

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ ve EKONOMİK  
ANALİZİNDE WEIBULL DAĞILIMININ  
KULLANIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elektrik Müh. Seyit Ahmet AKDAĞ**

**Anabilim Dalı : ENERJİ BİLİM ve TEKNOLOJİ  
Programı : ENERJİ BİLİM ve TEKNOLOJİ**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Önder GÜLER**

**OCAK 2008**

**RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ ve EKONOMİK  
ANALİZİNDE WEIBULL DAĞILIMININ  
KULLANIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**Elektrik Müh. Seyit Ahmet AKDAĞ**  
**(301051021)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 24 Aralık 2007**  
**Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Ocak 2008**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Önder GÜLER**

**Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ahmet BAYÜLKEN**

**Yrd. Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU (Y.T.Ü.)**

**OCAK 2008**

## ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasında, değerli zamanını ayırarak çalışmamı yönlendiren ve kolaylaştıran, tecrübelerinden çokça yararlandığım, Yrd. Doç. Dr. Sayın Önder GÜLER'e, karşılaştığım kimi problemleri aşmam konusunda, yardımlarını esirgemeyen Sayın Ali DİNLER'e, Yrd. Doç. Dr. Sayın Burak BARUÇU' ya ve Doç. Dr. Sayın Altuğ ŞİŞMAN'a, bu tezi daha önce bitirmem için beni sürekli teşvik eden Prof. Dr Sayın Sermin ONAYGİL'e, en sıkıntılı anlarımda bana yardımlarını esirgemeyen desteklerini hissettiğim sevgili çalışma ve ev arkadaşlarıma özel teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasını kolaylaştıran, bütün eğitim hayatımda yanımda olan ve desteklerini hiçbir an eksik etmeyen aileme sadece bunun için teşekkür etmek hafif kalacaktır, var oldukları için onlara minnettarım, onlar olmasaydı bu çalışmayı yapabilecek gücü kendimde bulamazdım.

Aralık 2007

Seyit Ahmet AKDAĞ

## İÇİNDEKİLER

<b>KISALTMALAR</b>	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>vi</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>vii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b>	<b>viii</b>
<b>ÖZET</b>	<b>x</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>xi</b>
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
<b>2. DÜNYADA ve TÜRKİYE’ DE ELEKTRİK ENERJİSİ DURUMU</b>	<b>6</b>
2.1 Dünyada Elektrik Enerjisi Durum	6
2.2 Türkiye Elektrik Enerjisi Durumu	9
<b>3. RÜZGAR ENERJİSİ</b>	<b>12</b>
3.1 Dünyada Rüzgar Enerjisi	12
3.2 Uygulanan Destek Modelleri	17
3.2.1 Sabit Fiyat Sistemleri	17
3.2.2 Kota Sistemi	19
3.3 Rüzgar Türbini Sektörü	21
3.3.1 Günümüzdeki Rüzgar Türbinlerinin Kurulu Güç Olarak Satış Eğilimleri	26
3.4 Danimarka’da Rüzgar Enerjisi Kullanımının ve Sektörünün Gelişimi	28
3.5 Türkiye’ de Rüzgar Enerjisi Durumu	31
<b>4. RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ HESAP YÖNTEMLERİ</b>	<b>38</b>
4.1 Temel Denklemler	38
4.1.1 Rüzgar Güç Profili Kanunu	41
4.2 Rüzgar Potansiyelinin Hesaplama Yöntemleri	41
4.3 Weibull Dağılımı	42
4.3.1 Grafik Yöntem	43
4.3.2 Moment Yöntemi	44
4.3.3 En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	46
4.4 Hata Analizi	48
4.5 Güç Yoğunluğunun Belirlenmesi	48
4.6 En Olası Hız Değeri	49
4.7 En Fazla Enerjiyi Taşıyan Hız	50
4.8 Rüzgar Türbininin Ürettiği Enerjinin Bulunması	50
4.9 Rüzgar Türbinlerinin Güç Eğrileri	51
4.10 Kapasite Faktörünün Hesaplanması	52
<b>5. ÇANAKKALE BÖLGESİ İÇİN POTANSİYEL BELİRLENMESİ ve EKONOMİK ANALİZİ</b>	<b>53</b>

5.1	Ortalama Rüzgar Hızı Değerleri	54
5.2	Weibull Parametrelerinin Hesabında En Uygun Yöntemin Seçilmesi	57
5.3	Ekonomik Analiz	62
6.	<b>SONUÇLAR</b>	<b>66</b>
	<b>KAYNAKLAR</b>	<b>68</b>
	<b>EKLER</b>	<b>73</b>
	<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>79</b>

## KISALTMALAR

<b>Kpe</b>	: Kilo Petrol Eşdeğer enerji
<b>TEİAŞ</b>	: Türkiye Elektrik İletim AŞ
<b>IEA</b>	: Uluslararası Enerji Ajansı
<b>Riso</b>	: Danimarka Ulusal Laboratuvarı
<b>DMİ</b>	: Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü
<b>EPDK</b>	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu

## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
<b>Tablo 1.1</b>	Türkiye enerji tüketiminin sektörel dağılımı ..... 5
<b>Tablo 2.1</b>	Sektörel bazda elektrik tüketimi ..... 10
<b>Tablo 3.1</b>	2006 Sonu itibari ile rüzgar enerjisi kurulu gücü bakımından 1000 MW üstü ülkeler..... 13
<b>Tablo 3.2</b>	Avrupa ülkeleri için 2007-2011 rüzgar enerjisi kurulu güç tahminleri..... 15
<b>Tablo 3.3</b>	Rüzgar enerjisi sektöründe çalışan işçi sayısı ..... 15
<b>Tablo 3.4</b>	Rüzgar enerjisinin dünya elektrik tüketimindeki payı ..... 16
<b>Tablo 3.5</b>	Örnek ülkelerin rüzgar enerjisinin elektrik enerjisi tüketimindeki payı ..... 17
<b>Tablo 3.6</b>	Her iki sistemin karşılaştırılması ..... 21
<b>Tablo 3.7</b>	Rüzgar enerjisi alım fiyatları ..... 21
<b>Tablo 3.8</b>	2004-2006 Arasındaki en büyük 10 firma..... 23
<b>Tablo 3.9</b>	Rüzgar Türbini Seçimleri..... 24
<b>Tablo 3.10</b>	Türbin tiplerinin 1995-2004 arası satışları ..... 25
<b>Tablo 3.11</b>	Ortalama türbin kurulu gücü ..... 27
<b>Tablo 3.12</b>	Büyüklik olarak rüzgar türbinlerinin satışı ..... 28
<b>Tablo 3.13</b>	OECD ülkelerinin rüzgar enerjisi potansiyeli..... 32
<b>Tablo 3.14</b>	İşletmedeki rüzgar santralleri..... 35
<b>Tablo 3.15</b>	Bazı Lisans almış rüzgar enerjisi tesislerin ortalama kapasite faktörleri..... 37
<b>Tablo 4.1</b>	4 türbin için 3. dereceden türbin denkleminin katsayıları..... 52
<b>Tablo 5.1</b>	50metre yükseklik için zaman serisi ve weibull ortalama değerleri 56
<b>Tablo 5.2</b>	Farklı yükseklikler için weibull dağılım parametreleri belirleme yöntemlerinin karşılaştırılması..... 57
<b>Tablo 5.3</b>	50metre yükseklik için aylık veriler ile yöntemlerin karşılaştırılması..... 58
<b>Tablo 5.4</b>	80metre yükseklik için aylık veriler ile yöntemlerin karşılaştırılması..... 59
<b>Tablo 5.5</b>	50metre yükseklik için mevsimsel veriler ile yöntemlerin karşılaştırılması..... 61
<b>Tablo 5.6</b>	80metre yükseklik için mevsimsel veriler ile yöntemlerin karşılaştırılması..... 61
<b>Tablo 5.7</b>	Farklı Yüksekliklere Göre Türbin Fiyatları ..... 63
<b>Tablo 5.8</b>	13 farklı durumun karşılaştırılması ..... 64
<b>Tablo 5.9</b>	Durum 11 ile belirtilen türbinin aylık kapasite faktörleri..... 64
<b>Tablo 5.10</b>	Grafik yöntemine göre aylık kapasite faktörleri..... 65

## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa no</u>
<b>Şekil 1.1</b>	1973 ve 2005 de dünyada tüketilen enerji miktarının kaynak türlerine göre değişimi 2
<b>Şekil 1.2</b>	Dünya ve Türkiye’de kişi başı enerji tüketiminin tarihsel gelişimi 3
<b>Şekil 1.3</b>	1973 ve 2005 yılları için dünya enerji tüketiminin bölgesel dağılımı 3
<b>Şekil 2.1</b>	1973 ve 2005 yılları için dünya elektrik tüketiminin bölgesel dağılımı 6
<b>Şekil 2.2</b>	1971-2005 yılları arasında dünya elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı 7
<b>Şekil 2.3</b>	1973 ve 2005 yılları için elektrik üretiminde kullanılan kaynaklara göre değişimi 8
<b>Şekil 2.4</b>	Türkiye elektrik enerjisi kurulu gücünün 1980-2006 döneminde değişimi 9
<b>Şekil 3.1</b>	Rüzgar enerjisi kurulu gücünün 1997-2007 gelişimi ve 2100 hedefleri 14
<b>Şekil 3.2</b>	Rüzgar türbini elektrik şebekesine bağlantıları 26
<b>Şekil 3.3</b>	Ortalama türbin kurulu gücü 27
<b>Şekil 3.4</b>	Danimarka Türbin Değiş Programı 30
<b>Şekil 3.5</b>	Danimarka Türbin Sayısı ve Kurulu Gücünün Gelişimi 31
<b>Şekil 3.6</b>	Türkiye rüzgar atlası 33
<b>Şekil 3.7</b>	Repa rüzgar atlası 50 metre yıllık ortalama rüzgar hızları 33
<b>Şekil 3.8</b>	Repa rüzgar atlası 70 metre yıllık ortalama rüzgar hızları 34
<b>Şekil 3.9</b>	Repa rüzgar atlası 50 metre yıllık ortalama güç yoğunlukları 34
<b>Şekil 3.10</b>	Rüzgar enerjisi kurulu gücünün 1997-2007 gelişimi ve 2100 hedefleri 35
<b>Şekil 4.1</b>	Rüzgarın türbine girerken genişlemesi 39
<b>Şekil 4.2</b>	Betz limitinin değişimi 41
<b>Şekil 5.1</b>	Yıllık ortalama hızlar 54
<b>Şekil 5.2</b>	Saatlik ortalama hızlar 55
<b>Şekil 5.3</b>	Aylık ortalama hızlar 55
<b>Şekil 5.4</b>	Aylık ortalama zaman serisi ve Weibull güç yoğunlukları 56
<b>Şekil 5.5</b>	2001-2006 yılları verilerinin dağılımı 60
<b>Şekil 5.6</b>	2001-2006 yılları verileri için olan Weibull dağılımı 60
<b>Şekil 5.7</b>	Gerçek Maliyet ve Weibull Maliyetlerinin Karşılaştırılması 65



## SEMBOL LİSTESİ

$m$	: Kütle
$v$	: Rüzgar hızı
$\rho$	: Hava yoğunluğu
$A$	: Alan
$V_1$	: Rüzgar türbinine giden rüzgarın hızı
$V_3$	: Rüzgar türbininden çıkan rüzgar hızı
$V_2$	: Rüzgar türbininde rüzgar hızı
$P_t$	: Türbin tarafından çekilen güç
$c_p$	: En fazla elde edilebilecek güç oranı
$P_r$	: Rüzgar türbinine giden rüzgarın gücü
$a$	: Rüzgar hız oranı
$\alpha$	: Helmann sabiti
$P_1$	: $h_1$ yüksekliğindeki hız
$P_2$	: $h_2$ yüksekliğindeki hız
$f(v)$	: $v$ hızının Weibull olasılığı
$k$	: Şekil parametresi
$c$	: Ölçek parametresi
$F(v)$	: $v$ hızının Weibull kümülatifi
$m_2$	: Türbine giren havanın kütlesi
$\Gamma$	: Gamma fonksiyonu
$v_{ort}$	: Ortalama hız
$\sigma$	: Standart sapmanın karesi
$L$	: Olabilirlik fonksiyonu
$P_w$	: Weibull güç yoğunluğu
$E$	: Birim zamanda üretilen enerji
$V_{\max E}$	: En fazla enerjiyi taşıyan hız
$E_{turbın}$	: Türbinin ürettiği enerji
$P_R$	: Türbin gücü
$a_1$	: Türbin denklemi katsayısı
$a_2$	: Türbin denklemi katsayısı
$a_3$	: Türbin denklemi katsayısı
$a_4$	: Türbin denklemi katsayısı
$v_1$	: Türbinin üretime başladığı hız
$v_R$	: Türbinin nominal güçte üretime geçtiği hız
$v_o$	: Türbinin üretimini kestiği hız

$P_T(V)$	: Türbin güç eğrisi
$C_f$	: Kapasite faktörü
$PVC$	: Yapılan yatırımın şimdiki zaman değeri
$I$	: Bağlantı giderleri dahil türbin fiyatı
$B$	: Bakım onarım giderleri
$i$	: Enflasyon oranı
$r$	: Faiz oranı
$t$	: Türbin ömrü
$S$	: Hurda değeri

## **RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ VE EKONOMİK ANALİZİNDE WEIBULL DAĞILIMININ KULLANILMASI**

### **ÖZET**

Su ve enerji kaynakların yönetimi ve verimli şekilde kullanılması günümüzün önemli sorunlarından bir tanesidir. Enerji tüketiminin hızlı artmasına rağmen enerji kaynakları miktarı ve çeşitliliği bakımından kendine yeterli ülke sayısı yok denecek kadar azdır. Bu da enerji ticaretinin gelişmesine ve güvenliği konusuna verilen önemi artırmaktadır. Bu nedenle günümüzde enerji konusu devletlerin uluslararası politikalarını belirlemesinde etkili olan en önemli öğelerden biri durumuna gelmiştir. Fosil kökenli enerji kaynaklarının kullanılması sonucu büyük miktarda sera gazı emisyonu uzun yıllar atmosfere verilmiştir. Bununla etkisi ile küresel ısınma, hava kalitesinde bozukluklar, su kaynaklarının kirlenmesi gibi durumlar ortaya çıkmıştır. Petrol krizleri sonucunda gelişen arz güvenliği kavramı, 1980'lerden itibaren ise temiz çevreye verilen önemin artması, Rio Sözleşmesi, Kyoto Protokolü, AB'nin direktiflerinin etkisi ile yenilenebilir enerji kaynakları konusunda yapılan çalışmalar bu konudaki teşviklerin de etkisi ile artmıştır. Rüzgar enerjisi yenilenebilir enerji kaynaklarında biridir.

