha yaygın kullanım alanı bulurken, son ikisi tercih edilmemektedir.

Sapma kontrollü türbinlerde, türbini rüzgar yönüne çevirmek için mevcut bulunan sapma kontrollü sistemi güç kontrolü için de kullanılmaktadır. Bu sistemler, rüzgar tasarım hızının üzerine çıktığında türbini rüzgar akımının doğrultusundan çıkartmak böylece türbinin güç katsayısını düşürmek prensibine dayanırlar. Fakat bu sistem yeterli sapma hızlarına ulaşmanın içerdiği zorluklar ve pala ile makine dairesinin dönüş esnasında yarattığı momentten dolayı yaygın bir sistem değildir. Bu tür sistemlerde, sapma özellikle ilk 10° civarında önemli bir güç katsayısı düşüşü sağlayamamaktadır, bu sebeple bu değer üzerine çıkmak için geçen sürede aşırı yükleme olasılığı artmaktadır [30,31].

Pasif pitch kontrolünde ise, pala yüksek hızlarda burularak istenen pitch açısına ulaşacak şekilde tasarlanmaktadır. Güç kontrolünün bu şekilde sağlanması tasarlanmıştır. Bu dizayn prensipte mantıklı ve basit gözükse de uygulamada bunu başarmak zor olmaktadır, çünkü güç kontrolü için gerekli burulma ile pala üzerine gelen yüklerin oluşturduğu burulma birbiriyle uyumlu olmayabilir [31].

3.4.1 Stall kontrollü türbinler

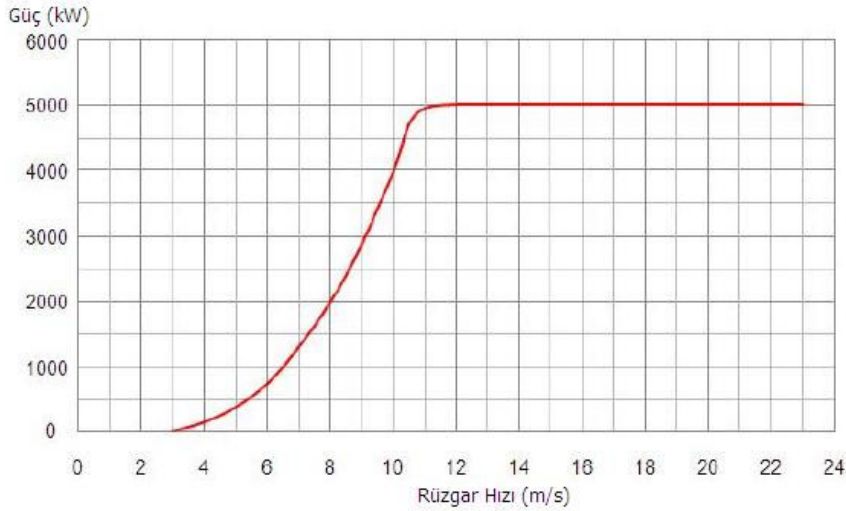
Stall kontrollü türbinler, göbeğe sabit bir açı ile sabitlenmiş palalara sahip sistemlerdir. Bu sistemler, rüzgar hızındaki artış ile birlikte hücum açısının da artması ve palanın stall etkisine girmeye başlaması sayesinde güç kontrolü sağlarlar. Pala geometrisi, rüzgar nominal hızın üzerindeki hızlarda arttıkça, performansı düşürecek şekilde tasarlanmıştır. Pala kök bölgesinden başlayarak stall etkisine girer, bu şekilde tasarım hızı üzerindeki hızlarda, aşırı yükleme sebebiyle türbin sistemlerinde oluşacak hasarlar önlenmiş olur. Stall kontrollü sistemler nominal hızın üzerindeki hızlarda, pitch kontrollü türbinler gibi sabit bir güç seviyesini koruyamamaktadırlar, bu sebeple nominal hız üzerinde enerji üretimi pitch kontrollü türbinlerden düşüktür. Stall kontrollü türbinlerin temel avantajı, rotorda hareketli parçalara sahip olmamaları ve karmaşık bir kontrol sistemine ihtiyaç duymamalarıdır. Bu türbinler sadece türbinlerin çalıştırılması ve durdurulması için kontrole ihtiyaç duyarlar. Şekil 3.4.'te stall kontrollü bir türbine ait güç eğrisi görülmektedir [32, 33].



Şekil 3.4: Stall kontrollü türbine ait güç eğrisi [33].

3.4.2 Pitch kontrollü türbinler

Pitch kontrollü türbinlerde palalar, stall kontrollü olanların aksine göbeğe sabit bir açı ile sabitlenmiş değildirlir. Pala, pitch kontrol mekanizması sayesinde rüzgar hızına göre eksen etrafında döndürülebilmektedir. Bu türbinler, nominal hız üzerinde sabit güç üretimi sayesinde daha kaliteli bir güç çıkışı sağlamaktadırlar, fakat stall etkisine göre tasarlanmadıkları için ani rüzgarlara karşı hassastırlar. Şekil 3.5'te pitch kontrollü bir türbin için oluşturulmuş güç eğrisi görülmektedir [34].



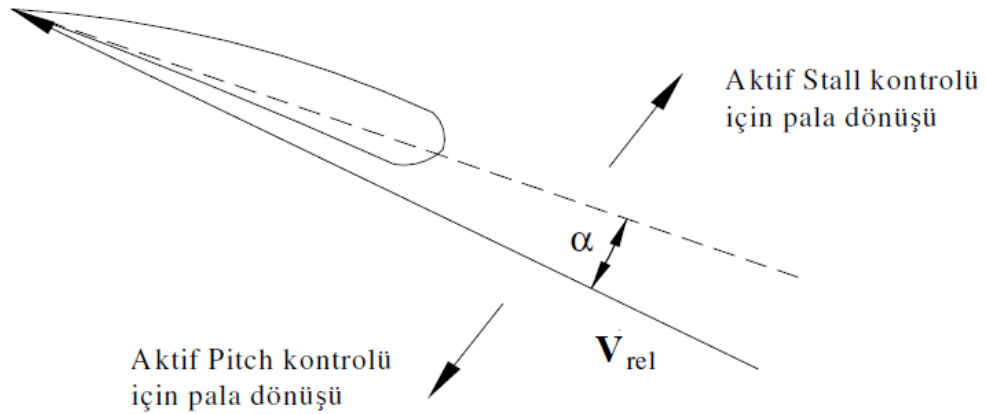
Şekil 3.5: Pitch kontrollü türbine ait güç eğrisi [34].

Pitch kontrol mekanizmasının kullanımı farklılıklar gösterebilir. Sistem, bütün hızlarda kullanılarak elde edilen enerjinin artırılması sağlanabilir ya da sistemde aşınmayı azaltmak için sadece nominal hızın üzerinde güç kontrolü için kullanılabilir.

Bu sistemler MW sınıfı türbinlerde daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Pitch kontrollü türbinlerden elde edilecek performans artışı temel olarak kullanılan pitch mekanizmalarının hızına ve hassasiyetine bağlıdır. Bu makineler sahip oldukları pitch sistemleri sebebiyle yüksek hızlarda yapısal sorunlar yaşamaya, sabit palaya sahip stall kontrollü türbinlere oranla daha eğilimlidirler [30, 31].

3.4.3 Aktif stall kontrollü türbinler

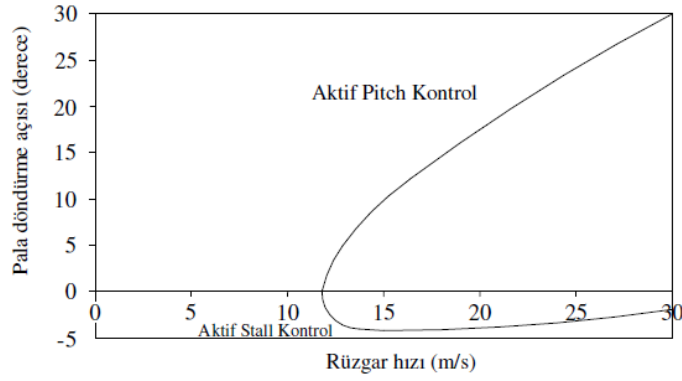
Aktif stall kontrollü türbinler aktif stall kontrolü, bundan önce söz edilen iki kontrol sistemine göre daha yeni bir tasarımdır. Bu sistemde de pitch kontrollü türbine benzer şekilde güç kontrolü için pala, eksenini etrafında döndürülerek nominal hız üzerinde sabit güç üretimi sağlanır, fakat dönüş yönü pitch kontrolündekinin tersidir. Pitch kontrollü türbin, nominal hızın üzerine çıktığında palayı hücum açısını düşürecek şekilde döndürülürken, aktif stall kontrollü bir türbin palayı ters yönde çevirip, türbini stall etkisine sokar. Bu dönüş hareketleri Şekil 3.6’te görülebilir.



Şekil 3.6: Aktif stall ve aktif pitch kontrolü için pala dönüş yönleri.

Aktif stall kontrollü türbinin güç eğrisi pitch kontrollü türbine benzer. Aktif stall ve aktif pitch kontrollü türbinler için gerekli pala döndürme açılarının kıyaslaması Şekil

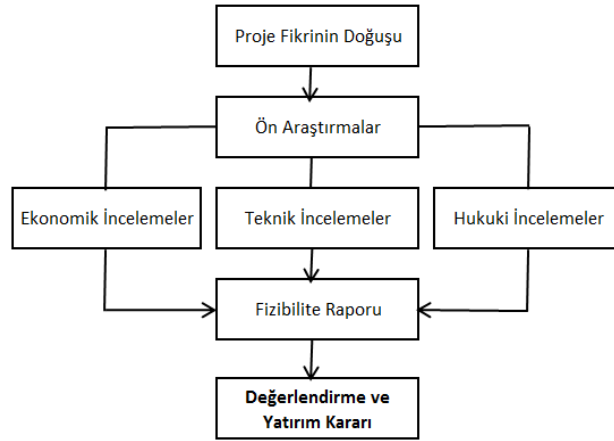
3.7'da görülebilir. Şekil 3.7'da görüldüğü gibi, bu tasarımda güç kontrolü için gerekli pala döndürme açıları, aktif pitch kontrolüne göre oldukça düşüktür. Bu sayede türbin rüzgar hızındaki değişimlere daha hızlı yanıt verebilir. Ayrıca türbin nominal hızın üzerinde stall etkisine girmiş olacağından, ani rüzgarlara karşı hassasiyeti daha düşük olacaktır [30].



Şekil 3.7: Aktif stall ve aktif pitch kontrollü türbinlerde güç kontrolü için gerekli pala döndürme açılarının kıyaslaması [30]

4. RÜZGAR ENERJİSİ SANTRALİ PROJELENDİRİLMESİ VE KURULUMDA İZLENECEK YOLLAR

Çalışmanın bu bölümünde, bir RES projesi yapılabilmesi için yatırım kararının alınması ve ardından izlenecek yol haritası verilmektedir. Bir RES yatırımına karar verilmeden önce, yatırım projesinin fikir olarak tasarlanması, ön araştırmaların yapılması, projeye ilgili teknik, hukuki ve ekonomik yönden incelemelerin sonuçlandırılması gerekmektedir. Bu aşamaların sonucunda ortaya çıkan fizibilite raporu neticesinde ilgili değerlendirmeler yapılmakta ve yatırım kararı verilmektedir. Şekil 4.1’ de bu ön hazırlık sürecine ait şema bulunmaktadır.

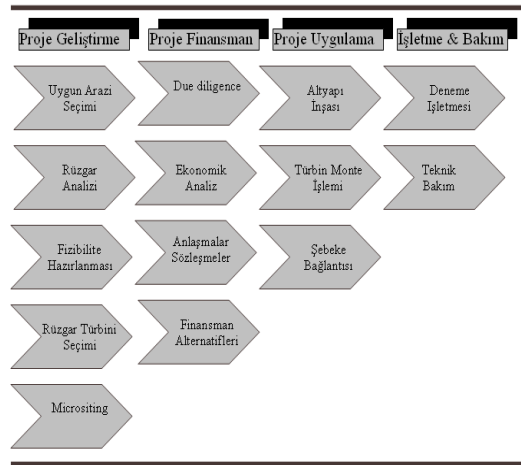


Şekil 4.1: Yatırım projelerinin hazırlama safhaları [24].

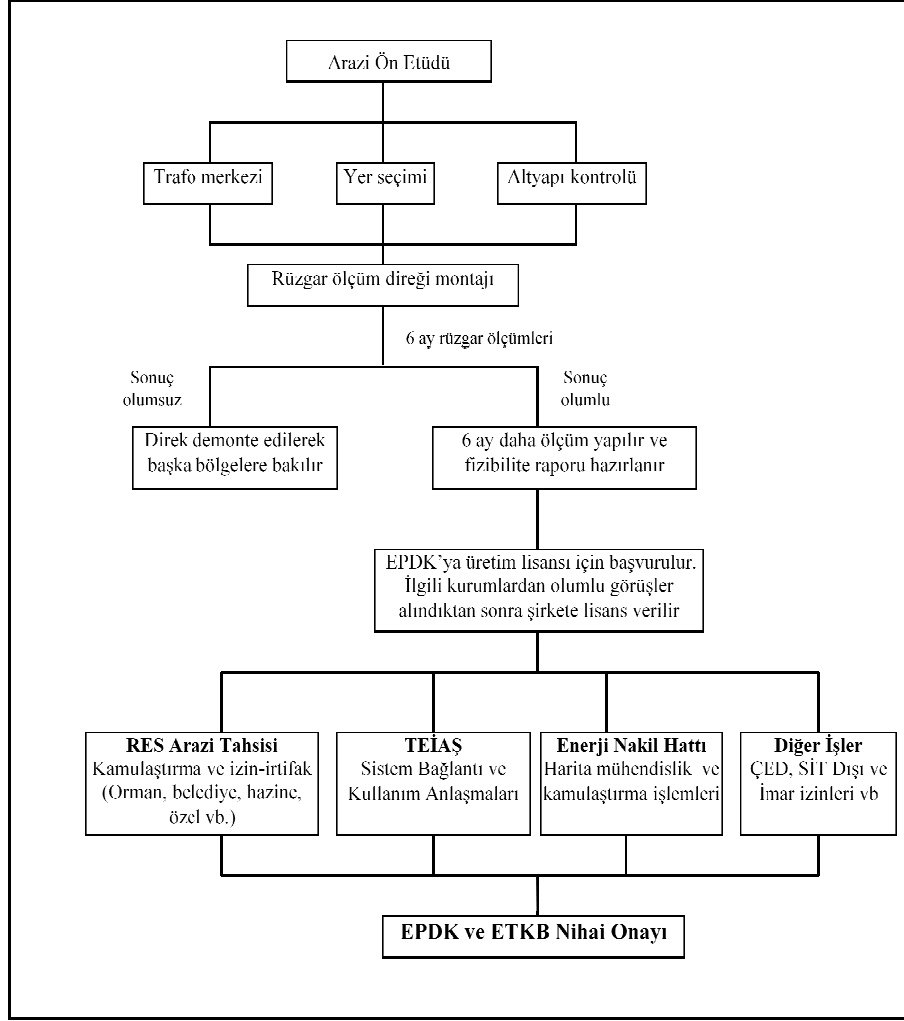
Burada düşünülenin tersine RES projelerinin yapılabilirliğini belirlerleyen sadece yatırımın yapılacağı bölgenin rüzgar potansiyeli değildir. Yatırım kararının doğru bir şekilde alınabilmesi için hazırlanan fizibilite raporunda durumun teknik, hukuksal, ekonomik analizleri yapılmakta ve zaman planlaması dahil proje bir çok yönden irdelenmelidir. Projenin teknik yönden incelenmesinde temel amaç, RES projesinin teknik, altyapı olanakları açısından incelenmesi, yapılacak yatırımın sonucunda ulaşılabilecek kurulu gücün belirlenerek yıllık enerji üretiminin hesaplanmasıdır. Ekonomik analizde ise amaç, projenin sabit ve işletme sermaye tutarlarının 20 – 25

yıllık işletme dönemi süresince yaratacağı nakit akışının projenin kendi kendini geri ödeyebilme ve yatırımcıya makul bir kar bırakıp bırakmayacağını incelenmesidir. Bir proje için planlanan sürelerin tahmini de önemlidir. Bu bakımından projeyi tahmin edilen süre içerisinde bitirmek özellikle finansal açıdan önemlidir.

Ülkemizde RES projelerinin geliştirilmesinde 4 ana aşama olduğu söylenebilir. Bunlar, proje geliştirme, proje finansman, proje uygulama ve işletme bakım olarak sınıflandırılmaktadır. Proje geliştirme safhasında önce RES' nin kurulacağı araziler incelenilerek uygun görülen yerlere rüzgar ölçüm direkleri dikilir ve topoğrafik çalışmalar yapılır. Bölgeyle ilgili fikir sahibi olunabilmesi açısından en azından bir yıllık ölçümlere ihtiyaç vardır. Ölçümler tamamlandıktan sonra rüzgar potansiyelinin belirleneceği fizibilite raporu hazırlanır. Bölge karakteristiğine uygun türbin seçimi yapılarak, arazi sınırları içerisinde uygun biçimde türbinlerin yerleşimi yapılır. İkinci aşamaya geçildiğinde; uluslararası, uzman ve akredite kuruluşlar tarafından hesaplanan yıllık enerji üretim miktarı sonucunda durum tespit raporu hazırlanır. Bu rapor neticesinde, projeye uygun kredi ve finansman arayışı başlar. Üçüncü aşamada ise, RES kurulacak olan arazinin altyapı işleri gerçekleştirilir, inşaat işleri, servis yolları, türbin montajları ve trafo merkezi ile enerji nakil hattı bağlantısı yapılarak tesis işletmeye hazır hale getirilir. Son aşama olan işletme ve bakım aşamasında ise, santral bir süre deneme amaçlı çalıştırılıp gerekli testler ile devreye alma işlemleri sonuçlandırıldıktan sonra nihai kabulü yapılır ve RES işletmeye resmen alınmış olur [24]. Şekil 4.2' de bu belirtilen süreçler özetlenmektedir.



Şekil 4.2: RES projesi yönetim aşamaları [24].



Şekil 4.3: RES projesi yol haritası [24].

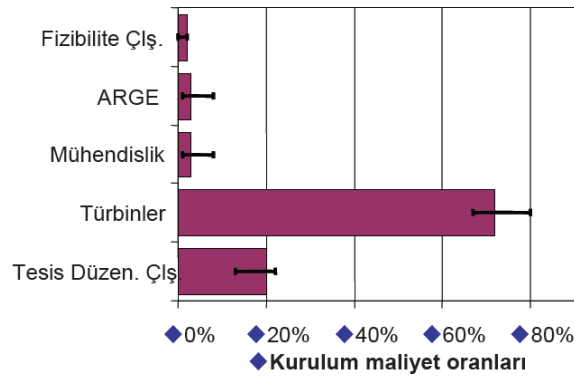
Ülkemizde enerji tesisi kurulabilmesi için öncelikle yürürlükte olan mevzuat hükümlerine göre lisans alınması gerekmektedir. 2007’ de çıkarılan bir kanunla, kurulu gücü 500kW’ ın altında olan rüzgar enerjisi üretim tesisleri için lisans alma ve şirket kurma mecburiyeti kaldırılmıştır. Üretim lisansının alınabilmesi için başvuru da istenen bir takım belgelerle birlikte hazırlanan fizibilite raporu EPDK’ya sunulur. Lisans alımı için başvurulacak otorite Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), aralarında Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ), Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE), Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. (TEDAŞ) veya bölgesel dağıtım şirketleri gibi bir takım kurumların görüşlerini de alarak gerekli prosedürleri yerine getirmektedir. Şekil 4.3’ te lisans alım süreci kısaca gösterilmektedir.

4.1 Rüzgar Enerjisi Santrali Proje Uygulaması.

RES kurulumu için gerekli izin ve lisans işlemleri tamamlandıktan ve ihtiyaç olunan finansman bulunduktan sonra santral kurulumu için 6 ana aşamadan bahsedebiliriz. Bunlar, uygun rüzgar türbini modelinin seçilmesi ve tedarik süreci, inşaat işleri, türbin ve elektrik ekipmanlarının nakliyesi, montaj, elektrik işleri ve testler ile devreye alma süreci olarak sıralanabilir.

4.1.1 Uygun rüzgar türbini modelinin seçilmesi

Saha koşulları için uygun rüzgar türbini modeli belirlendikten sonra atılacak ilk adım tedarikçilerden ilgili tekliflerin alınması ve değerlendirilmesidir. Rüzgar türbininin fiyatı RES proje maliyetinin % 70 – 80 arasında bir bölümünü oluşturmaktadır [24, 35]. Bu maliyet oranı sebebiyle türbin teklifleri iyi bir şekilde incelenmelidir. Tedarikçi ile yapılacak olan anlaşma iki ayrı başlıkta yapılmaktadır. Bunlardan birincisi satış sözleşmesidir ki bu ana ekipman satışıyla ilgili olan anlaşmadır. İkincisi ise bakım ve servis anlaşmasıdır [24, 35]. Şekil 4.4' te bir RES için ortalama kurulum maliyet oranları verilmektedir.



Şekil 4.4: RES projesi maliyet yüzdeleri [35].