Bu çalışma kapsamında, Çanakkale bölgesindeki rüzgar enerjisinin potansiyeli Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nün (DMİ) 2001-2006 yılları arasında 10 metre yükseklikte ölçülen saatlik ortalama rüzgar şiddeti verileri kullanılarak Weibull dağılımı ve gerçek zaman serisi analizi ile incelenmiştir. Weibull parametreleri aylık, mevsimsel ve yıllık bazda 3 farklı yöntemle hesaplanmış hata analizi sonuçlarına göre hangi yöntemin kullanılması gerektiği seçimi yapılmıştır. Seçilen 1000, 1300, 2000 ve 2300 kW'lık 4 türbinin, toplam 6 farklı göbek yüksekliğinde, 13 farklı durumu için kapasite faktörleri sonuçları karşılaştırılmış ve üretim maliyeti en düşük çıkan türbin için yıllık ve mevsimsel bazda kapasite faktörü değerleri hesaplanmıştır.

## **USING WEIBULL DISTRIBUTION IN WIND ENERGY POTENTIAL AND ECONOMIC ANALYSIS**

### **SUMMARY**

The management of water and energy sources and their productive usage is one of the vital problems of today. Although energy consumption increases rapidly, there are really few countries which have enough energy sources in terms of amount and diversity of energy sources. This increases the importance of security of energy trading. Thus, today the subject of energy has been one of the most significant components, effective in determining international policy of nations. A huge amount of green house gas emission has been let go to the atmosphere for many years, with the result of usage of the fossil fuels. So the global warming, the poor quality of air, the pollution of water sources and such problems have appeared. The studies made in the field of renewable energy sources have been encouraged with the oil crisis, the increase of importance for a clean environment since 1980s, the effect of the Rio, Kyoto protocol and directive of European Union. One of the significant renewable energy source is wind energy. Wind energy is generally used renewable energy source recently.

Within the scope of this study, wind energy potential of Çanakkale region has been analyzed using Weibull distribution and real time series analysis, making use of hourly average wind data of State Meteorological Works General Directorate (SMW) measured in 10 m height between 2001 and 2006. Weibull parameters have been calculated using 3 different methods based on monthly, seasonally and yearly data, and the method to be used has been selected according to  $R^2$  and RMSE analysis. Capacity factor results of 4 selected turbines with 1000, 1300, 2000 and 2300 kW with 6 different hub height have been calculated according to 13 different positions. Yearly and seasonally capacity factor values have been calculated for the turbine with the lowest production cost.

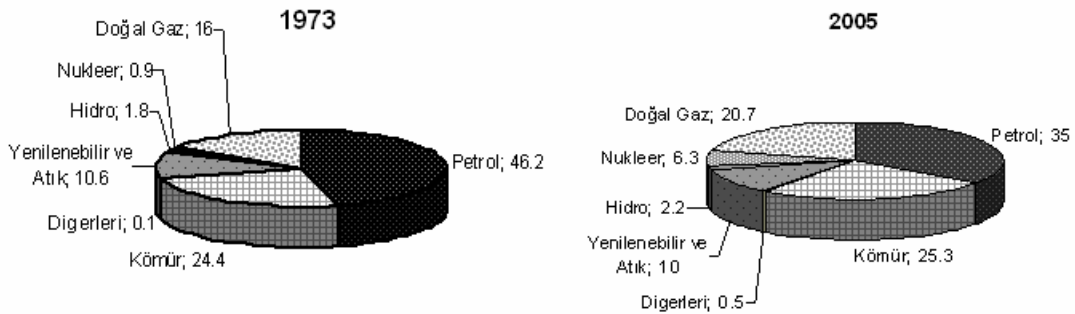
## 1. GİRİŞ

Üretilmeyen ama mevcut bir formdan diğerine dönüştürülebilen enerji; Yunanca “energia” sözcüğünden alınmış olup; etkiyen kuvvet anlamına gelmektedir [1]. Enerji tanımı konusunda tam bir birliktelik sağlanamamıştır. Enerji, fizik biliminde, iş yapabilme yeteneği ve depolanan iş olarak tanımlanır, enerji bilimi olarak bilinen termodinamik ise enerjiyi değişikliklere yol açan etken olarak tanımlar [2]. En genel ve kapsamlı bir şekilde ise bir sisteme eklendiğinde ya da çıkartıldığında sistem parametrelerinden herhangi birinde değişikliklere neden olan etken olarak tanımlanabilir. Enerjinin tanımı konusunda tam bir birlik olmasa da enerji konusunun günümüz insan hayatındaki önemi ortadadır.

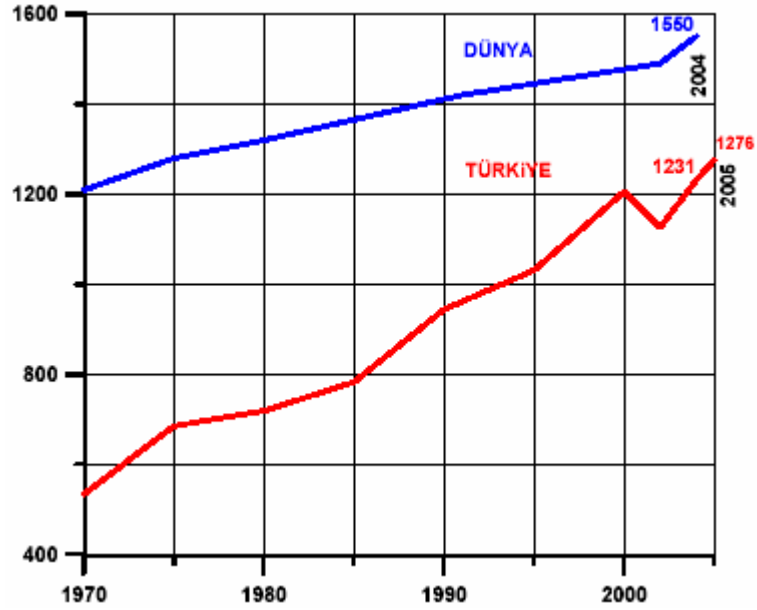
Enerji, nükleer enerji, kimyasal enerji, elektrik enerjisi, ısı enerjisi, mekanik enerji, ışık enerjisi gibi değişik formlarda bulunabilir. Enerjinin üretildiği enerji kaynakları günümüzde yenilenebilir ve konvansiyonel olarak değerlendirilmektedir. Yenilenebilir enerji, belirli bir ömrü olmayan enerji kaynaklarıdır ve büyük bir bölümü güneş enerjisinin forum değiştirmesi ile meydana gelmişlerdir. Fosil kökenli yakıtlar, konvansiyonel enerji kaynaklarını oluşturmaktadırlar. Bu yakıtlar yeryüzünde depo edilmiş halde bulunurlar ve belirli bir ömürleri vardır. Bu yakıtların ömürlerinin sınırlı olmasına karşın günümüz için fosil kökenli enerji kaynaklarının yokluğundan ya da eksikliğinden söz edebilmek mümkün değildir. Enerji talebi sürekli artarken bu yakıtların azalması, son 5 yıl içerisindeki petrol ve doğal gaz fiyatlarındaki artışlar, bu yüzyıl içerisinde enerji kaynaklarının fiyatlarının artacağını doğrulamaktadır. Dönemsel yoklukların yaşanma olasılıklarının kuvvetle muhtemel olduğu, bu nedenle dünyanın ekonomik blokları arasında enerji kaynakları için çekişmelerin hızlanacağı, yeterli, kaliteli, gerekli zamanda ulaşılabilecek enerji kaynakları için büyük bir yarışın olacağı açıktır [3]. Yani artık enerji kaynaklarının bol ve ucuz olduğu yüzyıl bitecek, yerini enerji savaşlarının olma olasılığı olduğu dönem alacaktır.

Dünyada yıllık tüketilen enerji miktarı, nüfus artışı, yaşam standartlarındaki artış, hızlı bir şehirleşme ve sanayileşmeye paralel olarak artmaktadır. 1950-2005 yılları

arasında dünya nüfusu 2 katına çıkarken kişi başı tüketilen enerji 3 katına çıkmış yani dünyada tüketilen enerji 6 kat artmıştır [4]. 1973 ve 2005 tarihlerinde dünyada tüketilen enerji miktarının kaynak türlerine göre değişimi Şekil 1.1’ de gösterilmektedir [5]. Şekil 1.2’ de ise 2004 yılına kadar dünyadaki ve 2005 yılına kadarki ülkemizde kişi başına tüketilen kilo petrol eşdeğer (kpe) enerjinin değişimi görülmektedir [4]. Enerji tüketimi konusunda yapılan senaryolar ve tahminler bu artışın uzun yıllar devam edeceği yönündedir [6,7]. Buna karşılık tarihsel süreçte enerji kaynaklarına ulaşma konusunda zaman zaman sıkıntılar yaşanmış, enerji kaynaklarının fiyatlarında büyük değişimler meydana gelmiştir. Günümüzde enerji kaynakları miktarı ve çeşitliliği bakımından kendine yeterli ülke sayısı yok denecek kadar azdır. Bu da enerji ticaretinin gelişmesine ve güvenliği konusuna verilen önemi artırmaktadır. Bunun sonucunda, bu kaynaklara yeterli miktarda ve çeşitte sahip olmayan özellikle gelişmekte olan ülkelerde, enerji kaynaklarının fiyatlarındaki dalgalanmalar, hayat standartları ve ekonomik büyüme bakımından sorunlar meydana getirebilmektedir. Bu nedenle enerji konusu günümüzde devletlerin uluslararası politikalarını belirlemede de etkili olan en önemli öğelerden biri durumuna gelmiştir. Ülkelerin gelişmişlik ve sanayileşmeleri kişi başına enerji tüketimi ve birim katma değer üretmek için harcanan enerjinin (enerji yoğunluğu) başka kavramlarla birlikte değerlendirilmesi ile ortaya çıkmaktadır [3]. Bunlardan dolayı enerji kaynaklarına hakim olmak ve bunları yönetebilmek, bu kaynakları verimli şekilde kullanabilmek, gelişmişliğin ve ekonomik büyümenin sürekli olması bakımından önemlidir.

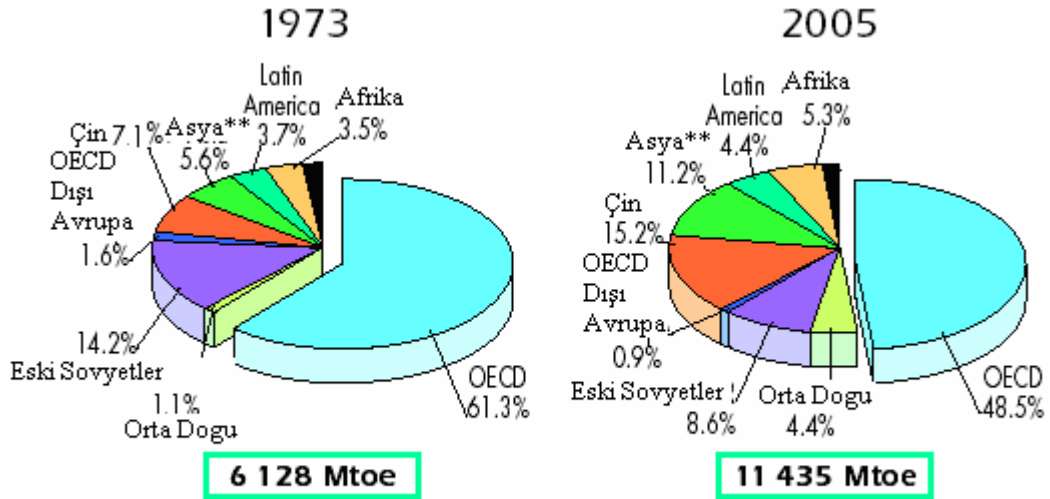


**Şekil 1.1** 1973 ve 2005 de dünyada tüketilen enerji miktarının kaynak türlerine göre değişimi



Şekil 1.2 Dünya ve Türkiye’de kişi başı enerji tüketiminin tarihsel gelişimi

Dünya da tüketilen enerji miktarı ve çeşidi, teknolojik gelişmelerinde etkisi ile değişiklik göstermektedir. Gelişmiş ülkeler olarak bilinen OECD ülkelerinin toplam enerji tüketiminde ki payı 1973 yılında % 61.3 iken bu pay 2005 yılında % 48.5’ e düşmüştür [5]. Bölgeler bazında 1973 ve 2005 yılı enerji tüketiminin Şekil 1.3’ gösterilmiştir.