4.1.2 İnşaat işleri

İnşaat işleri kapsamında bir çok iş aynı anda paralel olarak yapılabilir. Kurulum aşamasını hızlandırabilmek, iyi planlama ve doğru bir saha yönetimiyle sağlanabilir. Bu durumda saha işleyişi RES' ni kuracak olan firmanın planlama departmanı tarafından hazırlanan iş programlarına göre değişim gösterebilmektedir. İnşaat işleri, inşaat işlerini alan taşeron firmanın sahada uygun görülen bir lokasyona mobilize olmasıyla başlamaktadır. RES projelerinde inşaat işleri diğer elektrik

santrallerine göre daha çabuk sonlanmaktadır. Şantiye' nin kurulmasının ardından ulaşım ve servis yollarının yapımıyla işe başlanır. Bu ulaşım yolu, anayol ile RES' in kurulacağı saha arasındaki yolu ve türbin lokasyonlarına ulaşımı sağlayan yolları tanımlamaktadır. Ülkemiz gibi dağlık alanları çokça bulunduğu bölgelerde servis yolu yapımı çok zahmetli ve masraflı olabilmektedir. Ulaşım yolları ve servis yolları özellikle rüzgar türbinlerinin nakliyesi göz önünde bulundurulduğunda çeşitli standartlara uygun olarak yapılmalıdır. Servis yollarının yapılabilmesi için RES'teki yerleşim planının sonuçlandırılmış olması gerekmektedir. Yolların eni, taban dolgu malzemeleri ve eğimi büyük önem taşımaktadır. Keskin dönüşlerin olduğu kısımlarda yol genişletme çalışmaları yapılabilmektedir. Servis yolları hazırlandıktan sonra türbin temellerinin yapımına geçilmektedir. Şekil 4.5' te servis yollarının yapımını gösteren bir fotoğtaf bulunmaktadır. Türbin temellerinin dizaynı, türbin üreticisinden gelen yük bilgileriyle birlikte gerekli zemin etütlerini hazırlayan mühendislik firması tarafından yapılmaktadır. Öncelikle türbin temeli için kazım işlemi yapılır gerekli düzenleme işleri bitirildikten sonra türbin ile trafo arasındaki kabloların geçeceği boruların montajı yapılır ve beton dökme ile demir işlerine geçilir. Demir işleri de bitirildikten sonra kule temel parçası montajı yapılır ve son beton dökülür. Step-up trafonun konumu, türbin modeli ve çevre koşullarına göre türbin içinde veya türbin dışında olabilmektedir. Türbin içinde de iki farklı yerde konumlandırılabilir. Kulenin alt kısmında hazır modüllerin üstünde veya üst kısmında nacelle içinde bulunabilir. Buna göre eğer dışarda ise, step – up trafo temelini de yapılması gerekmektedir.



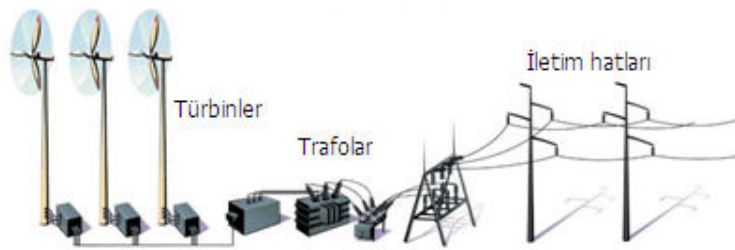
Şekil 4.5: Servis yolu inşaatı.

Rüzgar türbinleri arasındaki kablolar yeraltından döşenmektedir. Bu kabloların yeraltından döşenebilmesi için kablo kanalları hazırlanmalıdır. Kablo kanalı imalatı da standartlara uygun biçimde, toprak ve arazi koşullarına uygun şekilde yapılmaktadır. Rüzgar türbinlerinin montajı için gerekli olan vinçlerin çalıştırılabilmesi için çalışma sahasının da oluşturulması gerekmektedir. Şekil 4.6’ da türbin temelinin inşaat aşaması gösterilmektedir.



Şekil 4.6: Rüzgar türbinini temel yapımı.

Ardından gelen adım, RES’ in şebekeye bağlantısını sağlamak için yapılacak olan şalt sahasının temelinin hazırlanmasıdır. Şalt sahası, şebekeye veya trafo merkezine yakın bir bölgede kurulmalıdır. Genellikle şalt sahasının yakınına kurulan kontrol ve ofis binaları, RES içerisindeki aktivitelerin bilgisayarlar ile incelendiği bir binadır. Şekil 4.7’ te bir RES’ in şematik iletim hattı resmi verilmektedir.



Şekil 4.7: RES şematik görünüm.

4.1.3 Nakliye işleri

Daha önceki kısımda da belirtildiği gibi ülkemiz gibi dağlık ve engebeli arazi koşullarında nakliye işleri proje uygulama kısımlarının en kritik işlerinden birini oluşturmaktadır. Hatta bazen türbinlerin yerleşiminde bile nakliye konusu

düşünülerek karar verilmektedir. Nakliye zaman planlaması, montaj ve devreye alma işleri açısından son derece önemlidir. Nakliyede meydana gelecek en ufak bir aksaklık istenmeyen yeni masraflara neden olabilmektedir. Bunlar arasında, RES' in devreye alınmasının gecikmesinden dolayı meydana gelecek kayıplardan, montajı üstlenen firmanın günlük vinç ücretinin bu gecikmeden dolayı artması sayılabilir. Bu koşulların sözleşme sürecinde gö önünde bulundurulması ve gerekli cezai yaptırımların sözleşmeye eklenebilmektedir. Ek olarak, nakliye esnasında ekipmanların hasar görmemesi için taşıma esnasında da süpervizör desteği alınması gerekmektedir.

4.1.4 Montaj işleri

RES projelerinde yapılan montaj işleri toplam yatırım tutarı içerisinde büyük bir maliyet tutmamasına karşın, mühendislik açısından önemlidir. Kule, göbek, kanat, step-up trafo köşkü ve şalt sahası montajı yapılmaktadır. Hava koşulları özellikle kule montajı açısından büyük önem taşımaktadır. Rüzgar hızının belli bir seviyeden yüksek olduğu durumlarda montaj işleri yapılamamaktadır. Günümüzde uygun hava koşulları olduğu dönemlerde bir türbin montajı iki günde yapılabilmektedir. Yeterli kapasitedeki 2 adet paletli vinçin aynı anda sahada bulundurulması durumunda, hava koşullarının da iyi olmasına bağlı olarak günde bir montaj yapılması da mümkündür. Geçen yılların aksine günümüzde, ülkemizde rüzgar türbini montajı yapan firma sayısı hızla artmaktadır. Şekil 4.8 ve 4.9' da kule ve hub montajı esnasında çekilen fotoğraflar verilmektedir.



Şekil 4.8: Türbin kule montajı



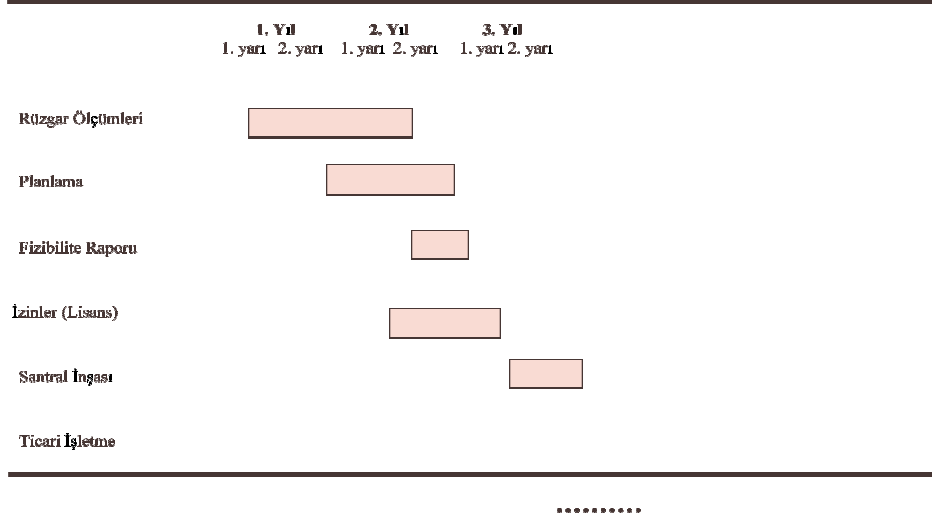
Şekil 4.9: Türbin hub ve kanatların montajı

4.1.5 Elektrik işleri

İnşaat ve montaj işlerini takiben rüzgar türbini içindeki elektrik işleri, step-up trafo, kablo döşeme, kablo bağlantıları, şalt sahası, enerji nakil hattı ve trafo merkezi bağlantısı olarak sınıflandırılabilir elektrik işleri yapılmaktadır. Türbin içi elektrik kabloları naselden kulenin en alt kısmındaki kumanda panolarına kadar çekilmekte ve türbin topraklaması yapılmaktadır. Step-up trafolarla ilgili olarak ta bazı bağlantılar ve testler yapılmaktadır. Rüzgar türbininden gelen kablolar bu noktaya bağlanmaktadır. Elektrik işleri kapsamında türbinler arasında bulunan ve step-up trafoları birbirine bağlayan kablo kanallarındaki kabloların çekimi de yapılmaktadır. Şalt sahasında ise gerekli topografik ve jeolojik etütler yapıp zemin uygun şartlarda hazırlandıktan ve inşaat işleri tamamlandıktan sonra yapılan elektriksel tasarım sonucunda meydana çıkan yerleşime uygun olarak temin edilen malzemelerin montajı yapılmaktadır. Şalt sahası için kablolama, kabul ve test işlemleri yapıldıktan sonra işletmeye alınır.

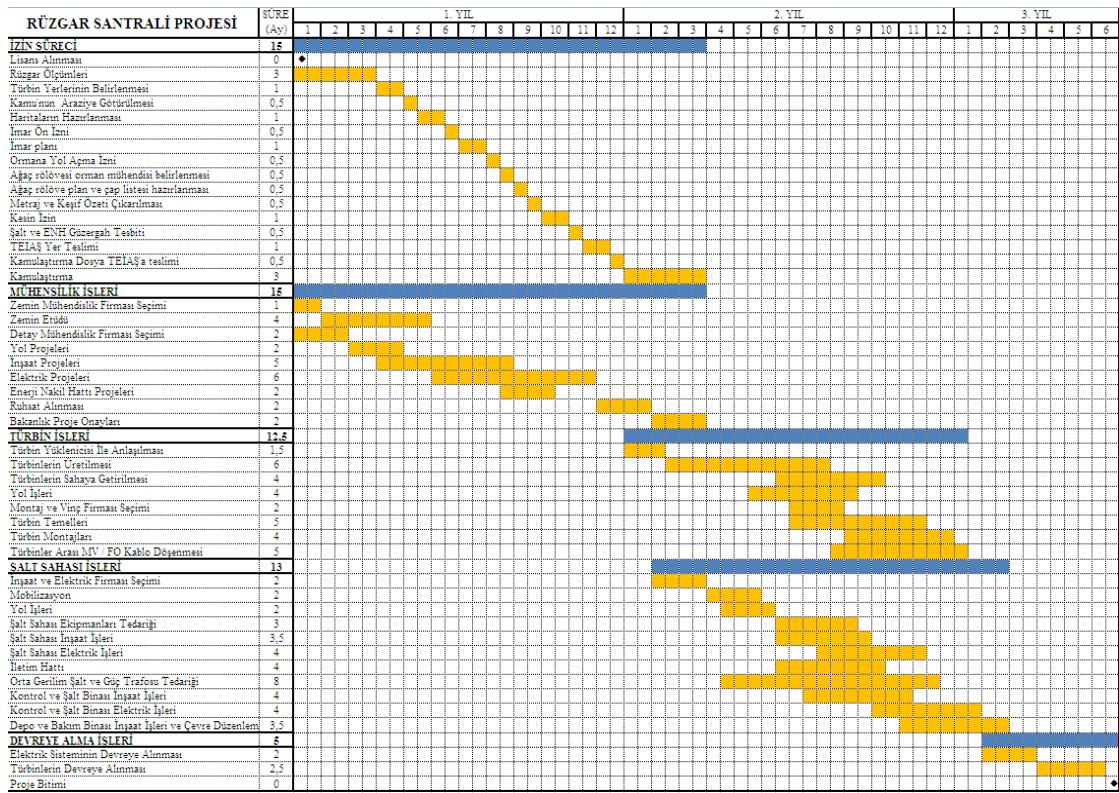
4.1.6 Devreye alma ve testler

Önceki kısımlarda bahsedilen bütün montaj, inşaat ve elektrik işleri bitirilen santralde bulunan ekipmanlara imalatçı firmaları tarafından gönderilen danışmanlar gözetiminde gerekli testleri yapılır ve devreye alma işlemi gerçekleştirilir. Şekil 4.10' da bahsedilen bütün bu aşamaları kapsayan basit bir iş planı verilmektedir.



Şekil 4.10: RES projesi gelişim süreci [24].

Bu kapsamda, ülkemizde kurulan ve en büyük kurulu güç kapasitesine sahip olan RES'lerden bir tanesinin iş planı Şekil 4.11' de verilmektedir. Bu tesis 54 adet 2500kW'lık rüzgar türbininden oluşmaktadır.



Şekil 4.11: RES projesi ayrıntılı iş planı. 54 adet 2,5MW'lık türbin için.

5. RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİNİN HESAPLANMASI

Rüzgar enerjisi potansiyelini hesaplamak için kullanılan temel denklemler aşağıda verilmektedir.

5.1 Temel Denklemler

Hareket eden bir cismin taşıdığı enerji kinetik enerjidir ve denklem 5.1'deki gibi ifade edilebilir.

$$\text{Kinetik enerji} = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \quad (5.1)$$

Denklem 5.1' de m kütleyi, v ise hızı göstermektedir. Rüzgarın hareket eden hava akımı olması nedeni ile taşıdığı enerji aynı şekilde ifade edilebilir. Burada kütle yerine birim zamandaki kütleli debi kullanılmalıdır. Kütleli debi denklem 5.2 ile gösterilmiştir.

$$\dot{m} = \rho \times A \times v \quad (5.2)$$

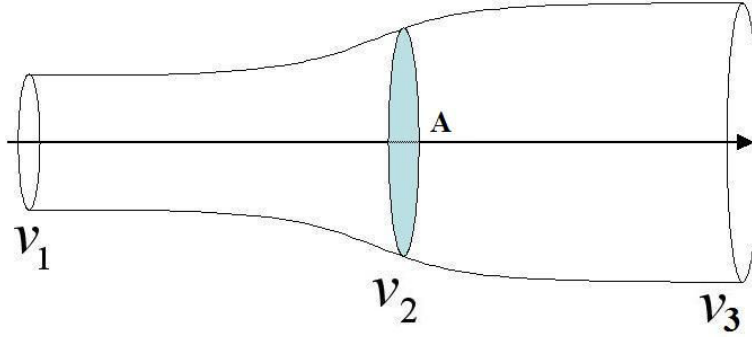
Denklem 5.2' de ρ özgül ağırlığı göstermektedir. Denklem 5.2'nin denklem 5.1'de yerine yazılması sonucunda, rüzgar enerjisinin taşımakta olduğu enerji bulunabilir ve denklem 5.3 ile aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\text{Kinetik enerji} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \quad (5.3)$$

Görüldüğü gibi rüzgar akımının taşımakta olduğu kinetik enerji hızın küpü ile orantılı olarak artmaktadır. Kinetik enerjiyi etkileyen bir diğer faktör de havanın yoğunluğudur.

Rüzgarın taşımakta olduğu hava akımının belirli bir enerjisi vardır fakat bu enerjinin hepsinden yararlanılamaz, ne kadarından yararlanılabileceği Betz kriteri ile belirlenmiştir [36]. Bir akışkan olan hava, rüzgar türbinine gelmeden önce genişlemeye başlamaktadır ve bu nedenle hızı düşmektedir. Türbine girdiğinde ise

enerjisinin bir kısmını türbine vermekte ve hızı v_3 olmaktadır. v_3 hızı ile v_1 hızı arasındaki oranlara bağlı olarak enerji üretilebilmektedir. Şekil 5.1’ de rüzgarın türbine girerken dağılması gösterilmektedir.



Şekil 5.1: Rüzgarın türbine girerken dağılması.

Rüzgar türbinine girmeden önceki rüzgarın enerjisi ile türbinden çıktıktan sonraki enerjisinin farkı rüzgar türbini tarafından çekilen enerjidir ve denklem 5.4 ile ifade edilebilir.

$$P = \frac{1}{2} \times m \times (v_1^2 - v_3^2) \quad (5.4)$$

Rotora gelen akışkanın hızının, türbine gelen akışkan ile türbinden çıkan akışkanın ortalamasında olduğu kabul edilir.

$$v_2 = \frac{(v_1 + v_3)}{2} \quad (5.5)$$

Bu durumda akışkanın kütlesi denklem 5.6 ile ifade aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$m = \rho \times A \times \frac{(v_1 + v_3)}{2} \quad (5.6)$$

Rotorun rüzgardan elde ettiği güç ise denklem 5.7 ile ifade edilebilir.

$$P_t = \frac{1}{2} \times m \times (v_1^2 - v_3^2) \quad (5.7)$$

Denklem 5.6'nın denklem 5.7 de kullanılması sonucunda denklem 5.8 elde edilir.

$$P_t = \frac{1}{4} \times \rho \times A \times (v_1 + v_3) \times (v_1^2 - v_3^2) \quad (5.8)$$

Rüzgardaki gücün rotor tarafından çekilen güce oranı ise denklem 5.9 ile aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$c_p = \frac{P_t}{P_r} = \frac{\frac{1}{4} \times \rho \times A \times (v_1 + v_3) \times (v_1^2 - v_3^2)}{\frac{1}{2} \times \rho \times A \times v_1^3} \quad (5.9)$$

Türbine giren ve türbinden çıkan hızların oranı denklem 5.10 ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{v_3}{v_1} = a \quad (5.10)$$

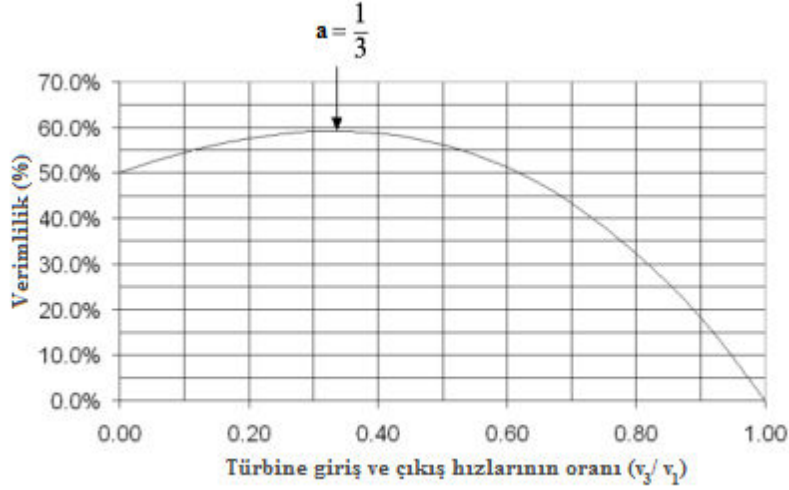
Denklem 5.9 ve denklem 5.10'un kullanılması sonucunda denklem 5.11 elde edilir.

$$\frac{dc_p}{da} = \frac{1}{2} \times (3a - 1) \times (a + 1) = 0 \quad (5.11)$$

Denklem 5.11'in çözümü ise denklem aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

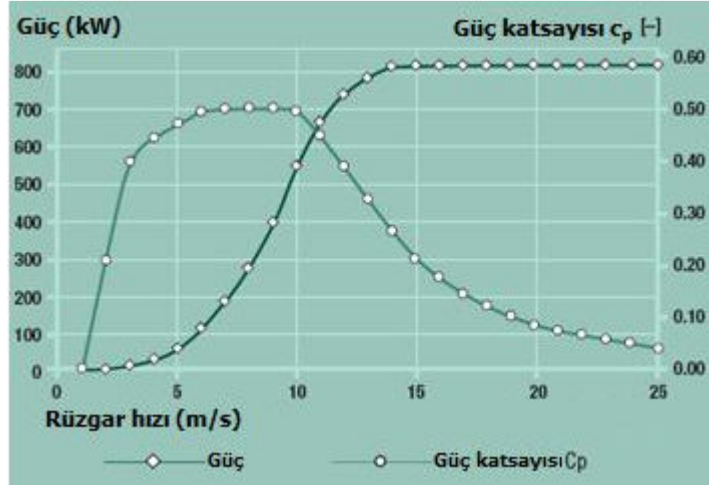
$$a = \frac{1}{3} \quad (5.12)$$

Burada P_r ; rüzgar türbini tarafından mekanik enerjiye çevrilen enerjiyi, c_p rüzgar türbini tarafından çekilen enerjinin rüzgardaki enerjiye oranını, a ; rüzgar türbinden çıkan rüzgarın ilk hızının rüzgar türbinine gelen rüzgarın ilk hızına oranını göstermektedir. Denklem 5.12 sonucunda bulunan değer, denklem 5.10'da yerine yazılması sonucunda c_p değerinin en büyük değeri olan yaklaşık (0.59) hesaplanabilir. Şekil 5.2 ile c_p katsayısının türbine giren ve çıkan akışkanın hızlarının oranına göre değişimi gösterilmektedir [37].



Şekil 5.2: Betz limitinin değişimi

Örnek olarak aşağıda Enercon firması tarafından yapılmış 800 kW gücündeki E-48 rüzgar türbininin güç ve c_p eğrisi verilmiştir.



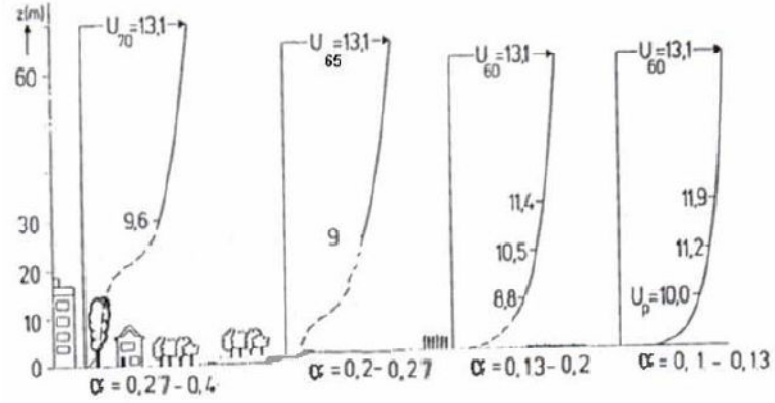
Şekil 5.3: Bir rüzgar türbininin güç ve c_p eğrisi.

5.2 Rüzgar Güç Profili Kanunu

Genellikle alınan rüzgar ölçümleri 10 ile 30 metre yüksekliğinden alınmaktadır ve en az 1 senelik saatlik ortalamalar şeklindedir. Bunun nedeni, ölçümleri standartlaştırmak ve ölçüm maliyetlerini düşürmektir.

Fakat türbinler, kuleler üzerinde ortalama en az 50 metre yüksekliğe yerleştirilirler. Rüzgarın hızı, yerden yüksekliğe bağlı olarak belirgin bir değişkenlik gösterir. Yüzey

farklılıklarının rüzgar hızındaki etkisi Şekil 5.4 'de ve Çizelge 5.1 'de gösterilmektedir.



Şekil 5.4: Yüzey farklılıklarının rüzgar hızına etkisi [25]

Çizelge 5.1: Yüzey farklılıklarının rüzgar hızına etkisi

Durum	α
Deniz Kıyı Şeridi	0,1 - 0,13
Yeşil ve Ekili Alan	0,13 - 0,2
Ağaçlı Alan	0,2 - 0,27
Yüksek Bina ve Kentsel Alan	0,27 - 0,4

10 ila 30 metrede ölçülen bu rüzgar hızlarını, türbin tahmini yerleştirme yüksekliğine çıkartılması için Helmann Yükseltme Bağıntısı kullanılır. Buna göre;

$$\frac{v_a}{v_b} = \left(\frac{h_a}{h_b}\right)^\alpha \quad (5.13)$$

olarak verilir. Burada;

v_a : İstenilen hız

v_b : Belli yükseklikte ölçülen hız

h_a : Mevcut istenen yükseklik

h_b : Hızın ölçüldüğü yükseklik

5.3 Rayleigh Dağılım Fonksiyonu

Rüzgarın belli bir periyotta değişimi ve dağılımı, enerji üretimi değerlendirmeleri için çok önemlidir. Türbin tasarımcıları; türbin iyileştirmesinde ve maliyetleri en aza

indirmede rüzgar dağılımı ve değişimi ile ilgili bilgilere gerek duyarlar. Bir yerde sadece ortalama rüzgar hızı ($v_{r_{ort}}$) biliniyorsa; Rayleigh Dağılım Fonksiyonu yardımıyla herhangi bir rüzgar hızının (v_{r_i}), esme saati (h_r) yüzdesi bulunabilir. Bunun sonucunda ortaya çıkan rüzgar hızları bir olasılık yoğunluğu dağılımıdır. Dağılım şematik olarak çizilirse bu dağılımın altında kalan alan 1'e eşittir. Çünkü, rüzgarın sıfır dahil herhangi bir hızda esme olasılığı %100'dür. Rayleigh Dağılım Fonksiyonu'na göre esme hızı saati aşağıdaki formülle bulunabilir.

$$h_r = \frac{\pi}{2} \times \frac{v_{r_i}}{v_{r_{ort}}^2} \times e^{\left[\left(\frac{-\pi}{4} \right) \times \left(\frac{v_{r_i}}{v_{r_{ort}}} \right)^2 \right]} \quad (5.14)$$

5.4 Weibull Dağılımı

Rüzgarın belli bir periyotta değişimi ve dağılımı, hem enerji üretimi değerlendirmelerinde hem de rüzgar endüstrisinde çok önemlidir. Türbin tasarımcıları, türbün iyileştirilmesinde ve maliyetleri en aza indirmede rüzgar dağılımı ve değişimi ile ilgili bilgilere gerek duyarlar. Eğer bir yıl boyunca rüzgar ölçülürse, genel olarak çok şiddetli rüzgarların nadiren, ılımlı ve şiddetli rüzgarların daha çok ortaya çıktığı görülür. Bir site için rüzgar dağılımı ya ölçülerek, ya da ölçümlere dayalı değişik nokta ve yüksekliklerde "Weibull dağılımı" ile belirlenir. Weibull dağılımı, boyutsuz şekil (k) ve rüzgar hızı ile aynı birime sahip ölçek (c) parametrelerinden oluşan iki parametrelili bir dağılımdır. İki parametrelili Weibull dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki gibidir [37,38].

$$f(u) = \frac{k}{c} \times \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \times e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} \quad (5.15)$$

burada v rüzgar hızı (m/s), k ve c sırasıyla boyutsuz şekil ve ölçek parametreleridir. Weibull dağılımının kümülatif olasılık yoğunluk fonksiyonu ise aşağıdaki denklem 5.16 ile ifade edilebilir.

$$F(u) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} \quad (5.16)$$

Rüzgar verilerinin dağılımını göstermek için yapılan çalışmalar Weibull dağılımının rüzgar verileri dağılımı için uygun olduğunu göstermiştir. Gerek ülkemizde gerekse

de diğer b6lgelerde, bir çok çalışmada rüzgar enerjisi potansiyelinin hesaplanmasında Weibull dağılımlı yaygın olarak kullanılmıştır [39]. Rüzgar verilerinin genelde bu dağılıma uyduğu bilinmektedir. Bununla birlikte bazı b6lgelerde rüzgar verileri iki parametrelili Weibull dağılımına uymamaktadır [40].

Weibull dağılımının kullanılmasındaki bir sakınca 0-1 m/s gibi kúuk hız verilerini bu dağılımın yeterince temsil edememesidir, fakat gúnümüz türbinlerinin enerji üretimine başlama hızları genelde 3-4 m/s arasında olması nedeni ile dağılımın kullanılması sonucundaki hata yok denecek kadar az olmaktadır[37].

6. RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİNDE GÖZ ÖNÜNDE BULUNDURULMASI GEREKEN FAKTÖRLER

Rüzgar enerjisi santrali kurulması planlanan bir bölgede rüzgar enerjisi potansiyelinden maksimum seviyede ve en verimli şekilde faydalanabilmek için o bölgenin rüzgar karakteristiği analiz edilmelidir. Herhangi bir bölgenin rüzgar karakteristiği analiz edilirken, saatlik ortalama, günlük ortalama, aylık ortalama, mevsimsel ortalama değerlerine ihtiyaç vardır. Ayrıca bunlara ek olarak rüzgarın esme yönü yani diğer bir deyişle rüzgar vektörünün uzaysal değişimi bilgileri de gereklidir. Daha önce de bahsedildiği gibi, bir çok çalışmada bölgenin rüzgar enerjisi potansiyeli hesaplanırken hava yoğunluğu değeri ortalama olarak $\rho = 1.225 \text{ g/cm}^3$ (deniz seviyesinde, hava sıcaklığı 15°C) alınmaktadır. Ancak yapılan araştırmalar göstermektedir ki, anlık rüzgar hızı değişimi ile birlikte hava yoğunluğu değişimi de göz ardı edilmemesi gereken bir faktördür [18,19,22]. Bu bilgiler ışığında standart sapma, türbülans, rüzgar hızı, hızların kümülatif dağılımı gibi parametreler izlenebilecektir. Ayrıca; rüzgar vektörünün zamansal değişimi, şiddetli yağmur, dolu, buzlanma, yıldırım çarpmaları ve kar gibi etkenler de rüzgar enerjisi üretiminde göz ardı edilmemesi gereken faktörlerdir. Böylelikle bütün bu bilgiler ışığında bölgede kurulacak tesis için rüzgar türbini seçimi ve yerleşim yapılabilmektedir [14]. Bu faktörlerden bazılarının rüzgar enerjisine olan etkileri Konya - Yunak Bölgesi özelinde incelenmiştir.

6.1 Yunak Bölgesinin Profili

Bu çalışma kapsamında, $38^\circ 47' 16,26''$ kuzey ve $31^\circ 56' 54,51''$ doğu koordinatlarında bulunan, Yunak bölgesinde 1986 – 2007 yılları arasında DMİ tarafından 10 metre yükseklikte ölçülen saatlik ortalama rüzgar şiddeti verileri kullanılarak bölgenin rüzgar karakteristiği incelenmiştir. Çizelge 6.1'de 1986 – 2007 yıllarındaki verilerden elde edilen bölgeye ait ortalama sıcaklık, hava yoğunluğu ve rüzgar hızı değeri verilmiştir. Şekil 6.1' de incelenen bölge harita üstünde gösterilmektedir. Şekil 6.2'den de görüldüğü gibien yıllık ortalama en yüksek rüzgar

2001 yılında en düşük ise 2006 yılındadır. Şekil 6.3'te ise 1986-2007 yılları aylık ortalama rüzgar hızları verilmektedir. Şekil 6.4' te de 1986 – 2007 yıllarına ait verilerden elde edilen mevsimsel ortalamalar verilmektedir. Buna göre ilkbahar mevsimi rüzgar hızlarının ortalama en yüksek olduğu sezondur. Sonbahar ise Yunak bölgesi için ortalama rüzgar hızının en düşük olduğu sezondur.

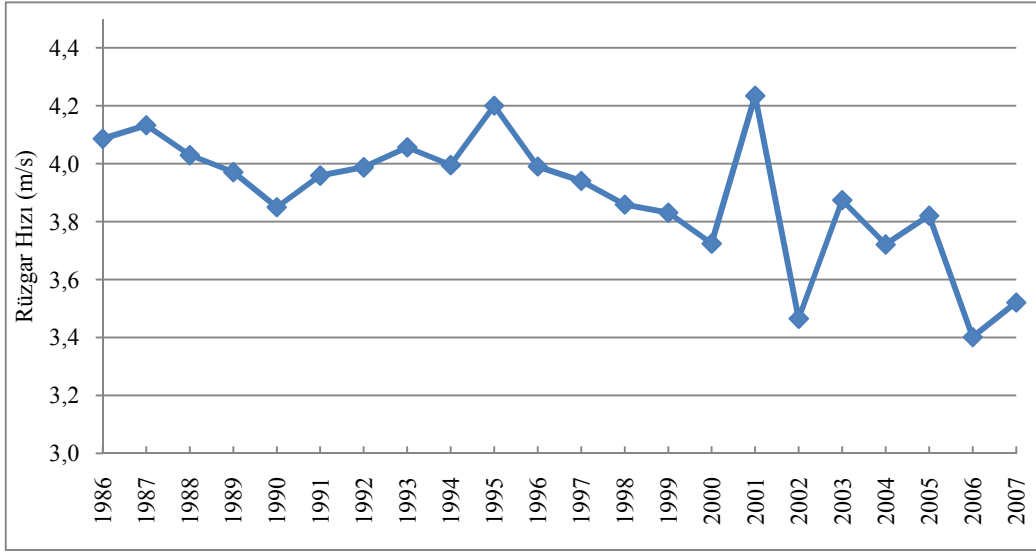
Şekil 6.5' te ise, Yunak bölgesinin yıllık ortalama sıcaklık ve hava yoğunluğu değişimi verilmektedir.

Çizelge 6.1: 1986 – 2007 yıllarına ait ortalama sıcaklık, hava yoğunluğu ve rüzgar hızı değerleri.

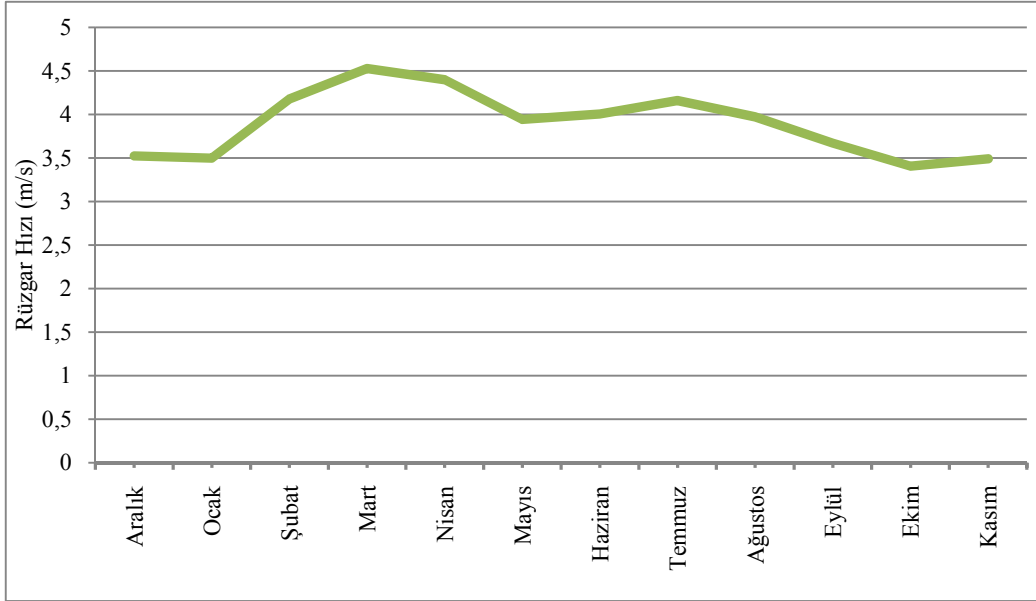
Ortalama Sıcaklık (°C)	Ortalama Hava Yoğunluğu (kg/m ³)	Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)
11,04	1,087	3,89



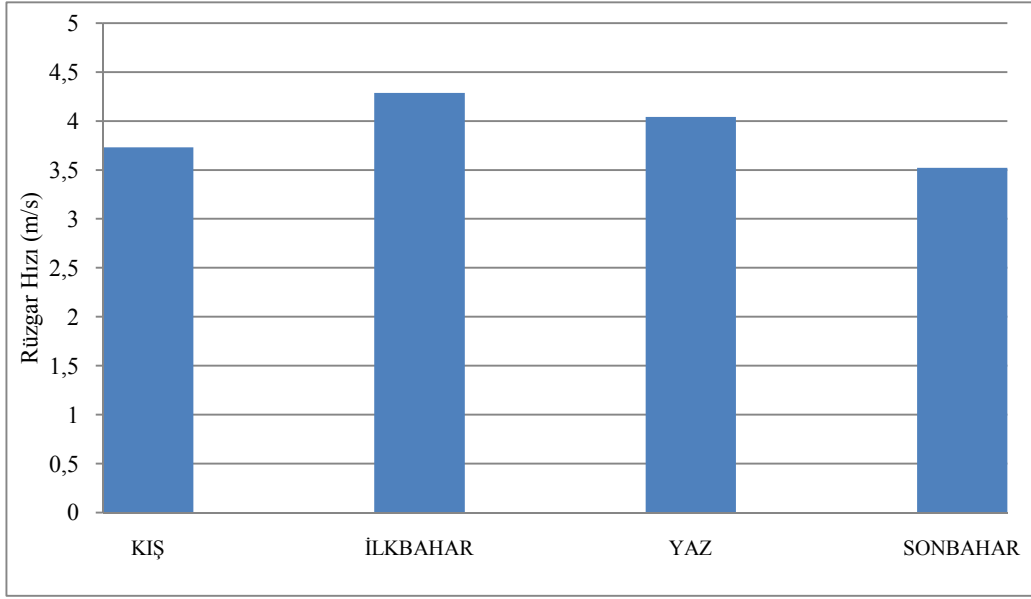
Şekil 6.1: Konya, Yunak bölgesi.



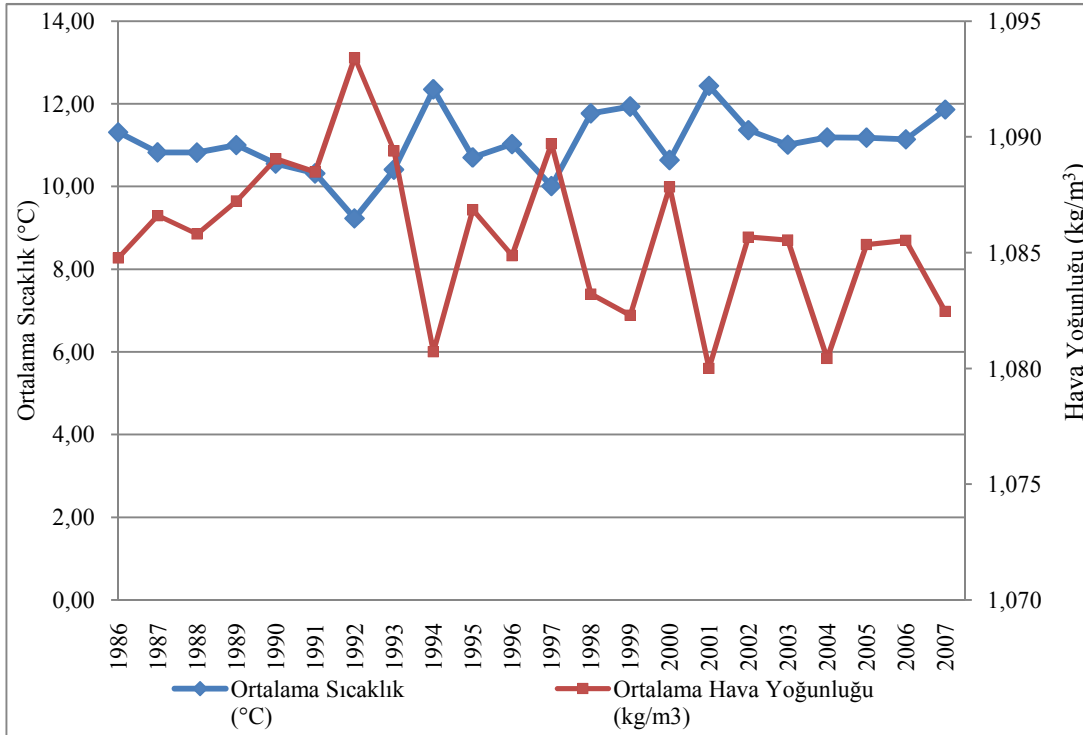
Şekil 6.2:Yunak bölgesi 1986-2007 ortalama yıllık rüzgar hızları.



Şekil 6.3:Yunak bölgesi 1986-2007 yılları ortalama aylık rüzgar hızları.



Şekil 6.4: Yunak bölgesi 1986-2007 yılları ortalama mevsimsel rüzgar hızları.



Şekil 6.5: Yunak bölgesi 1986-2007 yıllık ortalama sıcaklık ve hava yoğunluğu değişimi.

6.2 Rüzgar Hızı Persistansının Hesaplanması

Yunak bölgesinde 1986 – 2007 yılları arasında DMİ tarafından 10 metre yükseklikte ölçülen saatlik ortalama rüzgar şiddeti verileri kullanılarak bölgenin rüzgar hızı persistansı elde edilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi bir bölgenin rüzgar karakteristiğini elde ederken mümkün oldukça uzun zaman aralığına ait rüzgar verilerinin kullanılması daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır. Rüzgar hızı persistansı, herhangi bir istasyonda verilen bir zaman periyodu içerisinde ortalama rüzgar hızının sürekliliğinin veya daimliğinin bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Rüzgar hızı persistansının hesaplanması atmosferin dağıtıcı yeteneğinin araştırılması için önemlidir [16]. Literatürde persistansın hesaplanması otokorelasyon fonksiyonu yaklaşımı, koşullu olasılık yaklaşımı ve hız-süreklilik eğrisi metodlarıyla yapılmaktadır [15]. Bu yöntemlerde sadece rüzgar hızı verileri kullanılmaktadır. Koçak yaptığı çalışmalarda rüzgar hızı persistansının hesaplanmasıyla ilgili çeşitli yöntemlere değinmiştir [15,16]. Bir veriye otokorelasyon analizinin uygulanabilmesi için her şeyden önce verilerin normal dağılımlı olması gerekmektedir. Verilerin bu koşulu sağlamaması durumunda otokorelasyon katsayıları dağılımın çarpıklığına bağlı olarak hatalı tahmin edilecektir. Rüzgar hızının dağılımının normal olmadığı dikkate alınırsa otokorelasyon katsayılarının persistansın bir ölçüsü olarak kullanılması uygulamada önemli sakıncalar yaratacaktır. Bu yöntemlere ek olarak rüzgar şiddetiyle birlikte yön verilerini de göz önünde bulunduran lambert formülü bulunmaktadır. Lambert formülü, vektörel bir büyüklük olan rüzgar şiddetlerini kullanarak verilen bir istasyon için ortalama rüzgar şiddetini verir. Kısacası, Lambert formülü vektörel ortalamayı hesaplayan bir metottur. Ortalama değeri hesaplamak için gözlem değerlerinin tamamını kullanan yöntemler, veri kümesi içindeki aykırı değerlerden, dağılımın çarpıklığından ve örnekteki eleman sayısından önemli ölçüde etkilenirler. Sonuçta bir aritmetik ortalama olması nedeniyle belirtilen bu sakıncalar Lambert formülü için de geçerlidir. Rüzgar hızı persistansı hız süreklilik eğrileri kullanılarak hesaplanabilir. Hız süreklilik eğrilerinin elde edilmesinde dağılıma ait herhangi bir parametre kullanılmamaktadır, dolayısıyla dağılımdan bağımsızdır. Koçak'ın yaptığı çalışmaya göre de en pratik hesaplama yöntemi olan rüzgar hızı süreklilik eğrileri yöntemi seçilmiştir [15]. Sonuç olarak, bu çalışmada rüzgar persistansının hesaplanması için hız süreklilik eğrileri yöntemi kullanılmıştır.