\*\* Çin dahil değildir

Şekil 1.3 1973 ve 2005 yılları için dünya enerji tüketiminin bölgesel dağılımı

OECD ülkelerindeki enerji tüketiminin dünya enerji tüketimindeki payının azalma nedenleri şu şekilde sıralanabilir. Bu ülkelerin kişi başı enerji tüketimlerinin belirli

bir olgunluk ve doyunluğa ulaşması, enerji verimliliği çalışmaları, sanayi sektöründeki yatırımların daha az enerji tüketip daha fazla katma değer üreten yani daha fazla teknoloji yoğun yönlere kayması, nüfus artışının düşük olması gibi faktörlere dayanmaktadır. OECD ülkeleri arasında enerji tüketimi en fazla artan ülkeler sırası ile Güney Kore, Portekiz ve Türkiye olmuştur. Bu dönem zarfında dünya enerji tüketiminde OECD ülkelerinin etkisi azalmakta fakat özellikle Çin ve gelişmekte olan Asya ülkelerinin etkisi ise artmaktadır [6].

OECD dışı ülkelerde ise petrol krizlerinden sonraki yıllarda dünya enerji tüketimindeki payları kararlı bir şekilde artış göstermiştir, bu artışın olmasında en önemli pay başta Çin ve Hindistan gibi ülkelerin tüketimindeki artışlardır. Bu artışın nedenleri arasında bu ülkelerde meydana gelen sanayileşme ve yaşam standartlarındaki yükselme önemli bir yere sahiptir [6].

Enerji tüketimi sürekli bir artış içerisinde iken enerji yatırımları ve ar-ge çalışmalarına ülke bütçelerinden ayrılan miktarlar da artma eğilimindedir. World Energy Outlook 2007 çalışmasına göre 2006 fiyatları baz alındığı zaman sadece Çin'in 2007-2030 yılı için 3.7 trilyon dolar enerji sektörü için yatırım yapması gereklidir [6]. Enerji üretiminde ve tüketiminde kullanılan yeni ve verimli teknolojiler hızlı bir şekilde gelişmekte aynı zamanda eski teknolojiler ise gelişmekte olan ülkelere satılmaktadır.

2003 yılında dünyada tüketilen enerjinin sektörlere göre dağılımı incelendiğinde, bina sektörünün toplam nihai enerji tüketimindeki payı %24, sanayi sektörünün %49, ulaştırmanın ise %27 olmuştur. 2025 yılı için yapılan projeksiyon çalışmalarında ise bu paylarının sırası ile %22, %55 ve %23 olacağı tahmin edilmektedir [8]. Ülkemizde ise sanayi sektörünün 1990 yılında toplam enerji tüketimindeki payı %35 iken, 2004 yılında %42 olmuştur. Yine aynı dönemde konut ve hizmet sektörünün payı %37'den %30, ulaştırma sektörünün payı ise %21' den %20' ye düşmüştür. Sektörel enerji tüketiminin 1990-2004 yılları arasındaki dağılımı Tablo 1.1' de özetlenmiştir. Ülkemizde 2013 yılı için yapılan projeksiyon çalışmalarında sanayi sektörünün enerji tüketimindeki payının %44.1'e çıkması, ulaştırma sektörünün payının ise %20.1'e çıkması beklenmektedir [9].

Dünya enerji tüketim bölgeleri ile yoğun enerji kaynaklarına sahip bölgelerin farklı olması enerji ticaretinde güvenliğin önemini daha fazla arttırmaktadır. Dünya petrol



üretiminin %32.9'u Suudi Arabistan, Rusya ve ABD tarafından yapılmaktadır. En büyük ithalatçılar ise ABD, Japonya ve Çin olmuştur [5].

**Tablo 1.1** Türkiye enerji tüketiminin sektörel dağılımı

Setörler	1990	1995	2000	2001	2004
	Pay %	Pay %	Pay %	Pay %	Pay %
Sanayi	35	35	39	37	42
Konut ve Hizmetler	37	35	33	33	30
Ulaştırma	21	22	20	22	20
Tarım	5	5	5	5	5
Enerji Dışı	2	3	3	3	3

Günümüzde elektrik enerjisi insan yaşamının temel ihtiyaçlarından biri durumuna gelmiştir, başta bilgisayarların elektrik ile çalışması ve elektrik enerjisi kesilmesi sonucunda bu makinelerin çalışmaması nedeni ile çoğu yerde çalışmalar yapılamamaktadır. Bu nedenle elektrik enerjisinin insan hayatında ki önemi inkar edilemez.

Günümüzde gittikçe artmakta olan elektrik enerjisi talebinin karşılanmasında, konvansiyonel enerji kaynaklarının ekosistem üzerindeki olumsuz etkisi ve arz güvenliği kavramı nedeni ile yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretiminde önemini ve kullanım zorunluluğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu enerji kaynakları içinde halen en popüler olanı rüzgar enerjisidir.

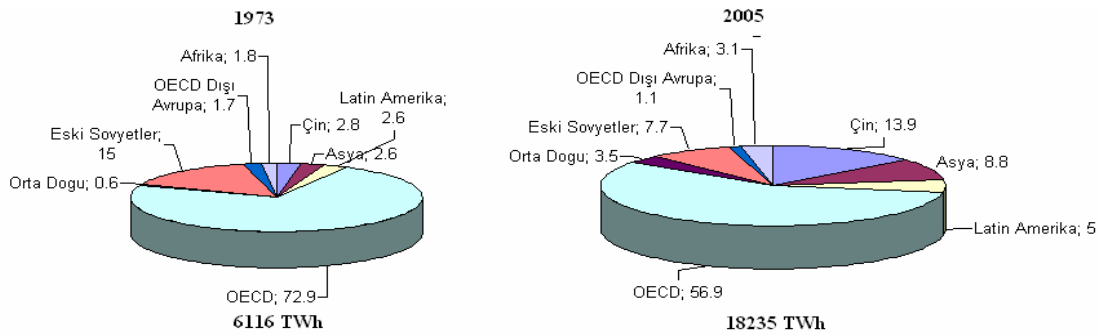
Rüzgar enerjisi potansiyeli çeşitli programlar kullanılarak belirlenebildiği gibi istatistik olarak da belirlenebilir. İstatistiksel olarak yapılan çalışmalar rüzgar enerjisi Weibull dağılımı kullanarak temsil etmenin çok iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Weibull dağılımının parametrelerini belirlemek için çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemler kullanılarak belirlenen Weibull parametrelerinin kullanılması ekonomik analizde farklı sonuçlar çıkmasına neden olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı bu çalışmada literatürde en fazla kullanılan moment, grafik ve en yüksek olasılık yönteminin karşılaştırılması Çanakkale’de ölçülen 6 yıllık rüzgar verileri kullanılarak yapılacak ayrıca bölgede rüzgar enerjisinden üretilecek elektriğin fiyatı çeşitli durumlar için belirlenecektir.