6.2.1 Hız süreklilik eğrileri

Hız süreklilik eğrisi (HSE) belirli bir periyot boyunca ortalama rüzgar hızlarının kümülatif dağılım fonksiyonudur. Diğer bir deyişle, rüzgar zaman serisinden hareketle, rüzgar hızının belli bir değere eşit ya da ondan büyük olduğu zaman yüzdesi hesaplanıp yatay eksene, bunlara karşı gelen rüzgar hızları düşey eksende olmak üzere çizilirse HSE elde edilir. HSE'leri elde ederken mümkün olduğunca uzun bir gözlem periyoduna ait rüzgar verisini kullanmak gerekir [16]. HSE' den yararlanarak zamanın belirli bir yüzdesinde aşılacak rüzgar hızı grafikten okunabilir.

HSE'nin düşey ekseninin küpü alınarak güç süreklilik eğrisine dönüştürülebilir. Bu durumda eğri altındaki alanlar yıllık enerji miktarıyla orantılı olacağından, farklı bölgelere ait güç süreklilik eğrilerinin karşılaştırılması mümkün olacaktır. HSE aşağıda verilen şekilde hesaplanmaktadır:

$$T_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \theta(v_j - i \times \Delta v); \quad i = 1,2,3, \dots, D; \quad j = 1,2,3, \dots, N \quad (6.1)$$

$$D = \frac{(v_{maks} - v_{min})}{\Delta v} \quad (6.2)$$

Eşitlikte bulunan θ Heaviside adım fonksiyonudur ve aşağıda verildiği gibi tanımlanır:

$$\theta(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (6.3)$$

Zaman yüzdesini gösteren T_i değerlerinin $i \times v_i$ değerlerine karşı çizilmesiyle hız süreklilik eğrisi elde edilmiş olur.

6.2.1.1 Teorik ideal hız süreklilik eğrileri

Teorik ideal hız süreklilik eğrileri (TİHSE), sabit bir rüzgar hızına karşılık gelen HSE olarak tanımlanabilir. TİHSE aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanabilir:

$$T_i = v_*; \quad i = 1,2,3, \dots, D \quad (6.4)$$

Bu bağıntıda verilen v_* , tüm periyot boyunca sabit olan rüzgar hızını ifade etmektedir. 6.1 eşitliğini uygulamadan önce veriler boyutsuzlaştırılmalıdır. Bu koşul bütün rüzgar verilerinin kendi ortalama rüzgar hızları ile bölünmesi yoluyla yerine

getirilebilir. Bu, farklı HSE' ler ile TİHSE' nin karşılaştırılması ve aralarındaki hataların hesaplanmasını mümkün kılar. Boyutsuz rüzgar verileri durumunda TİHSE aşağıda yazıldığı gibi ifade edilebilir:

$$T_i = 1; i = 1,2,3, \dots, D \quad (6.5)$$

HSE ve TİHSE grafiklerinin aynı koordinat eksenlerinde çizilmesi, aralarındaki hatanın hesaplanmasına olanak verir. Verilen bir istasyon için HSE ile TİHSE tamamen çakışıyorsa, bu istasyonun ideal bir rüzgar hızı persistansına sahip olduğu söylenebilir. Böylece, verilen rüzgar verileri için HSE ve TİHSE arasındaki hata değerleri, persistans özelliklerini belirlemek amacıyla uygun bir kriter olarak kullanılabilir. Bu çalışmada hata değerleri aşağıda verilen karekök ortalama hata formülü ile hesaplanmıştır:

$$e = \sqrt{\frac{1}{D} \sum_{i=1}^D (v_i - 1)^2} \quad (6.6)$$

$$i = 1,2,3, \dots, D$$

Bu eşitlikte, v_i , T_i 'ye karşılık gelen boyutsuz rüzgar hızı değerlerini göstermektedir. e ' nin küçük değerleri yüksek persistansa karşılık gelmektedir. Hata değerlerinden persistans aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir [16]:

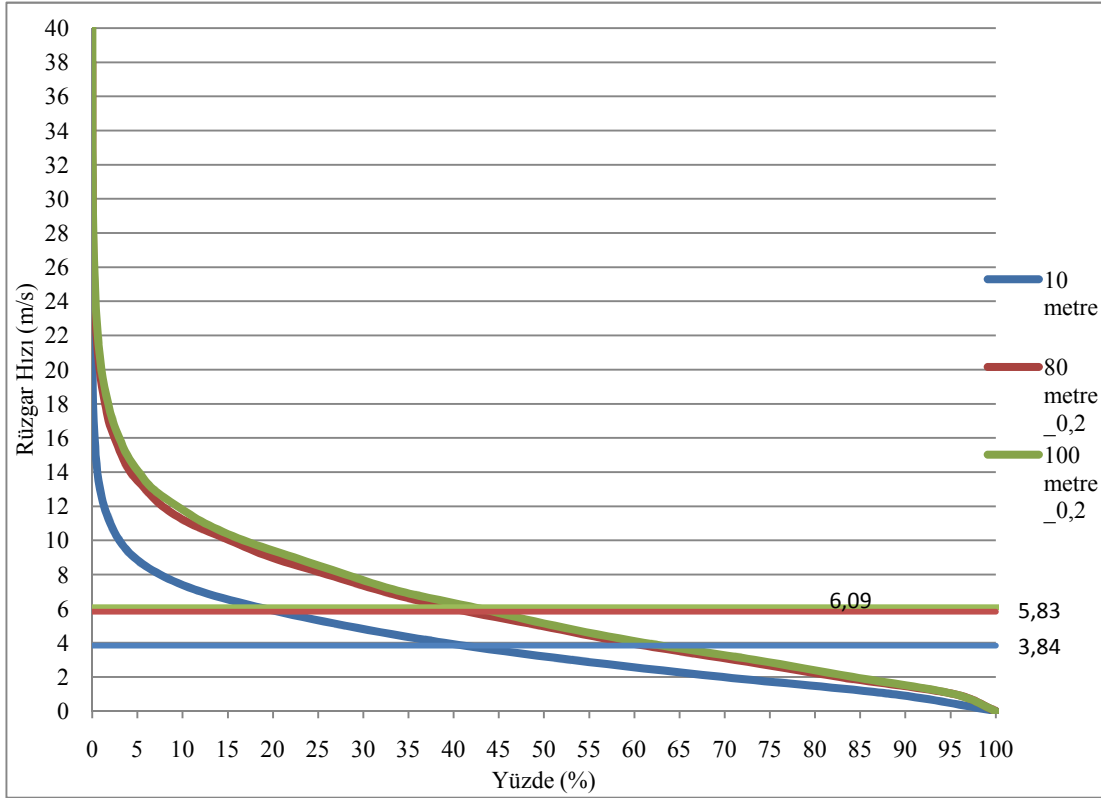
$$p = 1/e \quad e \neq 0 \quad (6.7)$$

Burada p verilen bir istasyon için persistans değerini, e ise o istasyon için hata değerini temsil etmektedir.

6.2.2 Yunak bölgesi için rüzgar hızı persistansının belirlenmesi

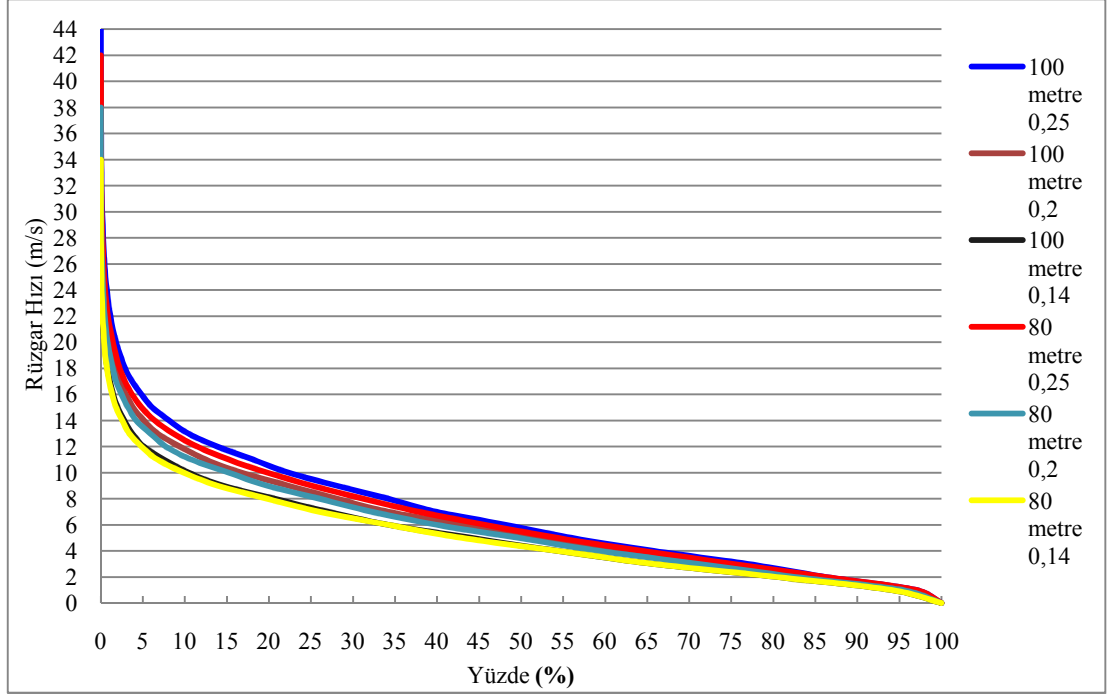
Yunak bölgesindeki rüzgar hızları süreklilik eğrisinin oluşturulabilmesi için DMI' nin 1986 – 2007 yılları arasında 10 metre yükseklikte ölçülen saatlik ortalama rüzgar şiddeti verileri kullanılmıştır. Bu bölümde eldeki rüzgar verilerine değişik Helmann katsayıları (α) ile rüzgar güç profili kanunu uygulanmıştır. Veriler, kaydedildiği yükseklikten 80 ve 100 metreye yükseltirken α değeri 0,14, 0,20 ve 0,25 alınarak ayrı ayrı hesaplamalar yapılmıştır. Şekil 6.6' da Yunak bölgesi için yapılan hesaplamalar sonucu oluşturulan HSE grafiği bulunmaktadır. Burada 10 metrede

ölçülen rüzgar hızlarıyla oluşturulan HSE ve α değeri 0,2 alınarak 80 ve 100 metreye yükseltile rüzgar hızlarıyla oluşturulan HSE grafiği çizilmiştir. Ayrıca Şekil 6.6' da 10, 80 ve 100 metre için ortalama rüzgar hızları da verilmektedir. Şekil 6.7' de ise aynı bölge için çeşitli HSE' ler çizilirken 10 metredeki rüzgar hızları 80 ve 100 metreye farklı α ' lar (0,14, 0,20 ve 0,25) kullanılarak yükseltilmiştir.



Şekil 6.6: Yunak bölgesi 10 m, 80 m ve 100 m için HSE' si (1986 - 2007).

Literatürde HSE' ler herhangi bir istasyona ait eksik rüzgar verilerinin tamamlanması amacıyla da kullanılmaktadır ancak bunun için verisi tamamlanacak istasyonun çevresinde 5 kaynak istasyonunun olması istenmektedir. Bu çalışmada hız süreklilik eğrisi ile sadece bir istasyondan alınan veriler ışığında bölgenin rüzgar karakteristiği irdelenmiştir.



Şekil 6.7: Yunak bölgesi 80 m ve 100 m için farklı katsayılarla elde edilen HSE' si (1986 - 2007).

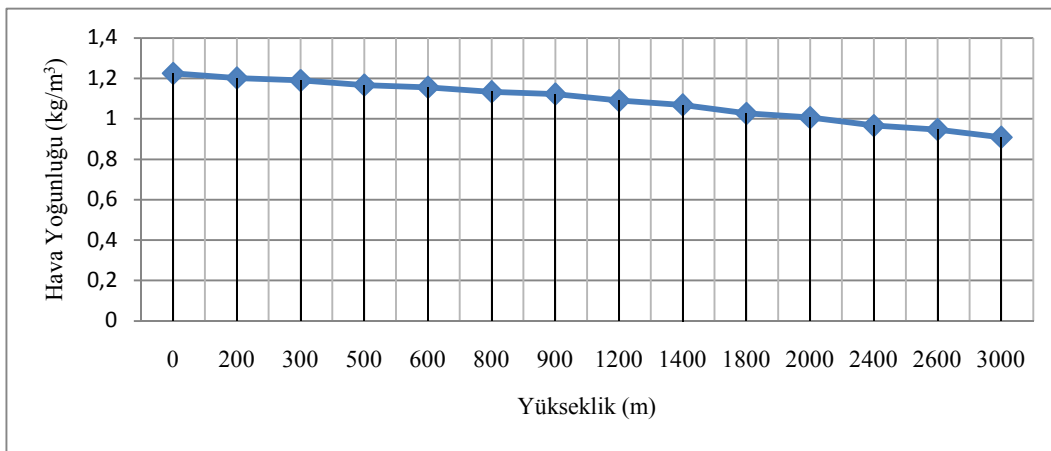
Bu analizin sonucunda değerlerin alındığı istasyonun persistansı 0,34 olarak bulunmuştur. Koçak'ın (2002) yaptığı çalışmada birden fazla istasyon için uyguladığı bu yöntemle elde ettiği persistans değerleri 0,31 ile 0,63 arasında değişmektedir. Burada dikkat çeken bir nokta persistans değerleri ile ortalama rüzgar hızı arasındaki doğrusal ilişkidir [16]. Buna göre yüksek ortalama rüzgar hızlarının olduğu bölgelerde persistans değeri de yüksek çıkmaktadır. Bu karşılaştırmanın yapılabilmesi için HSE yöntemi belirli bir bölgedeki birden fazla istasyon için uygulanmalıdır. Bu durum ancak uygulamanın birden fazla istasyona uygulandığı koşullarda görülebilmektedir. Koçak'ın sonuçlarından elde edilen bir diğer sonuç ta yüksek persistans değerlerinin ($p \geq 0,50$), elde edildiği istasyonların kıyı şeritlerinde ve yüksekliğin ortalamasının üstünde olduğu rüzgar enerjisi üretimine uygun bölgelerdir [16]. 1986 – 2007 yılları arasındaki rüzgar verilerinden ortalama rüzgar hızı 3,84 m/s olarak bulunmuştur. Sonuç olarak elde edilen persistans değeri Koçak'ın çalışmasında bulunduğu minimum değere daha yakındır ve bölgenin ortalama rüzgar hızı değeri de büyük kapasitelerde rüzgar enerjisi santrali kurmak için yeterli değildir.

6.3 Hava Yoğunluğu Değişiminin Rüzgar Enerjisi Üretimine Olan Etkisi

Daha önce de belirtildiği üzere, rüzgar enerjisi rüzgar hızının kübü ve hava yoğunluğu ile doğru orantılı olup, rüzgar hızı ve hava yoğunluğu zamana ve alana bağlı birer değişkendirler [19]. Çalışmanın bu kısmında, rüzgar enerjisi potansiyeli hesabında kullanılan formülde de yola çıkarak çeşitli etkenlere bağlı olarak hava yoğunluğunda meydana gelen değişikliklerin rüzgar enerjisi potansiyelinin hesabındaki etkisi ortaya koyulacaktır.

Hava yoğunluğu, birim hacimdeki havanın kütlesi olarak tanımlanır. Hava yoğunluğu, zaman ve konumun bir fonksiyonu olarak değişir. Hava yoğunluğunun yüksekliğe göre de değişmesi rüzgar enerjisi çalışmalarında dikkate alınmasını gerektirir. Yapılan hesaplamalarda pratik olarak hava yoğunluğu değeri $1,225 \text{ kg/m}^3$ olarak kabul edilmektedir ($P = 1013,25 \text{ hPa}$ basınç ve 288° Kelvin sıcaklıkta deniz seviyesinde) [14].

En basit rüzgar gücü denkleminde de bilindiği gibi yoğunluk işe güç doğru orantılı idi. Bundan dolayı, hava yoğunluğundaki bir azalma rüzgarın gücünde de bir azalmaya neden olur. Şekil 6.8’ den görüldüğü gibi deniz seviyesinde elde edilebilecek güç yükseğe çıkıldıkça hava yoğunluğuna bağlı olarak azalmaktadır. Bunun anlamı, 3000 m’deki rüzgar hızı, yoğunluktaki azalma ile meydana gelecek güç azalımını dengelemek için deniz seviyesindeki üzerinde olması gerektiğidir [41]. Şekil 6.8 değerlendirildiğinde ortalama yüksekliği 1000 m olan Yunak Bölgesi için hava yoğunluğunun 1.10 kg/m^3 olduğu görülmektedir.



Şekil 6.8: Yüksekliğe göre hava yoğunluğu değişimi.

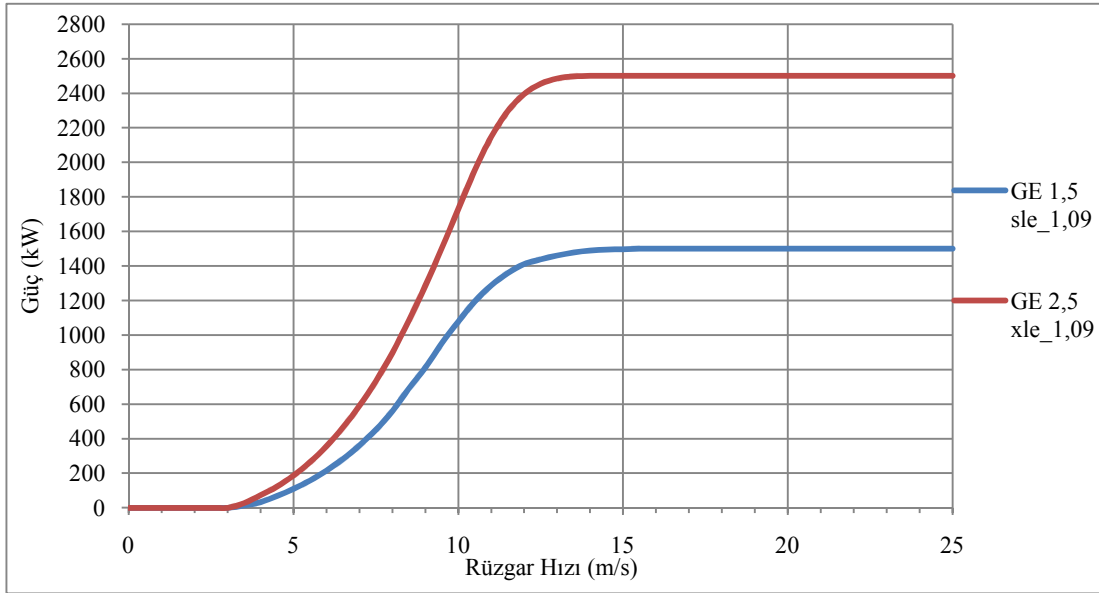
Çizelge 6.2: Bir rüzgar türbinine ait güç eğrisi.

Göbek Yükseklğinde Rüzgar Hızı (m/s)	Güç (kW)				
	Hava Yoğunluğu 1,160 kg/m ³	Hava Yoğunluğu 1,200 kg/m ³	Hava Yoğunluğu 1,225 kg/m ³	Hava Yoğunluğu 1,250 kg/m ³	Hava Yoğunluğu 1,300 kg/m ³
1	0	0	0	0	0
1,5	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
2,5	0	0	0	0	0
3	0	1	2	3	6
3,5	33	35	37	39	44
4	83	88	91	94	99
4,5	137	144	149	153	161
5	206	215	221	226	238
5,5	289	301	309	316	332
6	388	404	414	424	445
6,5	505	526	539	552	579
7	641	668	685	701	735
7,5	798	831	853	874	918
8	975	1017	1044	1073	1132
8,5	1179	1229	1261	1299	1372
9	1402	1465	1506	1542	1612
9,5	1637	1709	1755	1790	1857
10	1866	1934	1977	2009	2068
10,5	2076	2132	2165	2192	2241
11	2244	2285	2308	2329	2365
11,5	2363	2389	2403	2417	2441
12	2438	2451	2457	2466	2479
12,5	2478	2483	2484	2488	2495
13	2495	2495	2495	2496	2500
13,5	2500	2498	2498	2500	2500
14-25	2500	2500	2500	2500	2500

Örnek olarak Çizelge 6.2’ de bir rüzgar türbinin güç üretiminin rüzgar hızı ve yoğunluğa bağlı olarak değişimi verilmiştir. Buradan da görüleceği gibi rüzgar hızlarının yanı sıra, artan azalan hava yoğunluğu ile de rüzgar türbininden elde edilebilecek elektrik gücü değişmektedir. Artan yoğunluklarla üretilebilecek enerjinin arttığı, azalan yoğunluklarla ise üretilebilecek enerjinin önemli oranlarda azaldığı ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, DMİ’ den alınan 1986 - 2007 yıllarına ait Yunak bölgesi rüzgar verileri kullanılarak standart hava yoğunluğu ve yıllık ortalama hava yoğunluğu değerine göre, iki farklı rüzgar türbini modeli olan GE 2,5MW ve GE 1,5MW seçilmiş ve farklı Helmann katsayısı değerleri kullanılarak (α) (0,25, 0,2 ve 0,14) üretim sonuçları elde edilmiştir. Böylelikle 12 farklı durum elde edilmiştir. 10 metrede alınan rüzgar hızı ölçüm değerleri, GE 2,5MW için farklı Helmann katsayıları dikkate alınarak 100 metreye ve GE 1,5MW için 80 metreye yükseltilmiştir. İki türbine ait farklı hava yoğunluğu değerleri için üretici firma

tarafından oluşturulan güç eğrileri kullanılarak potansiyel enerji üretimleri hesaplanmıştır. Şekil 6.9’ da bu türbinlere ait güç eğrileri verilmektedir.