## 2. DÜNYADA ve TÜRKİYE’ DE ELEKTRİK ENERJİSİ DURUMU

### 2.1 Dünyada Elektrik Enerjisi Durumu

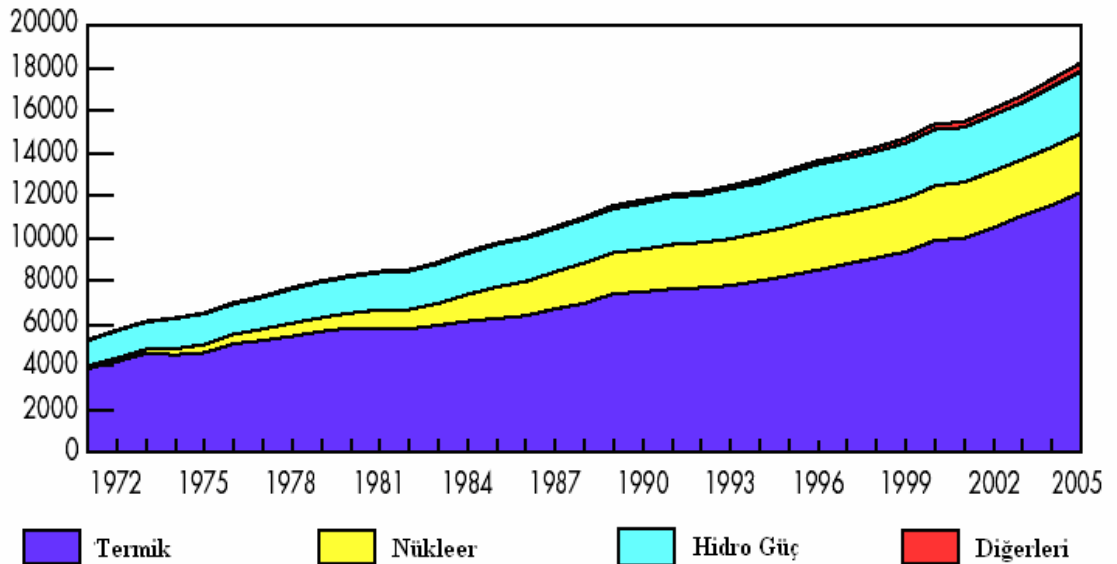
İlk kullanım amacı aydınlatma olan elektrik enerjisi, bugün sürdürülebilir bir kalkınmanın temel gereksinimlerindedir. Elektrik enerjisinin depolanmasının çok zor ve pahalıdır. Elektrik enerjisi üretildiği anda tüketilmek zorunda değildir ve neredeyse bütün ürün ve hizmetlerin üretiminde girdi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca elektrik enerjisinin tam ikamesinin olmamasından dolayı, arzında meydana gelebilecek her hangi bir sorun uzun dönemde bir ülkenin ekonomisini ve gelişmesini etkileyebilecek güce sahiptir. Bu nedenle sürekli, kaliteli ve ucuz elektrik sağlamak birçok sektör için hayati önem taşımaktadır. 2004 yılı sonunda dünya elektrik enerjisi kurulu gücü 3872 milyon kW’dir [10]. Bununla birlikte dünya nüfusunun 1.6 milyarlık kısmı yani yaklaşık % 25’i hala elektrik enerjisine ulaşmamıştır. Dünyada tüketimi en hızlı artan enerji formu elektrik enerjisidir. 2005 yılı dünya kişi başı elektrik tüketimi 2500 kWh iken ABD’de bu 12322 kWh, AB’de ise 6000 kWh seviyesindedir. Ülkemiz için ise bu değer 2200 kWh dir [4].

1973 yılı dünya elektrik üretimi 6116 TWh olarak gerçekleşmiş, OECD ülkelerinin payı %73.2 olmuştur. 2005 yılında ise dünya elektrik üretimi 2.98 kat artarak 18235 TWh olmuş ve bu üretimde OECD ülkelerini payı %56.9 seviyesine inmiştir [5]. 1973 ve 2005 yılı bölgesel elektrik tüketimleri Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



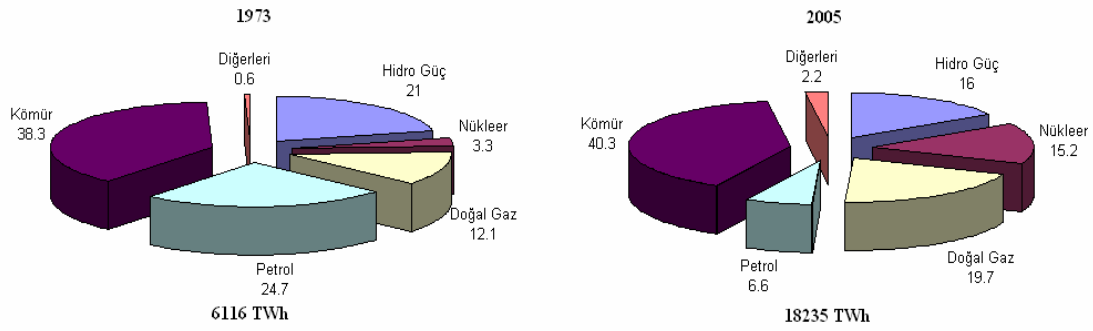
Şekil 2.1 1973 ve 2005 yılları için dünya elektrik tüketiminin bölgesel % dağılımı

İthal enerji kaynaklarına olan bağımlılık, artan yakıt fiyatlarının maliyetlere etkisi, özellikle elektrik enerjisi üretim birim maliyetindeki değişimler bakımından önemlidir. Bununla birlikte bazı enerji kaynaklarının belirli bölgelerde toplanmasından dolayı yaşanan sıkıntılar arz güvenliği kavramını geliştirmiş, elektrik üretimi için kullanılan kaynaklar çeşitlendirilmeye çalışılmış ve alternatif enerji kaynakları kullanımını yaygınlaştırmıştır. Arz güvenliği kavramı kaynakların yetersiz olmasından kaynaklanmamakta, özellikle petrol ve nükleer yakıtların dünya coğrafyasında eşit yayılmamasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca fosil kökenli yakıtlar günümüz için yeterli olsa da belirli bir ömürleri vardır. Bunların sonucunda özellikle elektrik enerjisi üretmek için kullanılan kaynakların kullanım oranları ve türleri tarihsel süreçte ülkeler ve bölgeler bazında ekonomik, teknik, çevresel ve benzeri nedenlerden dolayı değişiklikler göstermiştir. Şekil 2.2’de 1971-2005 yılları arasında dünya elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı gösterilmektedir. Şekil 2.3’de ise 1973 ve 2005 yılları için elektrik üretiminde kullanılan kaynaklar bazında değişimi gösterilmektedir. Bu dönem içerisinde petrolün elektrik üretimindeki payı %24.7’ den % 6.6 değerine gerilemiştir. Yine aynı dönemde hidroelektrik kaynakların payı % 21’ den % 16’ ya gerilemiştir. Buna karşılık doğal gazın payı %12.1 değerinden %19.7’ ye, nükleerin ise %3.3’ den %15.2’ ye, kömürün payı ise %38.3’ den %40.3’ e çıkmıştır [5].



Şekil 2.2 1971-2005 yılları arasında dünya elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı

1970’lerde yaşanan petrol ambargoları ve krizleri sonuncuda, uzun bir dönemde dar bir aralıkta olan petrol fiyatları aniden büyük miktarlarda artmasıdır. 1990’lardan itibaren temiz çevreye verilen öneminin artması, 1992 yılında Rio Sözleşmesi, 1994 yılında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, 1997 yılındaki Kyoto Protokolü, AB’nin direktiflerinin etkisi ve fosil enerji kaynakları kullanımı ile ekosistem arasındaki ilişkiler sonucunda yenilenebilir enerji kaynakları konusundaki çalışmalar hızlanmıştır.



**Şekil 2.3** 1973 ve 2005 yılları için elektrik üretiminde kullanılan kaynaklara göre değişimi

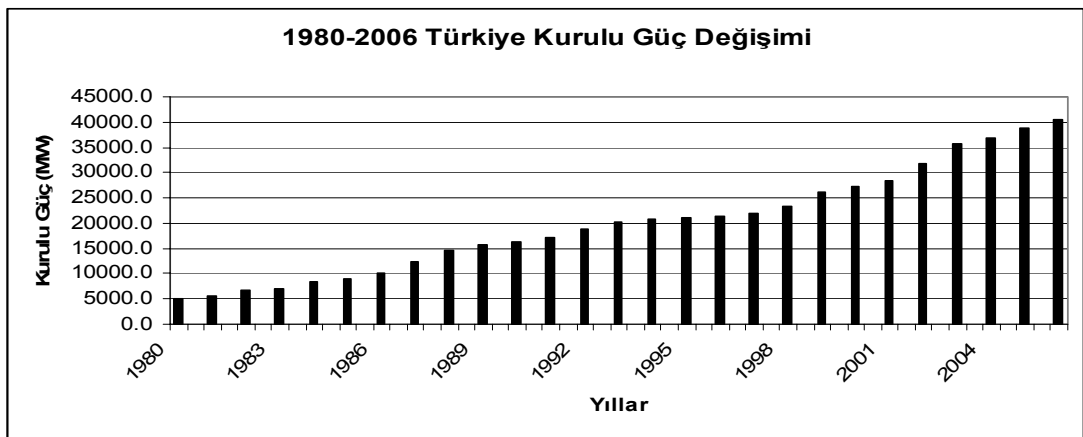
Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımıyla elektrik enerjisi üretimi, konvansiyonel kaynakların kullanılmasıyla elektrik enerjisi üretimine göre pahalı olabilese de arz güvenliğinin sağlanması, istihdam olanaklarının yaratılması ve temiz bir çevre bakımından olumlu sonuçlara sahiptir. Enerji kaynakları değerlendirilirken, başka ülkelere olan bağımlılık, elde edilme kolaylığı, kaynağın günümüzdeki fiyatı ve gelecekteki olası yaşanabilecek fiyat değişimleri, ayrıca çevresel etkiler dikkate alınarak kaynak kullanımına karar verilmelidir [4]. İleride fosil kökenli kaynakların azalması, kaynak temininde problemlere ve buna bağlı olarak fiyatlarında artışlara neden olabilecektir. Ayrıca fosil kökenli yakıtlardan karbon vergisi alınması konusunda dünyada çalışmalar devam etmektedir. Bu da gelecekte yenilenebilir kaynakların kullanılması ile elektrik enerjisi üretimini fosil yakıtlar kullanılması ile yapılan üretimden daha düşük maliyette olabileceğini göstermektedir. Ayrıca teknolojik gelişmeler sonucunda son 20 yıl içerisinde yenilenebilir enerji kaynaklarından olan biokütle, güneş, rüzgar kullanarak elektrik üretimi birim maliyetlerinde büyük miktarda düşüş meydana gelmiştir. Çünkü bu sistemlerin yakıt ve diğer giderleri yok denecek kadar azdır ve ilk yatırım maliyetleri ise teknolojik gelişmelerle birlikte zamanla düşmektedir. Bu nedenlerden dolayı ülkelerin kendi öz

kaynaklarından olan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını arttırmaları ve üretim teknolojileri konusundaki ar-ge çalışmalarını yapmaları oldukça önemlidir.

## 2.2 Türkiye Elektrik Enerjisi Durumu

Ülkemizin brüt elektrik enerjisi tüketimi 1980 yılında 24616.6 GWh iken 2006 yılında bu değer 7.08 kat artarak 174637.3 GWh olmuştur [13]. Bu dönem zarfında 2001 yılında yaşanan ekonomik krizin haricinde elektrik enerjisi tüketimi artışı pozitif değerler almıştır. Elektrik enerjisi tüketiminin % olarak en fazla arttığı yıl %12.5 ile 1984 yılı olurken en küçük artış ise %3.9 ile 1999 yılı olmuştur. Bununla birlikte bu süre zarfında ülkemiz elektrik enerjisi tüketimi ekonomik krizin yaşandığı dönem olan 2001 yılı sürekli ve kararlı bir şekilde artmıştır. Yine aynı dönemde kurulu gücümüz ise 5118.7 MW'dan 40564.8 MW'a çıkmıştır [13]. Şekil 2.4 elektrik enerjisi kurulu gücünün 1980-2006 döneminde değişimini göstermektedir.

Elektrik enerjisi tüketiminin sürekli artması ve bunun kamu üzerine getirdiği ekonomik yük aynı zamanda 1980' li yıllarda dünya genelinde hızlanan liberalleşme hareketleri sonucunda ülkemiz elektrik sektöründe de yaşanan finansman sıkıntısının giderilmesi için çeşitli yöntemlerin uygulanmasına neden olmuştur. Bu yöntemler Yap İşlet Devret, Otoprodüktörlük, Yap İşlet ve İşletme Hakkı Devri modelleridir. Bu modellerle de istenilen sonuçlara ulaşılamamasın da etkisi ile 2001 yılında Elektrik Piyasası Kanunu çıkarılmıştır [14,15].



Şekil 2.4 Türkiye elektrik enerjisi kurulu gücünün 1980-2006 döneminde değişimi

Ülkemizde tüketilen elektrik enerjisi miktarı neredeyse sürekli artmasına karşın, elektrik enerjisi üretiminde kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güç

içerisindeki payı aynı dönemde % 41.6'dan % 32.4'e düşmüştür. .Büyük güçlü hidro elektrik santraller dahil yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin toplam elektrik enerjisi üretiminde ki payı ise aynı dönemde %51.1' den %21.2' ye gerilemiştir, buna karşın neredeyse tamamen ithal bir kaynak olan doğal gazın payı 2006 yılında % 44 seviyesine çıkmıştır [13].

Ülkemizde tüketilen elektrik enerjisinin sektörlere göre dağılımı incelendiğinde sanayi sektörünün 1990 yılında %62.4 olan payı 2004 yılında %48.6' ya düşmüştür buna karşılık 1990 yılında konut sektörünün %35 olan payı 2004 yılında %47.6' ya çıkmıştır. Ulaştırma sektörünü payı ise %0.7 den küçük bir düşüşle %0.6' ya inmiştir. Tarım sektöründe ise bu pay %1.2'den %3.2' ye ilerlemiştir. 1990-2004 yılları arasında net elektrik enerjisi tüketiminin sektörel bazda dağılımı Tablo 2.1'de sunulmuştur [9].