Şekil 6.9: GE 2,5 xle ve GE 1,5 sle 1,09 kg/m³ için güç eğrileri

Şekil 6.10’ da, 100 metre göbek yüksekliği olan GE 2,5 MW xle model türbin ile yine GE’ye ait 80 metre göbek yüksekliği olan 1,5 MW sle model rüzgar türbinlerinin hem standart hava yoğunluğu temel alınarak hesaplanan hem de yıllık ortalama hava yoğunluğu baz alınarak hesaplanan yıllık ortalama üretim değerleri karşılaştırılmaktadır.

Şekil 6.10’ dan da görüldüğü gibi yıllık üretim değerleri 2,5 MW’lık rüzgar türbini için daha yüksektir. Bunun yanında, iki türbini bir de kapasite faktörleri açısından karşılaştırdığımızda Şekil 6.11’den de görüleceği gibi 2,5 MW’lık rüzgar türbininin kapasite faktörünün de daha yüksek olduğu görülmektedir. Burada, türbin seçiminde önemli bir etken olan kapasite faktörünün göz önünde bulundurulmasıyla yapılacak yatırımın daha uygulanabilir olması sağlanacaktır.

Çizelge 6.3 ve 6.4’ te ise iki türbin için farklı Helmann katsayıları ve hava yoğunluğu değerleri kullanılarak elde edilen 12 farklı duruma ait hesaplanan yıllık üretim ve kapasite faktörü değerleri sunulmaktadır.

Şekil 6.12’ de 100 metre göbek yüksekliğindeki 2,5 MW’lık türbin için rüzgar hızı değerleri farklı α değerleri kullanılarak yükseltilmiş ve bu katsayının enerji üretim

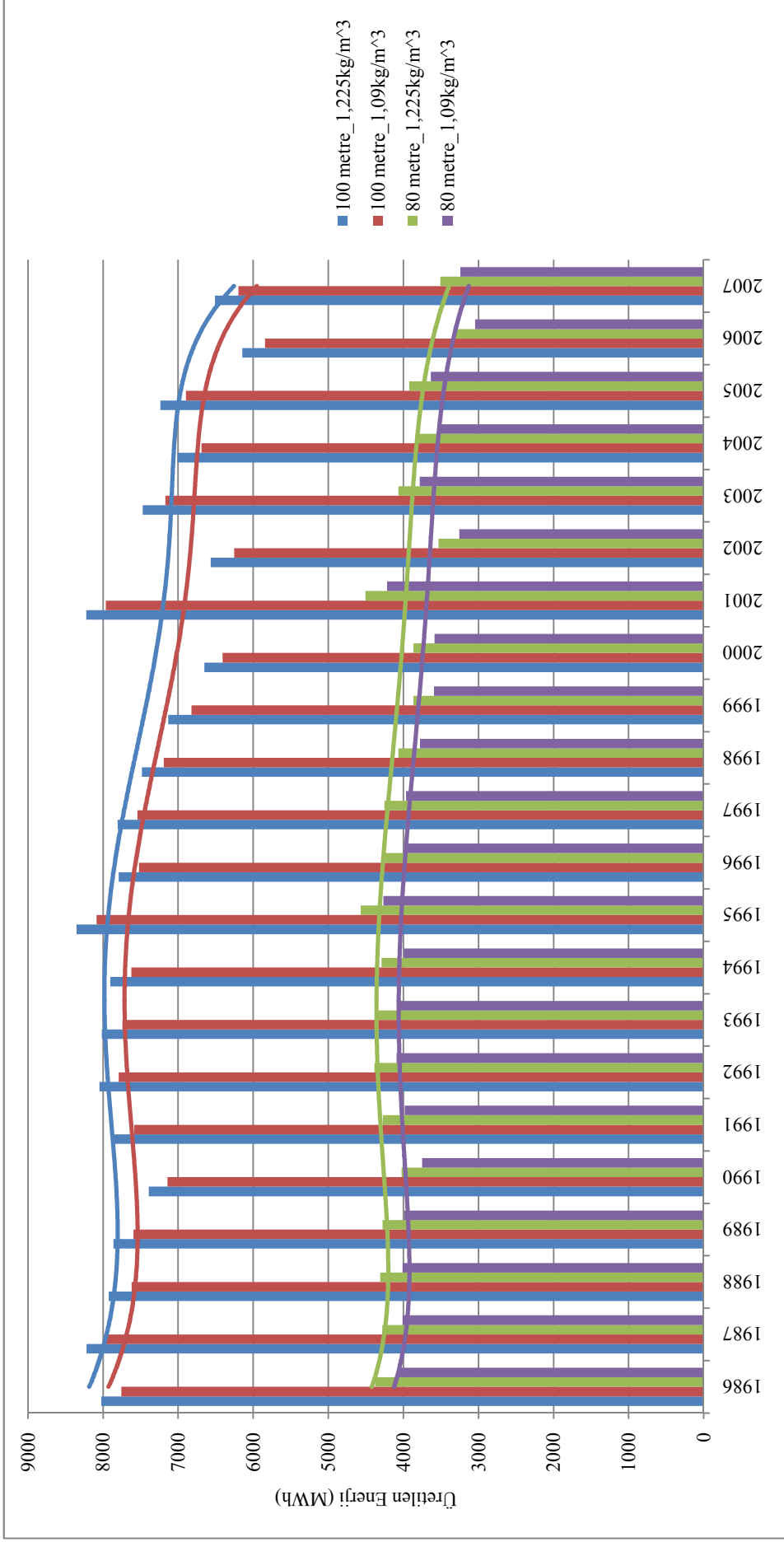
değerinin hesaplanmasına olan etkisi gösterilmiştir. Bu grafikten de görüldüğü gibi, Helmann katsayısının 0,25 ve 0,14 olduğu durumlar için 22 yılın ortalama kapasite faktörleri hesaplandığında arada % 12,07' lik bir üretim farkı oluşmaktadır. Rüzgar hızı sürekli değişim gösterdiği için enerji üretiminde yıllar arasında farklılıklar bulunmaktadır. Örnek olarak, 1986 yılına ait veriler baz alınarak 100 metre göbek yükseliğinde bir adet GE 2,5 xle rüzgar türbini kurulumu öngörüldüğünde hesap edilen yıllık üretim değeri 6488 MWh' tir. Minimum türbin ömrünün 20 yıl olduğu göz önüne alındığında 20 yıllık üretim değeri 129760 MWh olarak tahmin edilmektedir. Ancak eldeki veriler ışığında 1987 - 2006 yılları arasındaki 20 yıllık toplam üretim 122304 MWh' tir. Gerçekleşen üretim, tahmin edilene kıyasla % 5,7 daha azdır. Türbin kurulumunu takip eden yıllarda enerji üretimindeki yüzde farkları Şekil 6.13' te görülmektedir. Buna göre, 2006 yılında öngörülen yıllık üretimden yaklaşık % 27,76 daha düşük enerji üretimi söz konusudur. Sadece 1987 ve 1995 yıllarında 1986 yılına göre hesaplanan üretimden daha fazla enerji üretimi söz konusudur.

Aynı uygulamayı GE 1,5 sle modeline uyguladığımızda ise; 1986 yılı verilerine dayalı olarak yapılan hesaplamada yıllık üretim değeri 3442,9 MWh, 20 yıllık bir tahmin yapıldığında ise 68858 MWh' lik bir üretim öngörülmektedir. Ancak eldeki verilerden yapılan hesaplamalarda gerçekleşen üretimin tahmin edilenden % 6,9 daha düşük olduğu görülmektedir.

Şekil 6.14' te ise 2007 – 1986 yılları arasında hesaplanan yıllık enerji üretiminin maksimum olduğu 1995 yılı baz alındığında, ilerleyen yıllardaki enerji üretim farkları gösterilmiştir. Buna göre yıllık maksimum üretime en yaklaşan yıllar 1987 ve 2001 yıllarıdır. GE 2,5 xle model türbin için burdan çıkarılacak sonuç, maksimum üretim değerine göre bir santral kurulsaydı 20 yılın sonunda planlanan enerji üretimine göre üretimine göre % 11,1 daha az bir üretim söz konusu olacaktı. GE 1,5 sle model türbin için ise burdan çıkarılacak sonuç, maksimum üretim değerine göre bir santral kurulsaydı 20 yılın sonunda planlanan enerji üretimine göre üretimine göre % 11,4 daha az bir üretim söz konusu olacaktı. Burada göze çarpan bir başka nokta da yıllık ortalama rüzgar şiddetleri içinde 2001 yılı en yüksek değere sahipken enerji üretimi hesaplaması yapıldığında 1995 yılı daha fazla çıkmaktadır. Burdan çıkarılacak sonuç yıllık dağılımların ortalama değerlerden daha önemli olduğudur.

Şekil 6.15' de de bir önceki grafiğin aksine tahmin edilen yıllık enerji üretiminin minimum olduğu yıl temel alınmış ve buna göre farklar ortaya konulmuştur. Bu grafiğe göre, GE 2,5 xle model türbin minimum üretim değerine göre kurulmuş olsaydı santral ömrünü tamamladığında planlanandan % 28,6 daha fazla bir üretim gerçekleşmiş olacaktı. GE 1,5 sle model türbin için ise aynı şekilde yapılan hesaplamalardan çıkarılan sonuç yapılan yaklaşımla elde edilen tahmini üretim değerinin gerçekleşenden % 29,1 daha düşük olduğudur.

Son olarak, Şekil 6.16' da ise 1986-1990 yılları verilerinden hesaplanan ortalama üretim değeri GE 2,5 xle model türbin için 6373 MWh'e göre bu bölgede bir türbin kurulması planlansaydı, kurulumu takip eden yılların hangilerinde gerçekleşecek üretim hesaplanan 6373 MWh' in üstünde hangilerinde ise altında kalacağı açıkça görülmektedir. Buna göre enerji üretimi sadece 1992, 1993, 1995 ve 2001 yıllarında beklenenin üstünde gerçekleşecekti. GE 2,5 xle model türbin için 5 yıllık ortalama üretim değerine göre tahmin edilen toplam üretim değeri gerçekleşen toplam üretim değerine kıyasla % 21,4 daha fazladır. GE 1,5 sle model türbin için ise, 5 yıllık ortalama üretim değerine göre tahmin edilen toplam üretim değeri gerçekleşen toplam üretim değerine kıyasla % 20,2 daha fazladır.



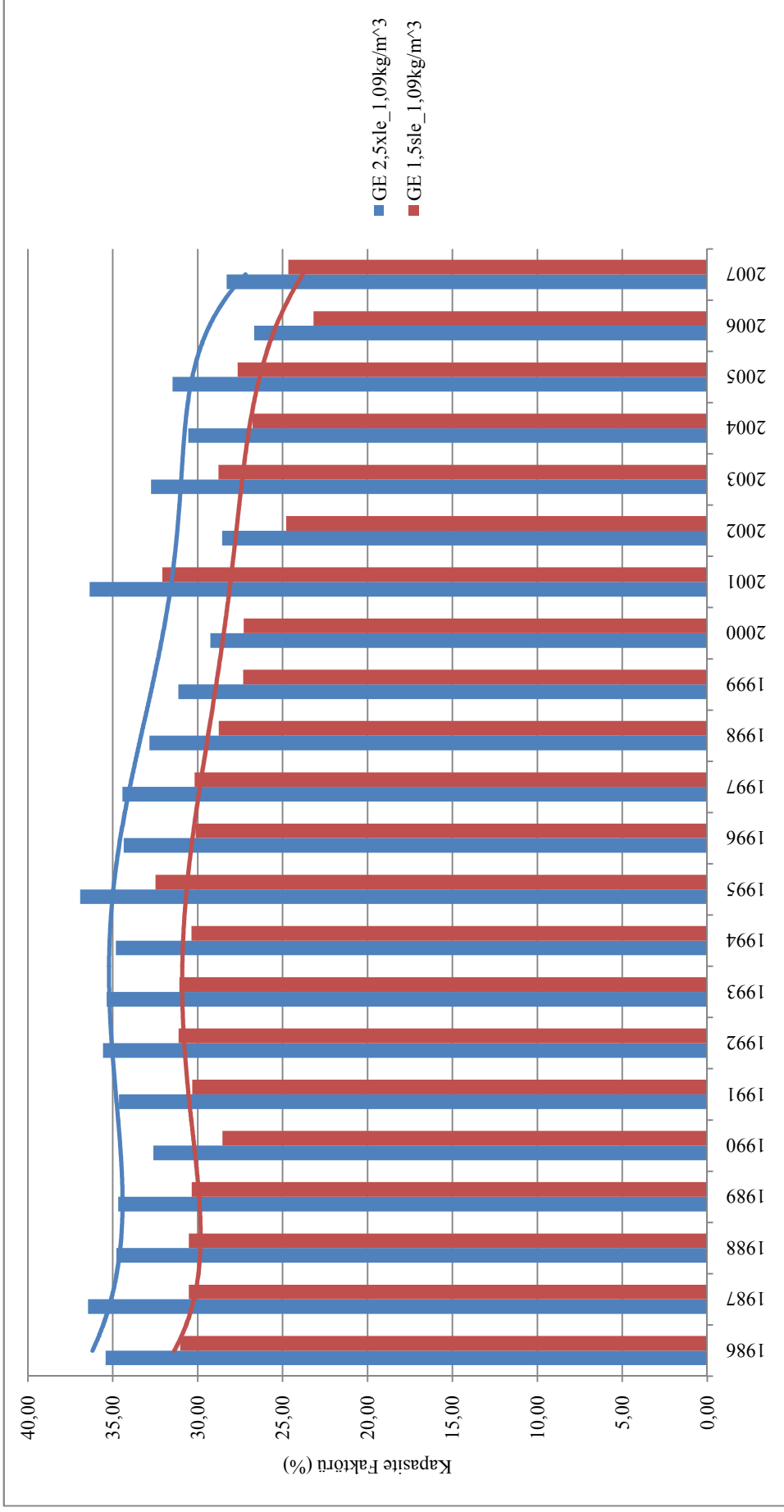
Şekil 6.10: 1986- 2007 yılları GE 2,5 MW xle ve GE 1,5 MW sle' ye ait ortalama yıllık üretim değerleri ($\alpha=0,25$).

Çizelge 6.3: 1986 – 2007 yılları GE 2,5MW xle’ ye ait yıllık üretim ve kapasite faktörü değerleri.

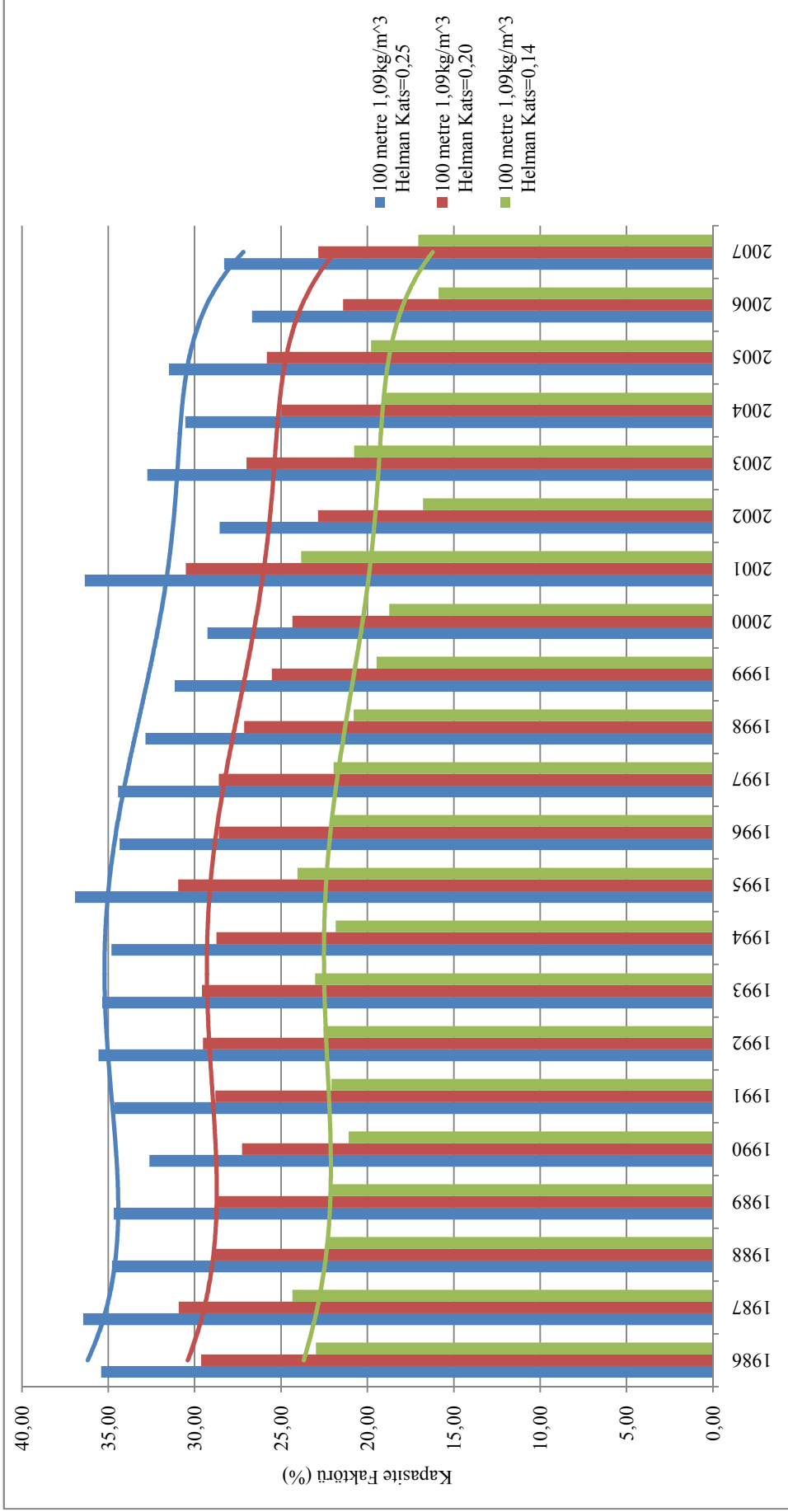
Türbin Modeli	Helmann Katsayısı	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
GE 2,5 xle 100 metre 1,225 kg/m ³	0,25	8022	8219	7923	7860	7389	7850	8048	8015	7903	8355	7793	7804	7481	7132	6649	8224	6566	7473	7008	7237	6146	6508
	0,20	6788	7039	6647	6619	6241	6614	6787	6784	6621	7092	6569	6581	6258	5922	5589	6999	5354	6249	5801	5988	5006	5332
	0,14	5349	5640	5201	5171	4918	5172	5298	5361	5136	5615	5154	5144	4870	4581	4379	5564	4006	4865	4468	4639	3769	4045
	0,25	36,63	37,53	36,18	35,89	33,74	35,84	36,75	36,60	36,09	38,15	35,58	35,64	34,16	32,57	30,36	37,55	29,98	34,12	32,00	33,05	28,06	29,72
	0,20	30,99	32,14	30,35	30,22	28,50	30,20	30,99	30,98	30,23	32,38	29,99	30,05	28,58	27,04	25,52	31,96	24,45	28,53	26,49	27,34	22,86	24,35
GE 2,5 xle 100 metre 1,225 kg/m ³	0,14	24,42	25,75	23,75	23,61	22,46	23,62	24,19	24,48	23,45	25,64	23,54	23,49	22,24	20,92	20,00	25,41	18,29	22,22	20,40	21,18	17,21	18,47
	0,25	7757	7984	7618	7594	7142	7585	7790	7743	7624	8085	7522	7541	7192	6821	6406	7963	6253	7170	6690	6895	5841	6197
	0,20	6488	6773	6327	6307	5970	6307	6463	6479	6292	6779	6263	6264	5943	5591	5330	6684	5005	5914	5469	5656	4687	5004
	0,14	5033	5331	4869	4824	4619	4834	4936	5043	4781	5265	4820	4808	4554	4265	4102	5219	3675	4549	4165	4333	3476	3736
	0,25	35,42	36,46	34,79	34,68	32,61	34,63	35,57	35,36	34,81	36,92	34,35	34,43	32,84	31,15	29,25	36,36	28,55	32,74	30,55	31,48	26,67	28,30
GE 2,5 xle 100 metre 1,09 kg/m ³	0,20	29,63	30,93	28,89	28,80	27,26	28,80	29,51	29,59	28,73	30,95	28,60	28,60	27,14	25,53	24,34	30,52	22,86	27,01	24,97	25,83	21,40	22,85
	0,14	22,98	24,34	22,23	22,03	21,09	22,08	22,54	23,03	21,83	24,04	22,01	21,95	20,79	19,48	18,73	23,83	16,78	20,77	19,02	19,79	15,87	17,06
	Kapasite Faktörü (%)																						

Çizelge 6.4: 1986 – 2007 yılları GE 1,5MW sle’ ye ait yıllık üretim ve kapasite faktörü değerleri.

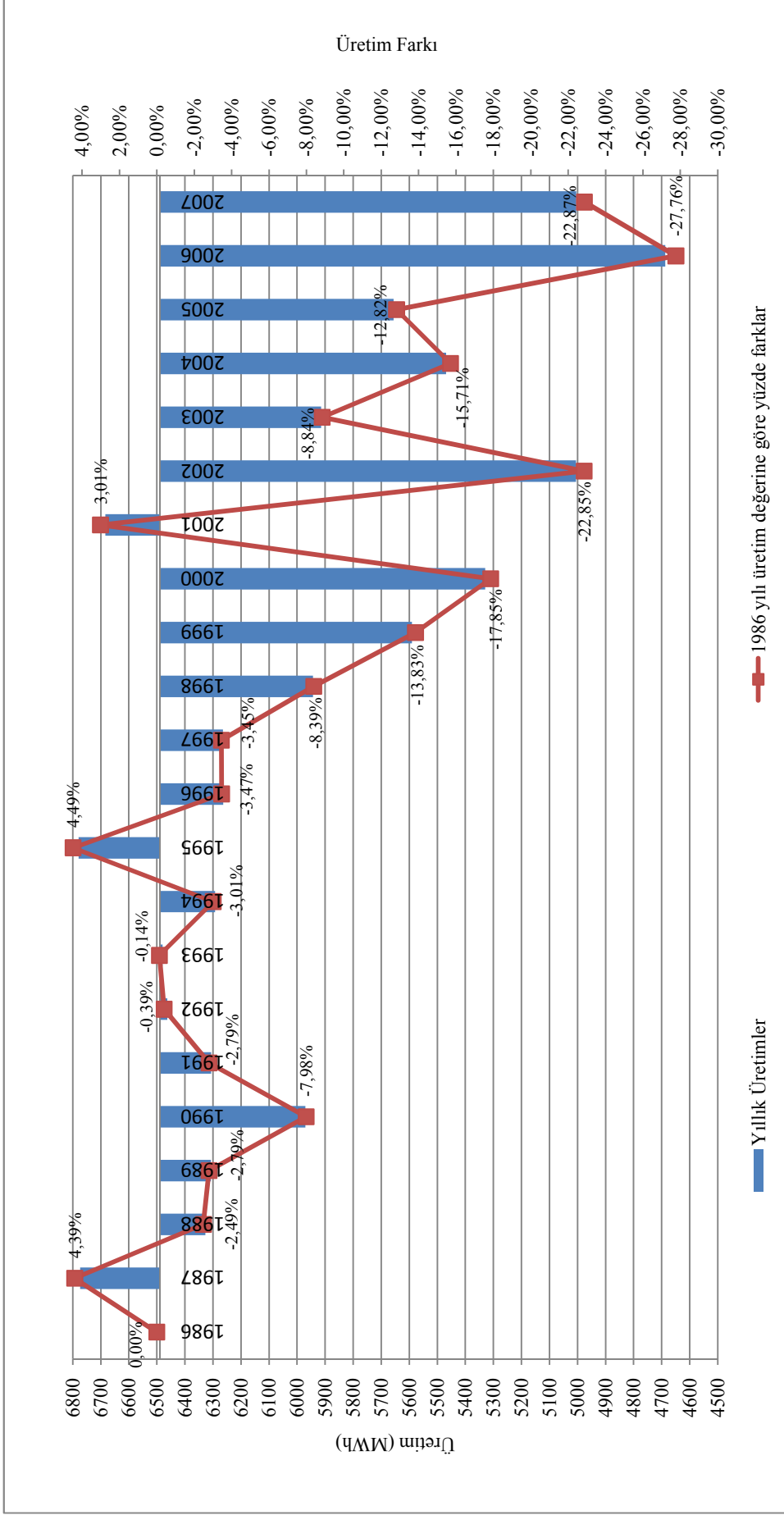
Türbin Modeli	Helmann Katsayısı	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
GE 1,5 sle 80 metre 1,225 kg/m ³	0,25	4376	4282	4308	4278	4023	4275	4385	4378	4292	4567	4245	4252	4065	3867	3866	4504	3533	4066	3796	3921	3304	3509
	0,20	3724	3689	3647	3631	3424	3627	3724	3729	3621	3905	3607	3611	3429	3245	3240	3860	2907	3429	3172	3280	2719	2904
	0,14	2978	2994	2896	2879	2735	2879	2951	2991	2850	3137	2872	2866	2710	2554	2531	3116	2216	2712	2486	2585	2086	2244
GE 1,5 sle 80 metre 1,225 kg/m ³	0,25	33,31	32,59	32,78	32,56	30,62	32,53	33,37	33,31	32,66	34,75	32,31	32,36	30,94	29,43	29,42	34,27	26,89	30,94	28,89	29,84	25,14	26,71
	0,20	28,34	28,08	27,76	27,63	26,06	27,60	28,34	28,38	27,56	29,72	27,45	27,48	26,10	24,69	24,66	29,38	22,13	26,10	24,14	24,96	20,69	22,10
	0,14	22,66	22,79	22,04	21,91	20,81	21,91	22,46	22,76	22,76	21,69	23,87	21,86	21,81	20,63	19,43	19,26	23,71	16,87	20,64	18,92	15,87	17,08
GE 1,5 sle 80 metre 1,09 kg/m ³	0,25	4078	4011	4010	3989	3751	3983	4089	4083	3991	4268	3958	3965	3779	3591	3585	4216	3256	3781	3518	3634	3045	3241
	0,20	3443	3430	3366	3354	3166	3351	3440	3454	3338	3621	3336	3332	3160	2989	2978	3588	2652	3160	2916	3022	2484	2661
	0,14	2728	2753	2648	2626	2503	2629	2690	2739	2595	2876	2625	2617	2476	2330	2299	2864	1998	2477	2266	2360	1887	2035
GE 1,5 sle 80 metre 1,09 kg/m ³	0,25	31,04	30,52	30,52	30,36	28,55	30,32	31,12	31,07	30,37	32,48	30,12	30,18	28,76	27,33	27,29	32,08	24,78	28,77	26,77	27,65	23,17	24,66
	0,20	26,20	26,10	25,62	25,53	24,10	25,50	26,18	26,28	25,40	27,56	25,39	25,36	24,04	22,74	22,66	27,30	20,18	24,05	22,19	23,00	18,91	20,25
	0,14	20,76	20,95	20,15	19,99	19,05	20,01	20,47	20,84	19,75	21,89	19,98	19,92	18,84	17,74	17,49	21,79	15,20	18,85	17,25	17,96	14,36	15,49



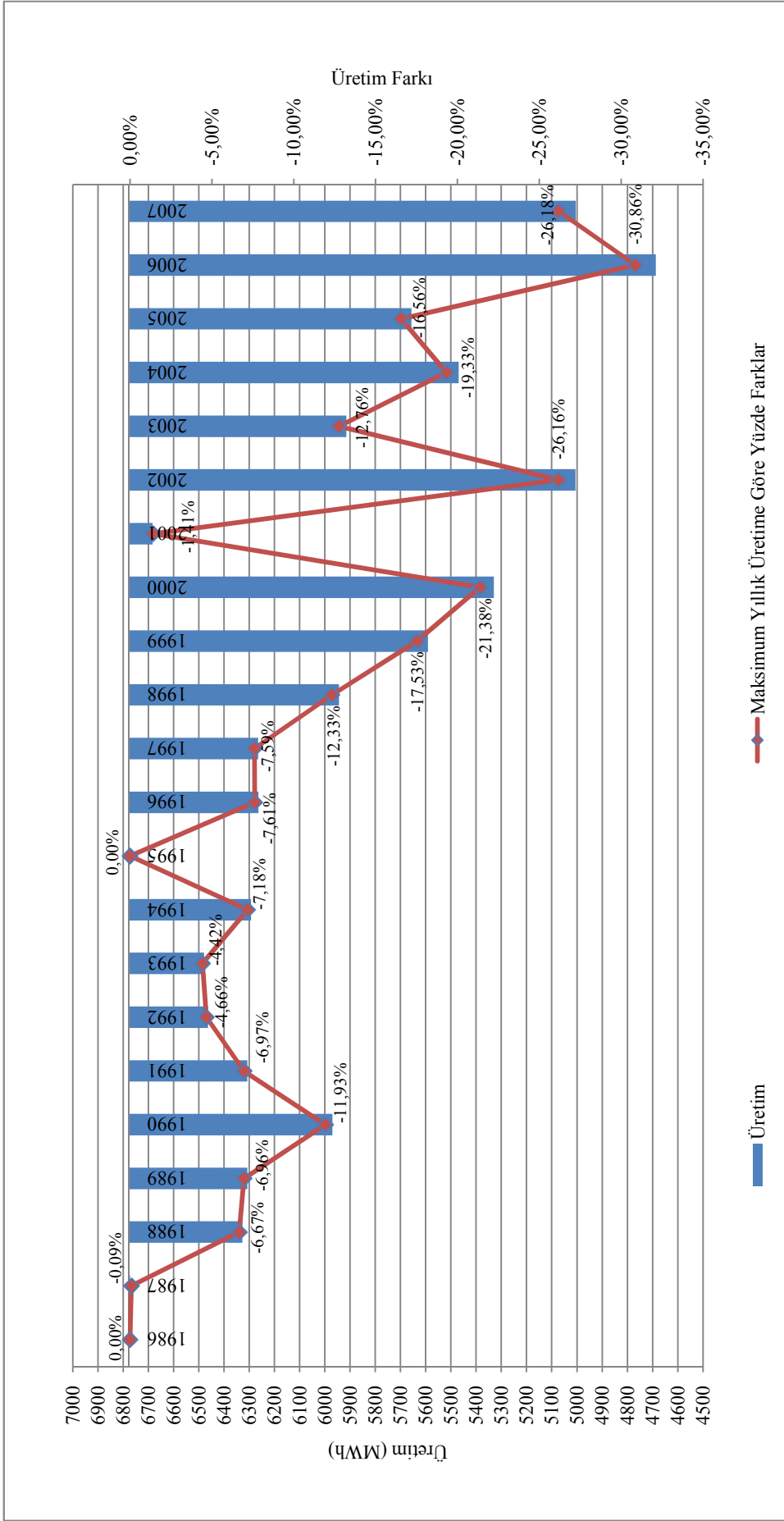
Şekil 6.11: 1986 - 2007 yılları, GE 2,5 MW x 100 m ve GE 1,5 MW sle' ye (80 m) ait yıllık kapasite faktörleri ($\alpha=0,25$).



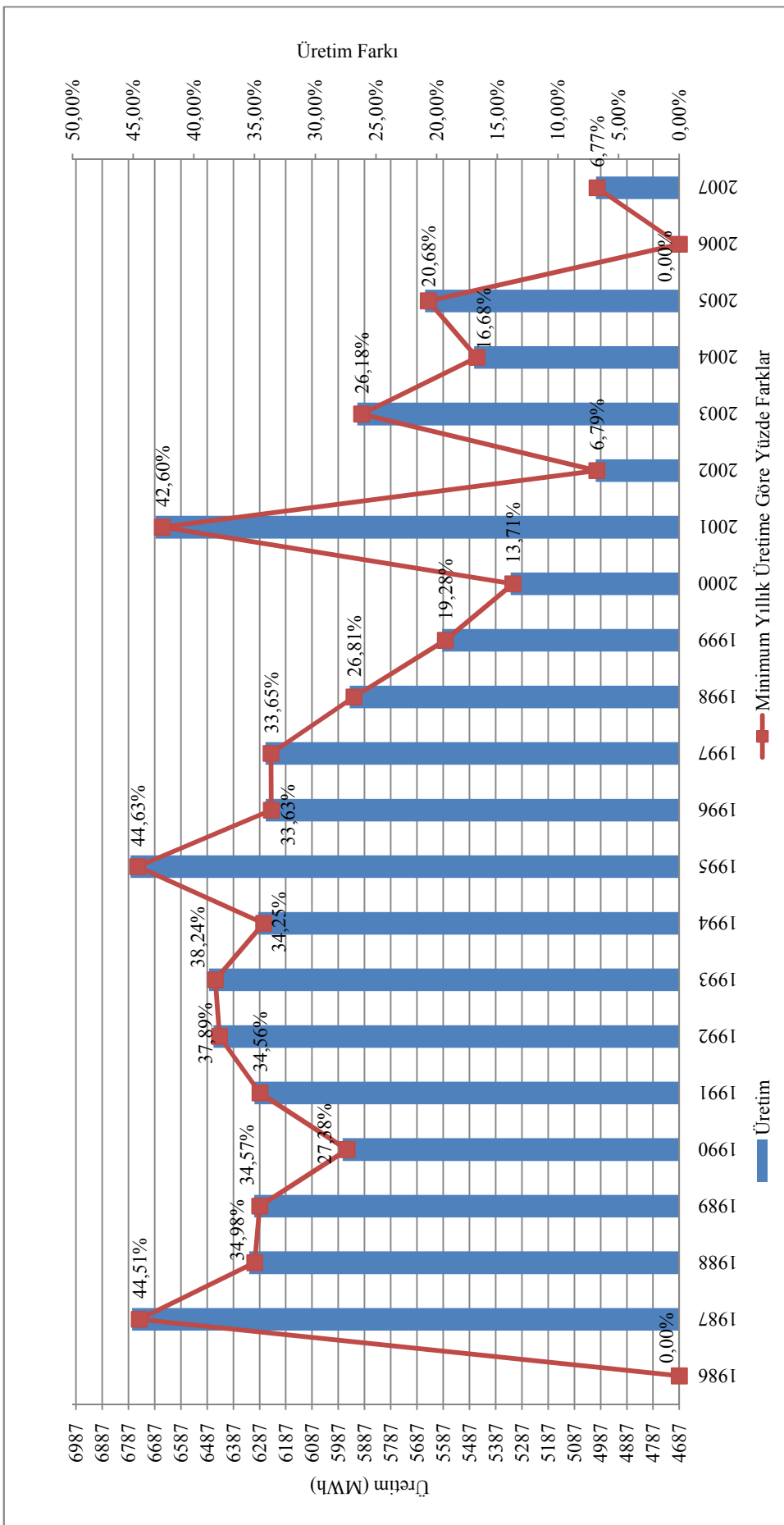
Şekil 6.12: Farklı Helmann katsayısı kullanılarak elde edilen üretim değerleri (GE 2,5MW).



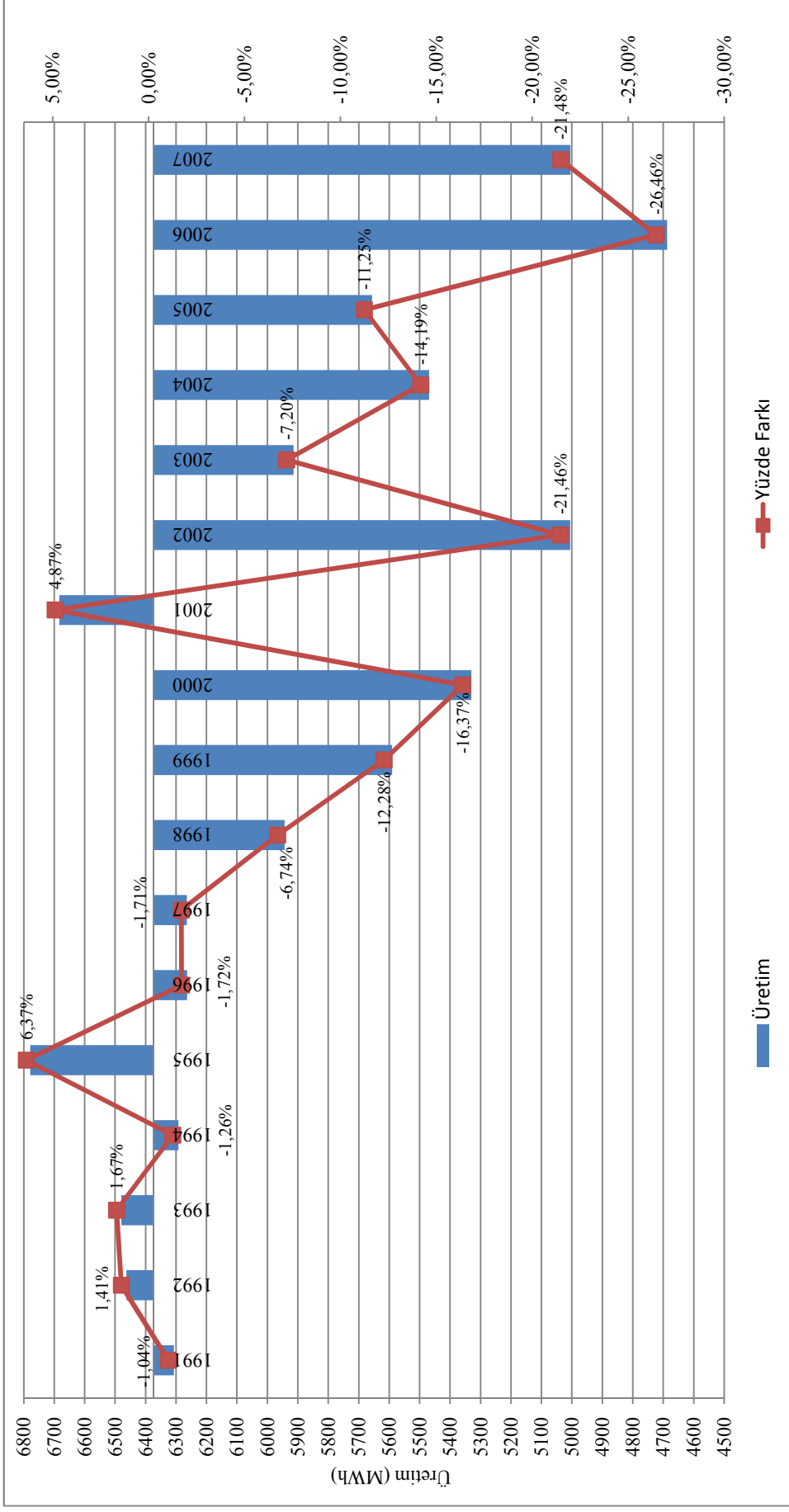
Şekil 6.13: 1986 yılı tahmin edilen üretim değerine göre yıllık enerji üretim farkları (100 metre, $\rho= 1,09 \text{ kg/m}^3$, $\alpha=0,20$).



Şekil 6.14: Maksimum üretim değerine göre yıllık enerji üretim farkları (GE 2,5MW, 100 metre, $\rho= 1,09 \text{ kg/m}^3$, $\alpha=0,20$).



Şekil 6.15: Minimum üretim değerine göre yıllık enerji üretim farkları (GE 2,5MW, 100 metre, $\rho=1,09 \text{ kg/m}^3$, $\alpha=0,20$).



Şekil 6.16: 1986–1990 yılları ortalama üretim değerine göre yıllık enerji üretimi farkları (GE 2,5MW, 100 metre, $\rho=1,09 \text{ kg/m}^3$, $\alpha=0,20$).

Ayrıca literatürde rüzgar potansiyelinin hesabında kullanılan ve hava yoğunluğunun rüzgar hızına bağlı değişimini inceleyen bir stokastik yöntem de mevcuttur. Şen (2000) ve Essa ile Mubarak (2006), yaptıkları çalışmalarda rüzgar enerjisi potansiyelinin hesaplanması için sadece rüzgar hızındaki stokastik değişiklikleri değil buna bağlı olarak hava yoğunluğundaki değişiklikleri de göz önünde bulunduran bir yöntemi önermektedirler [19,21]. Bu denklemde rüzgar hızı ve hava yoğunluğunun çapraz stokastik özellikleri hesaba katılmaktadır [19]. Bilindiği gibi klasik rüzgar güç yoğunluğu formülü W/m^2 cinsinden aşağıdaki gibidir:

$$E = \frac{1}{2} \times \rho \times v^3 \quad (6.8)$$

Burada ρ kg/m^3 biriminde hava yoğunluğunu, v ise m/s verilen zaman periyodu için rüzgar hızını simgelemektedir. Ancak sonlu zaman serilerinde eşitlik 6.8' in uygulanması mümkün değildir çünkü buradaki rüzgar hızı anlıktır, hava yoğunluğu sabittir ve iki değer birbirinden bağımsız olduğu ifade edilmektedir. Sonlu zaman serilerinde bir uygulama yapabilmek için rüzgar gücü yoğunluğu formülünün eşitlik 6.9'da gösterildiği gibi ortalama rüzgar enerjisi şeklinde ifade edilmesi daha doğrudur [19]. 6.8 Eşitliğinde hava yoğunluğunun değişimi mutalaka göz önünde bulundurulmalıdır [21].

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \times \bar{\rho} \times \bar{v}^3 \quad (6.9)$$

Burada $\bar{\rho}$ ve \bar{v}^3 sırasıyla, hava yoğunluğunun ve rüzgar hızının kübünün aritmetik ortalamasıdır. Stokastik terminolojide bu ifade aşağıdaki gibi de yazılabilir:

$$E(E) = \frac{1}{2} \times E(\rho) \times E(v^3) \quad (6.10)$$

Eşitlik 6.10' teki $E(.)$ ifadesi, beklenen değer anlamında olup uzun zaman serilerinin aritmetik ortalaması anlamına gelmektedir [19]. Bağımlı random değişken teorisine göre [22], eğer hava yoğunluğu ve rüzgar hızı birbirine bağlı değişkenler ise, 6.10 eşitliği şu şekilde yazılabilir:

$$E(E) = \frac{1}{2} \times E(\rho v^3) \quad (6.11)$$

Genellikle iki bağımlı random değişkenin çarpımı stokastik kovaryans tanımıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Cov(\rho, v^3) = E(\rho v^3) - E(\rho) \times E(v^3) \quad (6.12)$$

Ek olarak, eğer rüzgar hızıyla hava yoğunluğu arasındaki çapraz korelasyon katsayısı, r ' yi tanımlayacak olursak.

$$r = \frac{Cov(\rho, v^3)}{S_\rho \times S_{v^3}} \quad (6.13)$$

Burada S_ρ ve S_{v^3} , sırasıyla, hava yoğunluğu ve rüzgar hızı kübünün zaman serilerinin standart sapmasıdır. Eşitlik 6.12 ve 6.13' da bulunan $Cov(\rho, v^3)$ ortadan kaldırıldığında aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir [19, 21, 42]:

$$E(\rho v^3) = E(\rho) \times E(v^3) + r \times S_\rho \times S_{v^3} \quad (6.14)$$

Son olarak, eşitlik 5.14' ü eşitlik 5.10' da yerine koyduğumuzda:

$$E(E) = \frac{1}{2} [E(\rho) \times E(v^3) + r \times S_\rho \times S_{v^3}] \quad (6.15)$$

İfadesi elde edilir. 6.15 eşitliği aşağıdaki şekle dönüştürüldüğünde burada köşeli parantez içerisinde kalan kısım α ' ya eşittir. Bu da düzeltme faktörü olarak tanımlanmaktadır ve herhangi bir boyutu bulunmamaktadır.

$$E(E) = \frac{1}{2} E(\rho) \times E(v^3) \times \left[1 + \frac{S_\rho \times S_{v^3}}{E(\rho) \times E(v^3)} \right] \quad (6.16)$$

$$\alpha = 1 + r \frac{S_\rho \times S_{v^3}}{E(\rho) \times E(v^3)} \quad (6.17)$$

Ek olarak, bu ifadeyi bir kez de değişkenlik katsayısını göz önüne alarak yazmak mümkündür. c , standart sapmanın aritmetik ortalamaya oranı olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik 6.17' de bu oran hem hava yoğunluğu için hem de rüzgar hızının kübü için bulunduğu görülmektedir. Dolayısıyla:

$$\alpha = 1 + r \times c_\rho \times c_{v^3} \quad (6.18)$$

Ayrıca, $E(\rho)$ değerini bulabilmek için beklenen değer konseptiyle beraber genel gaz kuralını kullanılmaktadır.

$$E(\rho) = \frac{E(P)}{R \times E(T)} \quad (6.19)$$

Bu ifadede geçen P havanın basıncını Pascal cinsinden, T hava sıcaklığını Kelvin cinsinden ve R genel gaz sabitini temsil etmektedir. R , hava için $287,04 \frac{J}{K.kg}$ 'dir [21, 43].

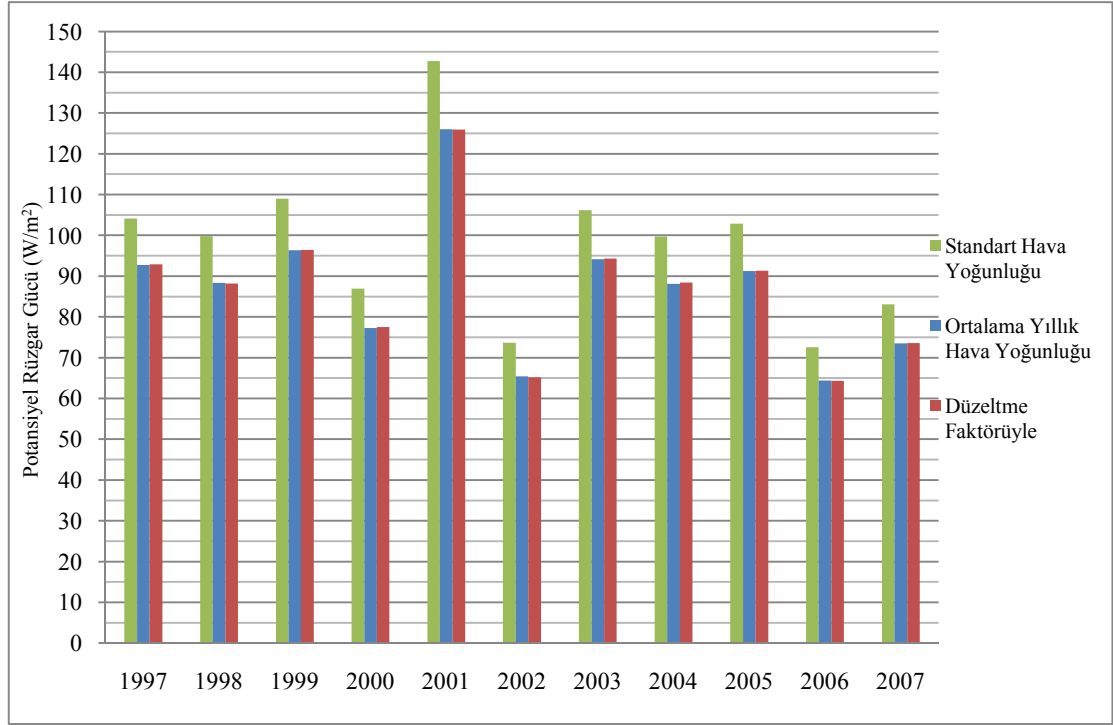
DMİ' den alınan 1997 – 2007 yılları arasındaki verilerle Yunak bölgesine stokastik rüzgar enerjisi denklemi uygulanmıştır. Alınan verilere dayanılarak yapılan hesaplamalarla elde edilen hava yoğunluğu ve rüzgar hızının kübüne ait istatistiki sonuçlar Çizelge 6.4' de görülmektedir.

Çizelge 6.5: Yunak, 1997-2007 yılları DMİ verilerine dayanan istatistik veriler.

Parameter	Air Density (kg/m ³)	Wind Speed Cube (m/s) ³
Ortalama	1,0889	160,704
Median	1,0867	32,768
Mode	1,0705	6,859
Standard Sapma	0,0389	428,085
Maksimum	1,2157	15438,249
Minimum	0,9893	0,000

Bu bölüme kadar gösterilen 3 ayrı potansiyel rüzgar gücü hesap yöntemiyle Yunak bölgesi için hesaplamalar yapılmıştır. Şekil 6.17' de 1997 – 2007 yılları için yapılan yıllık bazda hesaplamaların sonuçlarını yansıtan grafik açıkça göstermektedir ki; hava yoğunluğunun standart değeri (1,225 kg/m³) kullanılarak elde edilen sonuçlarla sahanın ortalama yıllık hava yoğunluğu değeri göz önüne alınarak elde edilen sonuçlar arasında büyük bir fark vardır. Yıllık ortalama hava yoğunluğu değeri dikkate alınmadığı durumlarda hesaplanan potansiyel rüzgar gücü daha fazla çıkmaktadır, bu da mevcut potansiyelin olduğundan fazla tahmin edilmesine neden olmaktadır. Bu gibi durumlarda yapılan yüksek tahminler özellikle proje başlamadan önce hazırlanan finansal fizibilitenin sonuçlarıyla santral kurulduktan sonra elde edilen üretim değerleri neticesinde elde edilen değerlerin çok farklı olmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak, genellikle bir proje başlamadan önce tahmin edilen geri

dönüşüm oranları, ve yatırımın kendini geri ödeme süresi fizibilitede hesaplanandan daha yüksek ve uzun çıkmaktadır, bu da rüzgar enerjisi yatırımcılarının gelecekte yapmayı düşündükleri yatırımlara karşı mesafeli olmalarına neden olmaktadır.



Şekil 6.17: Yunak bölgesi 1997 – 2007 yılları potansiyel rüzgar gücü sonuçları.

Daha önceki kısımlarda anlatılan, rüzgar hızı ve hava yoğunluğunun birbirine bağımlı birer random değişken olduğu dikkate alınarak elde edilen bir “ r ” düzeltme faktörünün hesaba katılmasıyla yapılan hesaplamalarda alınan neticeler ise ortalama hava yoğunluğunun kullanıldığı formülle elde edilen sonuçlardan çok farklı değildir. Bunun nedeni, c_p ve $c_{v,3}$ değişkenlik katsayılarından en az birinin bile birden küçük olduğu durumlarda eşitlik 6.18’ de bulunan $rx c_p x c_{v,3}$ ifadesi ihmal edilebilir. Bu gibi durumlarda eşitlik 6.10’ da belirtilen geleneksel potansiyel rüzgar gücü denklemi kullanılabilir. Ancak sadece $r = 0$ olduğu durumlarda bağıl hata sıfır olmaktadır. Görülüyor ki; stokastik denklemde r , yani düzeltme faktörü, -1 ile +1 arasında aldığı değerlerle önemli bir rol oynamaktadır.

Bu denklemle yapılan hesaplamalarda çapraz korelasyon katsayısı r ’nin negatif olduğu durumlarda ortalama hava yoğunluğu ile hesaplanmış rüzgar gücüne göre oranla düşük bir güç elde edilmektedir. 2002 yılı için Yunak bölgesi verileri

üzerinden yapılan çalışmada bu duruma örnek teşkil etmektedir. Çizelge 6.6 ve 6.7’ de stokastik rüzgar gücü hesaplama yöntemiyle elde edilen sonuçlar görülmektedir.

Çizelge 6.6: Yunak, 1997 - 2007 yılları stokastik potansiyel rüzgar gücü hesabı.

	$E(\rho)$	$E(v^3)$	$E(\rho v^3)$	$E(v^3) x E(\rho)$	$Cov(\rho v^3)$	r	c_ρ	c_{v^3}	α
1997	1,091	170,04	185,85	185,49	0,36	0,025	0,03	2,31	1,002
1998	1,084	162,98	176,42	176,73	-0,31	-0,022	0,03	2,36	0,998
1999	1,083	177,92	192,80	192,72	0,08	0,004	0,03	2,96	1,000
2000	1,089	141,88	155,04	154,56	0,48	0,035	0,04	2,37	1,003
2001	1,081	233,05	251,83	251,97	-0,13	-0,006	0,03	2,66	0,999
2002	1,087	120,32	130,32	130,81	-0,49	-0,039	0,04	2,50	0,996
2003	1,087	173,29	188,64	188,34	0,30	0,018	0,04	2,45	1,002
2004	1,082	162,85	176,89	176,19	0,70	0,018	0,08	2,88	1,004
2005	1,087	167,93	182,66	182,47	0,19	0,011	0,03	2,63	1,001
2006	1,087	118,49	128,61	128,80	-0,19	-0,015	0,04	2,59	0,999
2007	1,084	135,66	147,13	147,04	0,08	0,005	0,04	2,72	1,001

Çizelge 6.7: Yunak, 1997 - 2007 yılları stokastik potansiyel rüzgar gücü hesap sonuçları.

	$E(P)$ (W/m ²)	$E(P')$ (W/m ²)	$E(P_s)$ (W/m ²)
1997	92,744	92,92	104,15
1998	88,367	88,21	99,83
1999	96,361	96,40	108,97
2000	77,279	77,52	86,90
2001	125,984	125,92	142,74
2002	65,405	65,16	73,70
2003	94,170	94,32	106,14
2004	88,094	88,44	99,75
2005	91,237	91,33	102,86
2006	64,400	64,31	72,58
2007	73,522	73,56	83,09

Çizelge 6.7’ da $E(P)$, $E(P')$ ve $E(P_s)$ sırasıyla yıllık ortalama hava yoğunluğu ile hesap edilen potansiyel rüzgar gücünü, düzeltme faktörüyle elde edilen gücü ve standart hava yoğunluğu değeriyle varılan sonucu ifade etmektedir. Görüldüğü gibi negatif “r” değeri için daha düşük bir güç elde edilmektedir.

1997, 1999, 2000, 2003, 2004, 2005 ve 2007 yıllarına ait sonuçlar analiz edildiğinde varılan neticede ise; 1998, 2001, 2002 ve 2006 yıllarının aksine “r” nin pozitif olması durumuyla karşılaşmıştır. Bu durumda ise ortalama hava yoğunluğu ile hesaplanmış rüzgar gücüne göre oranla yüksek bir güç elde edilmektedir.

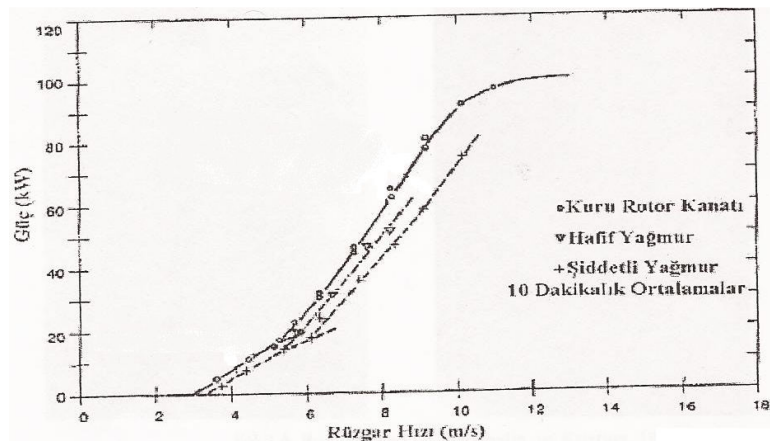
Yapılan çalışma sonucu elde edilen sonuçlardan bir diğeri de; rüzgar hızındaki değişimler hava yoğunluğundakilere göre daha fazladır. Bundan dolayı, yukarıda da açıklandığı gibi hava yoğunluğunda rüzgar hızının değişimine bağlı gerçekleşen bu küçük değişimler ihmal edilebilir ve ortalama hava yoğunluğu değeri kullanılabilir. Bunlara ek olarak, rüzgar enerjisi üretimine etki eden diğeri başlıca faktörler de mevcuttur.

6.4 Rüzgar Enerjisi Üretimine Etki Eden Diğeri Faktörler

Önceki bölümde de bahsedildiği gibi atmosfer tabakası içinde rüzgar alanlarını etkileyen başlıca faktörler arasında basınç ve sıcaklık gradyanları, arazinin pürüzlülüğü, atmosferik kararlılık durumu gibi etkenlerin yanı sıra bulutlar, yağmur, dolu ve kar yağışı ile buzlanma ve yıldırım çarpmaları gibi faktörler de göz önünde bulundurulmalıdır.

6.4.1 Şiddetli yağmur

Hafif ve orta şiddetteki yağmurlar, rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinin performansını etkilemez. Ancak şiddetli yağmurlar süresince iri yapılı yağmur damlaları, türbin kanatlarının etrafındaki hava akışını bozulmasına neden olurlar. Yağmurun yoğunluğuna ve ölçüm sonuçlarına göre % 30' luk bir güç kaybının olduğu belirlenmiştir [14]. Şekil 6.18' de güç eğrilerinin yağmurlu ve yağmursuz durumlar için değişimi verilmektedir.



Şekil 6.18: Bir türbinin güç eğrisine yağmurun etkisi [14].

6.4.2 Dolu

Her coğrafi bölgede sık rastlanmayan bir hava olayı olmamasına karşın yıllık enerji üretimlerinde son derece önemli kayıplara neden olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, yıllık enerji üretiminde sebep olacağı kayıplardan ziyade 100 m/s hızla rotor kanatları üzerine düşen dolu tanelerinin kanatlara verdiği zarar daha önemlidir. Bu tip zararlar hem enerji üretiminin kesilmesine hem de bakım onarımdan kaynaklanacak ekstra maliyetlere sebebiyet vermektedir. Dolunun kanatlara verdiği zarar neticesinde kanatların değiştirilmesi de söz konusu olabilmektedir [14].

6.4.3 Buzlanma

Buzlanma sonucunda türbin kanatları aerodinamik ve aeroelastik özellikleri önemli derecede etkilenmektedir. Bu da türbinin performansında azalmaya neden olmaktadır. Buzlanmanın neden olduğu bir başka olumsuz sonuç ise kanatlardan buz saçılması ile insanlara ve eşyalara verdiği zararlardır. Buzlanmadan dolayı meydana gelen kimi buz yükünden kaynaklanan sistem dengesizliği de diğer bir problemdir. Bu durum güçlü titreşimlere, malzemelerin yorulmasına, ve kırılmalara neden olabilmektedir [14]. Buzlanma neticesinde türbine ait rüzgar gülü ve anemometre de donabilmektedir. Bunun sonucunda türbin durmakta ve enerji üretilmemektedir [42]. şekil 6.19' da buzlanma sonucunda kanatta oluşan sarkıklar görülmektedir.



şekil 6.19: Kanatta buzlanma sonucu oluşan sarkıklar.

6.4.4 Yıldırım çarpmaları

Kırsal alanlarda yıldırım çarpmaları sonucunda türbin kanatlarının, jeneratörün ve sistemin zarar görmesi ciddi bir sorundur. Zararlar genellikle yıldırıma karşı iyi

korunmamış elemanlar üstünde daha fazla oluşmaktadır. RES kurulacak bölgenin yıldırım frekansı durumunun bilinmesi daha karlı bir işletme yapılabilmesi açısından önemlidir [14]. Yakın zamanda ülkemiz sınırları içerisinde bir rüzgar santralinde türbin kanadına yıldırım düşmesi sonucunda kanat ağır hasar almış ve çalışamaz hale gelmiştir. Bunun neticesinde yeni kanat gelene kadar türbin çalışmamış ve enerji kaybı meydana gelmiştir. Şekil 6.20’ da yıldırım çarpmış bir kanada ait fotoğraf verilmektedir.



Şekil 6.20: Yıldırım çarpmış bir kanat.

6.4.5 Kar

Kar düşük özgül ağırlığından dolayı rüzgar tarafından kolayca sürüklenip kendisine yol bulabileceği her açıklıktan rüzgar türbinine nüfuz edebilir. Özellikle nacelle içerisine girdiğinde türbin elemanlarına zarar verebilmektedir. Kar yağışının sebep olacağı bu tip zararlardan kaçınmak için nacelle’lerde deflektörler kullanılmaktadır.

6.4.6 Yüksek sıcaklık

Rüzgar türbinleri genellikle - 15°C ile + 40°C arasındaki sıcaklıklarda çalışmak üzere dizayn edilmiştir. Ancak hava sıcaklığının + 40°C’ yi geçtiği bölgelerde yüksek sıcaklık nedeniyle türbine ait özellikle elektrik ekipmanları zarar görmekte ve türbin çalışmamaktadır. Bu gibi durumların önüne geçebilmek için üreticiler piyasaya sürdükleri türbinlere yüksek sıcaklık paketi ekleyebilmektedirler. Bu paket ile birlikte türbin içerisine yerleştirilen ekstra hava kanalları, HVAC sistemleri ile

türbin içi sıcaklık düşürülebilmektedir. Ayrıca, yükselen sıcaklık ile birlikte türbin güç üretimini azaltarak ekipmanların daha fazla ısınması engellenebilmektedir.

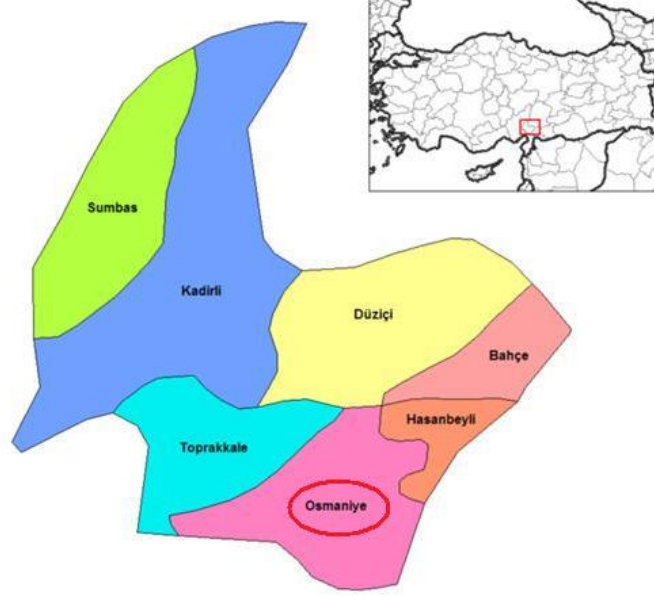
6.5 Tahmin Edilen Enerji Üretim Değeriyle Gerçekleşen Üretim Değerlerinin Karşılaştırılması.

Çalışmanın bu kısmında $37^{\circ} 11' 58,78''$ kuzey ve $36^{\circ} 34' 58,57''$ doğu koordinatlarında Osmaniye, Bahçe'de kurulmuş rüzgar enerjisi santralindeki 30 metre yükseklikte bulunan bir ölçüm direğinden alınan rüzgar verileri ve bu ölçüm direğine en yakın konumdaki türbinden alınan üretim değerleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 6.8'de bölgeye ait ortalama sıcaklık, hava yoğunluğu ve rüzgar hızı değerleri verilmiştir. Şekil 6.21' da RES' i bölgesinin harita üzerinde konumu gösterilmektedir.

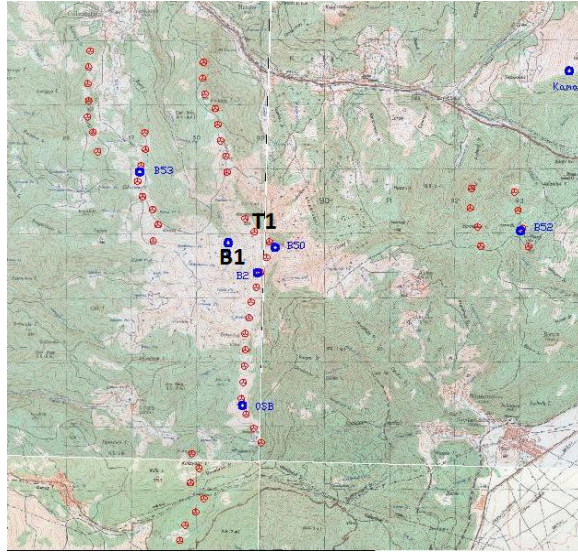
Çizelge 6.8: 2000 – 2003 yıllarına ait Bahçe ortalama sıcaklık, hava yoğunluğu ve rüzgar hızı değerleri.

Ortalama Sıcaklık (°C)	Ortalama Hava Yoğunluğu (kg/m³)	Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)
10,34	1,089	8,34

Günümüzde özel sektöre ait devreye alınmış olan RES' lerinden reel üretim değerlerini ve rüzgar ölçüm değerlerini almakta yaşanan sıkıntılar nedeniyle kurulmuş santrallerle ilgili çalışmalarda zorluklar yaşanmaktadır. Bu çalışmada da benzer sıkıntılardan dolayı ancak 15 günlük saatlik ortalama verilere ulaşılmıştır. Santralde üretim yapan türbinler GE 2,5 xle model olup hesaplamalar da bu türbine ait güç eğrisi dataları kullanılmıştır. 30 metre yükseklikte bulunan "B1" ölçüm direğinden alınan rüzgar verileri, eşitlik 4.13 uygulanarak 85 metre olan türbin göbek yüksekliğine yükseltilmiştir. Bölge arazisine yönelik yapılan incelemelerde bölgenin yeşil ve ekili alana sahip olduğu görülüp α katsayısı 0,14 olarak seçilmiştir. Ölçüm direğinden ve T1 rüzgar türbininden alınan değerler bir saatlik ortalama verilerdir. Bunun yanında T1 türbinine ait gerçekleşen günlük üretim değerleri de mevcuttur. Şekil 6.22'de üretim değerleri okunan türbin "T1" ile rüzgar verileri alınan ölçüm direği "B1" görülmektedir.



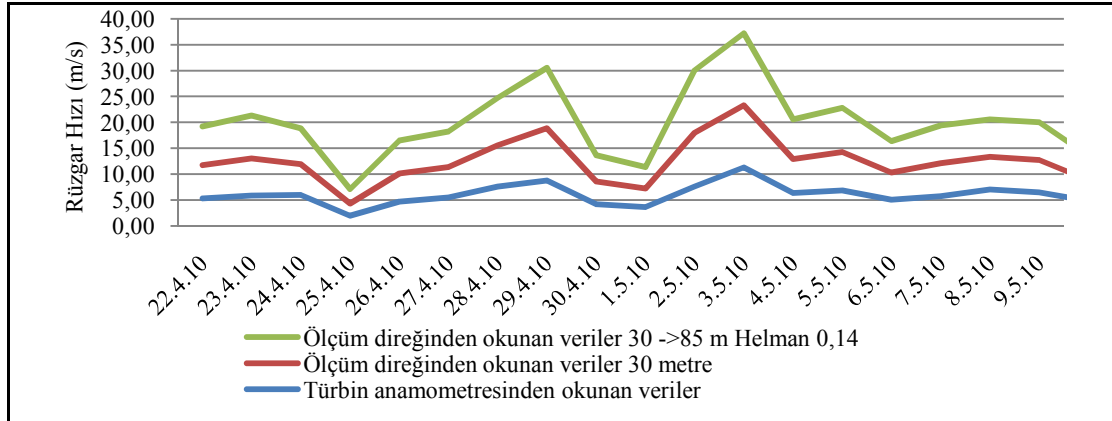
Şekil 6.21: Osmaniye, Bahçe bölgesi.



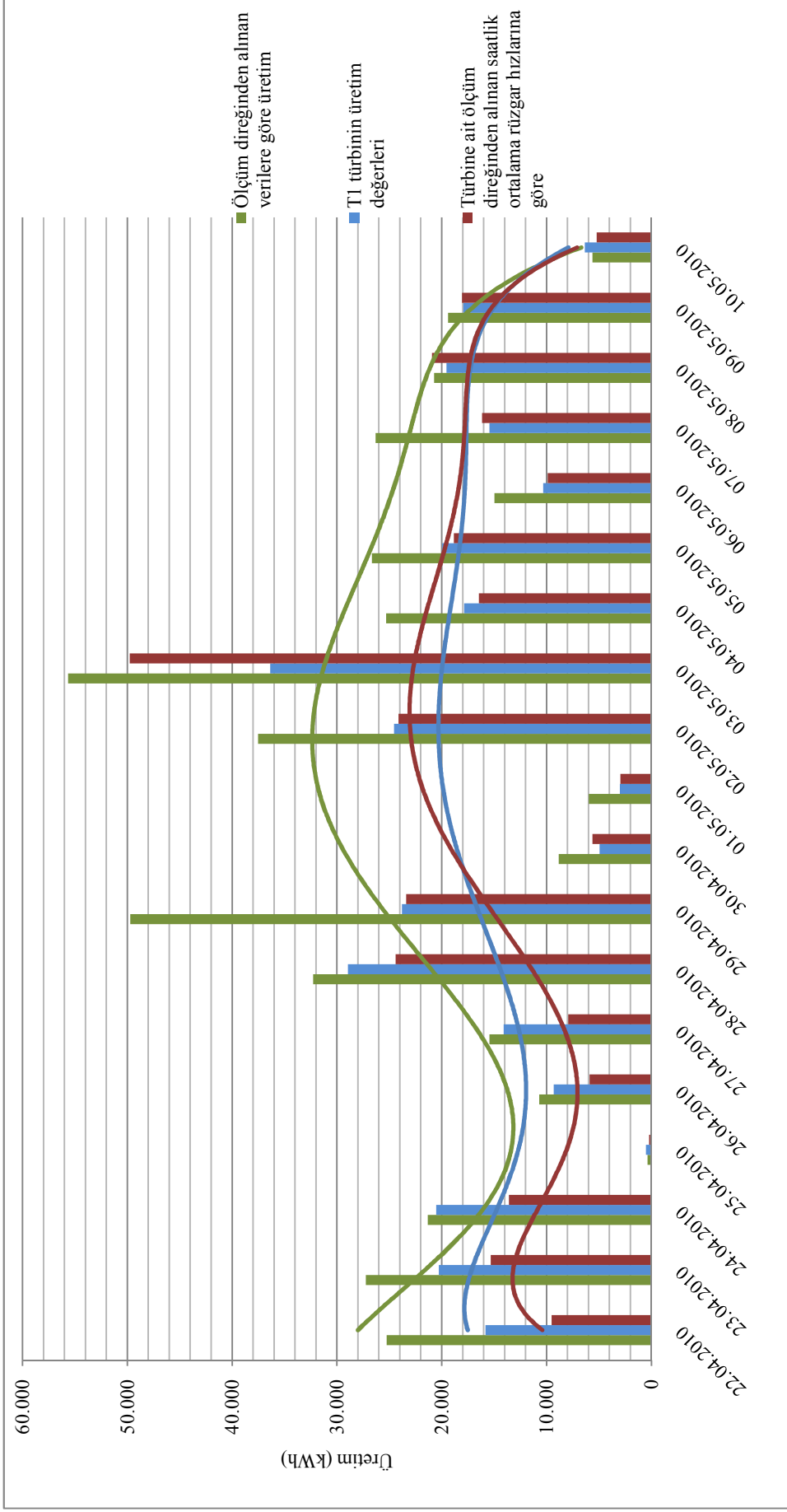
Şekil 6.22: T1 rüzgar türbini ve B1 ölçüm direği yerleşimi.

22.04.2010 – 10.05.2010 tarihleri arasında ölçüm direğinde alınan verilerine göre ortalama hava yoğunluğu $1,04 \text{ kg/m}^3$ olarak hesaplanmıştır. T1 türbininin modeline ait ve bu yoğunluk için geçerli olan güç eğrisi kullanılarak belirtilen zaman zarfı içerisinde ölçüm direğinden alınan veriler 85 metre'ye yükseltildikten sonra hesap edilen toplam enerji üretimi $429,34 \text{ MWh}$ ' tir. Şekil 6.23' de türbinden, ölçüm direğinden 30 metrede alınan ve ölçüm direğinden alınan verilerin 85 metreye yükseltilmesiyle elde edilen rüzgar hızlarına ait grafik gösterilmektedir. Ancak, aynı

süre için T1 türbininden alınan gerçekleşen üretim değeri 309,57 MWh' tir. Bunun yanında T1 türbininde bulunan anemometreden alınan saatlik ortalama rüzgar hızlarına göre de hesaplanan üretim değeri ise 288,34MWh' tir. Ölçüm direğinden alınan verilere dayanılarak hesap edilen üretim değerleri, T1 türbininde gerçekleşen üretim değerinden %27,9 fazladır. Bu farklılığın sebepleri, ölçüm direği ile T1 türbininin lokasyonlarındaki farklılıktan kaynaklanan topografik ve orografik etmenler, 30 m' deki rüzgar türbininden alınan rüzgar verilerinin yüzey şekillerine göre karşılaştırılan Helmann katsayısı kullanılarak 85 metreye yükseltilmesi sonucu elde edilen hızın gerçek rüzgar hızından farklı olması ve T1 türbininin etrafında çalışan diğer türbinlerin gölgelemesinden etkilenmesi söylenebilir. Rüzgar türbinine ait anemometreden alınan rüzgar hızlarıyla hesaplanan üretim değerinin, gerçekleşen üretimden %6,8 oranında düşük çıktığı görülmektedir. Bunun nedeni olarak da daha önceki kısımlarda açıklandığı gibi türbin kanatlarından geçen hava kütlelerinin yayılması sonucu rüzgar hızında meydana gelen düşüştür. Şekil 6.24' te ise türbin anamometresinden okunan rüzgar şiddeti verilerine göre hesaplanan üretim değerleri, türbinde gerçekleşen üretim değerleri ve ölçüm direğinden alınan verilere göre hesaplanan üretim değerleri verilmektedir.



Şekil 6.23: T1 rüzgar türbininden ve B1 ölçüm direğinden alınan rüzgar verileri.



Şekil 6.24: T1 rüzgar türbini ve B1 ölçüm direğinden alınan rüzgar hızlarına göre üretim değerleri ve T1 türbinine ait reel üretim değeri.

7. SONUÇLAR

Günümüzde ülkemiz gibi gelişmekte olan ülkelerde enerji talebi giderek artmaktadır. Türkiye sahip olduğu enerji kaynakları bakımından enerji ihtiyacını kendi öz kaynaklarıyla karşılayabilecek rezervlere de sahip değildir. Bu yüzden de enerjide dışa bağımlı bir profil çizmektedir. Enerji üretiminin devamlı ve kesintisiz olması, enerji bir kaynaktan elde ediliyorsa yedeğinin bulunması, enerji üretiminin birden fazla kaynaktan sağlanması, temiz enerji kaynaklarının kullanılması ve ucuz enerji kaynaklarının tercih edilmesi enerji politikalarının olmazsa olmazlarından. Bütün bunlar göz önüne getirildiğinde yenilenebilir enerji kaynakları ve bunlar içinden iyi denecek bir potansiyele sahip olduğumuz rüzgar enerjisi hem enerji çeşitliliğinin sağlanmasında, hem de temiz ve nispeten ucuz bir enerji kaynağı olarak ülkemiz için önem arz etmektedir. Ancak bu noktada sahip olunan bu değerli potansiyelin doğru ve verimli bir şekilde kullanılması önem teşkil etmektedir.

Bu çalışma kapsamında da rüzgar karakteristiğine ve enerjisine etki eden faktörler incelenmiştir. Bu kapsamda, Konya – Yunak bölgesine ait DMİ tarafından 10 metre yükseklikte alınan 1986 – 2007 yılları arası saatlik ortalama rüzgar hızı, basınç ve sıcaklık verileri kullanılarak çeşitli çalışmalar yapılmış ve bir RES kurulmadan önce göz önünde bulundurulması gereken noktalar ortaya konulmuştur. İlk olarak, santral kurulacak bölgenin rüzgar dağılımı ortaya konulmalıdır. Ortalama rüzgar hızı bilgisinden ziyade bölgenin karakteristiğini gösteren HSE yardımıyla bölgenin rüzgar dağılımı irdelenmesi gerekmektedir. Ardından yapılan çalışmada bölgenin rüzgar enerjisi tahmini yapılırken rüzgar hızının yanı sıra hava yoğunluğu değişimlerinin de göz ardı edilmemesi gerektiği gösterilmiştir. Bu doğrultuda, Yunak bölgesi için farklı göbek yüksekliklerinde olan değişik model iki rüzgar türbini için hem standart hava yoğunluğu değeri hem de ortalama hava yoğunluğu değeri kullanılarak enerji üretimleri hesaplanmıştır. Ayrıca bir yıllık verilerden yola çıkılarak yapılan tahminlerle, beş yıllık ortalama veriler kullanılarak yapılan tahminler ile gerçekleşen üretim değerine göre sapmaları irdelenmiştir. Hesaplamalar sırasında, güç profili kanununda kullanılan α katsayısı için farklı değerler kullanılmış

ve arazi şekilleriyle ilgili olan bu katsayının da üretim hesaplarında ne kadar önem teşkil ettiği gösterilmiştir.

Hava yoğunluğu sıcaklık, basınç ve dolayısıyla yüksekliğe bağlı bir değişkendir. Ancak bu çalışmada, literatürde de örnekleri bulunan ve hava yoğunluğunun rüzgar hızına bağlı değişimini de dikkate alan bir metot ta bu tez kapsamında incelenmiştir. Bu noktada rüzgar hızına bağlı değişimlerden elde edilen düzeltme faktörünün çok küçük bir etkisi olduğu görülmüştür.

Bunlar dışında, şiddetli yağmur, dolu, buzlanma, yıldırım çarpmaları, kar ve aşırı sıcaklar gibi meteorolojik faktörler de rüzgar enerjisi üretimini etkilemektedir. Fakat bölgede santral kurulumundan önce yapılacak teftişlerde bu hava olaylarının meydana gelip gelmediği ve meydana geliyorsa ne sıklıkta geldiği teftiş edilirse bu tür etkenlerin üretime olan etkisi minimize edilebilir.

Son aşamada ise, Osmaniye-Bahçe sınırları içerisinde kurulu bulunan bir RES' nden alınan 15 günlük verilerle yapılan hesaplamalar bulunmaktadır. Bu bölümde, ölçüm direğinden 30 metrede alınan saatlik ortalama rüzgar hızlarıyla 15 günlük enerji üretimi hesaplanmıştır. Ardından aynı hesap, ölçüm direğine yakın lokasyondaki bir rüzgar türbinine ait ölçüm cihazından alınan saatlik ortalama rüzgar hızlarıyla yapılmıştır. Elde edilen bu iki sonuç ile birlikte rüzgar türbinine ait gerçek üretim değerleri karşılaştırılmıştır. Ölçüm direği ile türbin lokasyonunun farklı olması, buna bağlı olarak arazi koşulları, türbinin etrafında çalışan diğer türbinlerden etkilenmesi, ölçüm direğinden alınan verileri türbin göbek yüksekliğine yükseltirken kullanılan α ' nın etkisi bu farklı sonuçların nedenlerindedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Jafarian M., Soroudi A. and Ehsan M.**, 2008, The Effects of Enviromental Parameters on Wind Turbine Power PDF Curve, *All with the Department of Electrical Engineering*, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, 1193-1197
- [2] **Akdağ S. A., Dinler A., and Menteş Ş. S.**, 2007: Rüzgar karakteristiğinin analizi, *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Bildiriler Kitabı* 31 Ekim 1-2 Kasım, Gaziantep, 23-29.
- [3] **IEA**, 2010. *Key World Energy Statistics*, Paris.
- [4] **ITU**, 2007. *Türkiye'de Enerji ve Geleceği İTÜ Görüşü*, İ.T.Ü Matbaası, İstanbul
- [5] **Albostan A., Eren L., Çekiç Y.**, 2008, *Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi*, Mühendislik Fakültesi, Bahçeşehir Üniversitesi.
- [6] **Çalışkan M.**, 2003: Gelibolu-Çanakkale rüzgar enerjisi potansiyelinin analizi ve bu kaynaktan elektrik enerjisi üretimi, *Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi*, 239-247
- [7] **Güner S., Albostan A.**, 2007. *Rüzgar Türkiye'nin Enerji Politikaları*, YEKSEM'07, Kasım.
- [8] http://tr.wikipedia.org/wiki/Yenilenebilir_enerji, alındığı tarih 18.09.2010.
- [9] **Altın V.**, 2002. Yeni Ufuklara Enerji. *Bilim ve Teknik*, TUBITAK.
- [10] **Kum H.**, 2009. Yenilenebilir Enerji Kaynakları: Dünya Piyasalarındaki Son Gelişmeler ve Politikalar, *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, Sayı:33, 207-223.
- [11] **REN21**. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2009, *Renewables Global Status Report: 2009 Update*, REN21 Secretariat, Paris, France, 9.
- [12] **Tindal A., Harman K., Johnson C., Schwarz A., Garrad A., Hassan G.**, 2007: Validation of GH Energy and Uncertainty Predictions by Comparison to actual Production, *AWEA Wind Resource and Project Energy Assesment Workshop*, Portland.
- [13] **Kwon S.D.**, 2010: Uncertainty analysis of wind energy potential assessment, *Applied Energy* 87, 856-865.
- [14] **Malkoç Y.**, 2003: Rüzgar enerjisi sistemlerinin konumlandırılması ve ömürleri süresince meteorolojik parametrelerin önemi, *Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi*, 249-258.
- [15] **Koçak K.**, 2008. Practical ways of evaluating wind speed persistance, *Energy*, 33, 65-70.

- [16] Koçak K., 2002. A method for determination of wind speed persistence and its application, *Energy*, 27, 967-973
- [17] Ahmed H.K., Abouzeidgels M., 2001. Utilization of wind energy in Egypt at remote areas, *Renewable Energy*, 23, 595-604
- [18] Şen Z., Şahin A.D., 1977. Regional assessment of wind power in western Turkey by cumulative semivariogram method, *Renewable Energy*, 12, 169-177
- [19] Şen Z., 2000. Stochastic wind energy calculation formulation, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 84, 227-234.
- [20] Shata A.S., Hanitsch R., 2006: The evaluation of wind energy potential and electricity generation on the coast of Mediterranean sea in Egypt, *Renewable Energy* 31, 1183-1202.
- [21] Essa S. M. K., Mubarak F., 2006: Survey and assessment of wind-speed and wind-power in Egypt, including air density variation, *Wind Engineering Volume 30, No. 2.* 95-106.
- [22] Reed J.W., 1979. Wind power climatology of the United States, *SAND 78-1620*, 3-20.
- [23] Karadeli S., 2001. *Rüzgar Enerjisi*, EIE Genel Müdürlüğü, Ankara, 3.
- [24] Durak M., Özer S., 2008. *Rüzgar Enerjisi Teori ve Uygulama*.
- [25] World Meteorological Organization, 1981. Meteorological Aspects of the Utilization of Wind As an Energy Source. *Secretariat of the World Meteorological Organization in Geneva, Switzerland*.
- [26] Özgener Ö., 2002. Türkiye’de Ve Dünya’da Rüzgar Enerjisi Kullanımı, *DEÜ Mühendislik Fakültesi, Fen Ve Mühendislik Dergisi, Cilt: 4 Sayı: 3.* 159-173.
- [27] <http://e-cografya.com/>, alındığı tarih 05.07.2010.
- [28] <http://tr.wikipedia.org>, alındığı tarih 15.11.2010.
- [29] Şen, Ç., 2003. Gökçeada’nın Elektrik Enerjisi İhtiyacının Rüzgar Enerjisi ile Karşılanması, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [30] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. ve Bossanyi, E., 2001. *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, Ltd., Wets Sussex.
- [31] Sathyajith M. 2006. *Wind Energy; Fundamentals, Resource Analysis and Economics*, Springer
- [32] Manwell J.F., McGowan J.G, Rogers A.L., 2002. *Wind Energy Explained; Theory, Design and Application*, University of Massachusetts, Amherst, USA, John Wiley & Sons LTD
- [33] <http://www.fortiswindenergy.com>, alındığı tarih 19.10.2009.
- [34] <http://www.mywindpowersystem.com>, alındığı tarih 30.12.2009.
- [35] Kıncay O., Yumurtacı Z., Bekiroğlu N., *Rüzgar Enerjisi Ders Notları*, Bölüm 1, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [36] Patel M.R., 2006. *Wind and Solar Power System Design Analysis and Operation*, Taylor & Francis, Raton.

- [37] **Akdağ S.A.**, 2008. Rüzgar Enerjisi Potansiyeli ve Ekonomik Analizinde Weibull Dağılımının Kullanımı, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Bilim ve Teknoloji A.B.D.
- [38] **Akpınar E. K., Akpınar S.**, 2005. A statistical analysis of wind speed data used in installation of wind energy conversion systems, *Energy Conversion and Management*, 46, 515-532
- [39] **Çelik, A.N.**, 2003. A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey, *Renewable Energy*, 29, 593-604
- [40] **Jaramillo O. A., Borja M. A.**, 2004. Windspeed analysis in La Ventosa, Mexico: a bimodal probability distribution case, *Renewable Energy*, 29, 1613-1630
- [41] **Dobesch H. ve Kury G.**, 2000. *Basic Meteorological Concepts and Recommendations for the Exploitation of Wind Energy in the Atmospheric Boundary Layer*, ENAIRGY, Vienna, Austria.
- [42] **Botta G., Cavaliere M., Viani S., Pospisil S.**, 1998. Effects of hostile terrains on wind turbine performances and loads: The Acqua Spruzza experience; *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74-76, 419-431.
- [43] **Essa S. M. K., Etman S. M., Embaby M.**, 2004: The effect of air density variation on wind power flux, *Wind Engineering Volume 28, No 3*, 305-310.

ÖZGEÇMİŞ

Polat YETER, 1985 yılında İstanbul’ da doğdu. Lise öğrenimini 2003 yılında FMV Özel Nişantaşı Işık Lisesinde, lisans öğrenimini ise 2008 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği bölümünde tamamladı. 2006/2007 öğretim yılında Avrupa Birliği’nin desteklediği Socrates/Erasmus Programı çerçevesinde bir yıl süreyle Lizbon, Portekiz’ de Instituto Superior Tecnico’ da eğitim gördü. 2008 güz döneminde Enerji Enstitüsü, Enerji Bilim ve Teknolojileri Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Yine 2008 yılında çalışmaya başladığı Zorlu Enerji Grubunda, halen Proje Mühendisi olarak çalışmaya devam etmektedir.