Türkiye elektrik enerjisi tüketimi ve kurulu güç gereksinimini inceleyen, Türkiye Elektrik İletim AŞ (TEİAŞ) tarafından yapılan projeksiyon çalışmalarında iki referans senaryo dikkate alınmıştır. Senaryoların birincisine göre ülkemiz elektrik enerjisi tüketim değeri 2016 yılında 378234 GWh'e çıkması beklenirken, ikinci senaryoya göre ise bu değer 321567 GWh'e çıkması beklenmektedir. Elektrik üretim tesisi kurmak için alınan lisanslara dayalı yapılan tahminlere göre 2009 yılından itibaren elektrik enerjisi kurulu gücümüz elektrik enerjisi talebimizi karşılamaya yetmeyecektir [16]. Bu nedenle Türkiye'nin elektrik enerjisi kurulu gücünün artırılması gerekmektedir. Elektrik enerjisi kurulu gücünü artırırken de yerli linyit ve yenilenebilir kaynakların kullanımını ön planda tutulması için çalışmaların yapılması enerji arz güvenliğimiz bakımından önemlidir.

**Tablo 2.1** Sektörel bazda elektrik tüketimi

Sektörler	1990	1995	2000	2001	2002	2003	2004
Sanayi	29212	38007	38007	46989	50292	55099	58879
Konut ve Hizmetler	16688	27384	27384	46058	48336	52120	57637
Tarım	575	1513	1513	3203	3490	3657	3895
Ulaştırma	345	490	490	820	830	890	731
Toplam Net Tüketim (GWh)	46820	67394	67394	97070	102948	111766	121142

Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarının büyük bir bölümünü halen kullanmamaktadır. Bu yenilenebilir enerji kaynaklarından biri de rüzgar enerjisidir. Rüzgar enerjisi sistemlerinin ekonomik ömrü 20-25 yıl olarak hesaplanmaktadır. Son

yıllarda rüzgar enerjisinin elektrik enerjisi üretmek amacı ile kullanımı dünyada büyük bir artış göstermiştir. İlk yatırım maliyetleri, kullanılan kule ve türbin tipine göre değişmekle birlikte, genel olarak sistemin ömrü boyunca yapılan yatırımın %75-80'i kadar olmaktadır. Bu nedenle yakıt giderleri olmaması sabit fiyatlardan elektrik üretimini sağlamaktadır. Bunun uzun vadeli sonucu ise siyasi, ekonomik, çevresel dezavantajlardan muaf, yerel ve sabit fiyatla üretim yapabilen bir sistem olmasıdır. Bundan dolayı üretilen elektrik enerjisi fiyatını etkileyen en önemli faktörlerden bir tanesi bölgenin potansiyelidir. 1980'lerde ortalama olarak 8 Euro cent/kWh den fazla olan rüzgar enerjisinden elektrik üretim maliyetinin [1], günümüzde 1.4 Euro cent/kWh seviyelerine kadar düşen yerler olduğu yapılan çalışmalarda gösterilmektedir [12].

### 3. RÜZGAR ENERJİSİ

Rüzgar; dünyanın eğriliği, dönme eksenin eğimi, dünya yüzeyinin homojen olmayan yapısı nedeni ile, yeryüzünün eşit olmayan ısınması ve soğuması sonucu ortaya çıkan basınç farklılıkları ile oluşan hava hareketidir. Rüzgar türleri, küresel rüzgarlar, mevsim rüzgarları, günlük rüzgarlar ve yerel rüzgarlar olarak sınıflandırılabilir. Küresel rüzgarlar; alizeler, batılı rüzgarlar, kutup rüzgarlarını kapsar. Mevsimsel rüzgarlar muson rüzgarlarıdır. Günlük rüzgarlar ise kara ve deniz meltemleri, dağ ve vadi meltemleridir. Yerel rüzgarlar ise sam yeli, fön, bora, mistral, krivetz ve poyrazdır [17,18].

Bir bölgedeki rüzgarın şiddeti ve diğer karakteristikleri üzerinde bölgenin meteorolojik ve topografik yapısının önemli bir etkisi vardır. Kuvvetli rüzgarların oluşma ihtimali yüksek olan yerler şu şekilde sıralanabilir; Basınç gradyanının yüksek olduğu yerler, hakim rüzgar yönüne paralel vadiler, yüksek ova ve platolar, sürekli inici akış bölgeleri, tepe ve dağ zirveleri, jeostrofik rüzgar ve termal etkileşimlerin meydana geldiği kıyı şeritleri şeklinde sıralanabilir. Zayıf rüzgar alanları olma ihtimali yüksek olan yerler ise, hakim rüzgar yönüne dik vadiler, engebelerle gölgelenmiş arazi, kısa ve dar vadi ya da kanyonlar, pürüzlülük yüksekliğinin büyük olduğu yerlerdir [18].

#### 3.1 Dünyada Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerjisinin ilk kullanımı çok eskilere dayanmaktadır ve M.Ö 5000'li yıllarda Mısır'da Nil nehri kıyılarında yelkenli kayıkları hareket ettirmek için olduğu bilinmektedir. Ardından ise Çin, İran, Anadolu'da yel değirmenlerinde ve su pompalama amacı ile kullanımı hızlı bir şekilde artmıştır. Haçlı seferlerinin de etkisi ile rüzgar gücü kullanımı Avrupa'ya kadar ulaşmıştır [1].

Rüzgar enerjisi kullanılarak ilk elektrik üretimi ise 1881 yılında Danimarka'da gerçekleşmiştir [18]. 1920'lerin sonunda ise artan elektrik enerjisi ihtiyacına karşın rüzgar enerjisi sistemlerinin yeterli güven vermemesi sonucunda kullanımı hızlı bir şekilde azalmıştır. 2. Dünya savaşının ardından gelişen aerodinamik bilgisinin rüzgar



türbinlerine uygulanması ile rüzgar enerjisi kullanımı tekrar önem kazanmıştır. 1950’li yıllarda rüzgar enerjisi konusunda çalışmaların tekrar önem kazanmıştır. Bunun nedenlerinden bir tanesi de 2. Dünya savaşı sırasında enerji kaynaklarında dışa olan bağımlılığın öneminin anlaşılmasıdır. Fakat aynı dönemde konvansiyonel enerji kaynaklarının fiyatlarının düşük olması ve bu kaynaklara ulaşma konusundaki sıkıntıların aşılmış olduğu fikri, rüzgar enerjisi konusunda yapılan çalışmaların yavaşlamasına neden olmuştur. 1970’lerde yaşanan petrol krizleri ülkelerin kendi öz kaynaklarını kullanımının önemini bir kez daha ortaya koymuş ve rüzgar enerjisi konusunda yapılan çalışmalar tekrar hızlanmıştır.

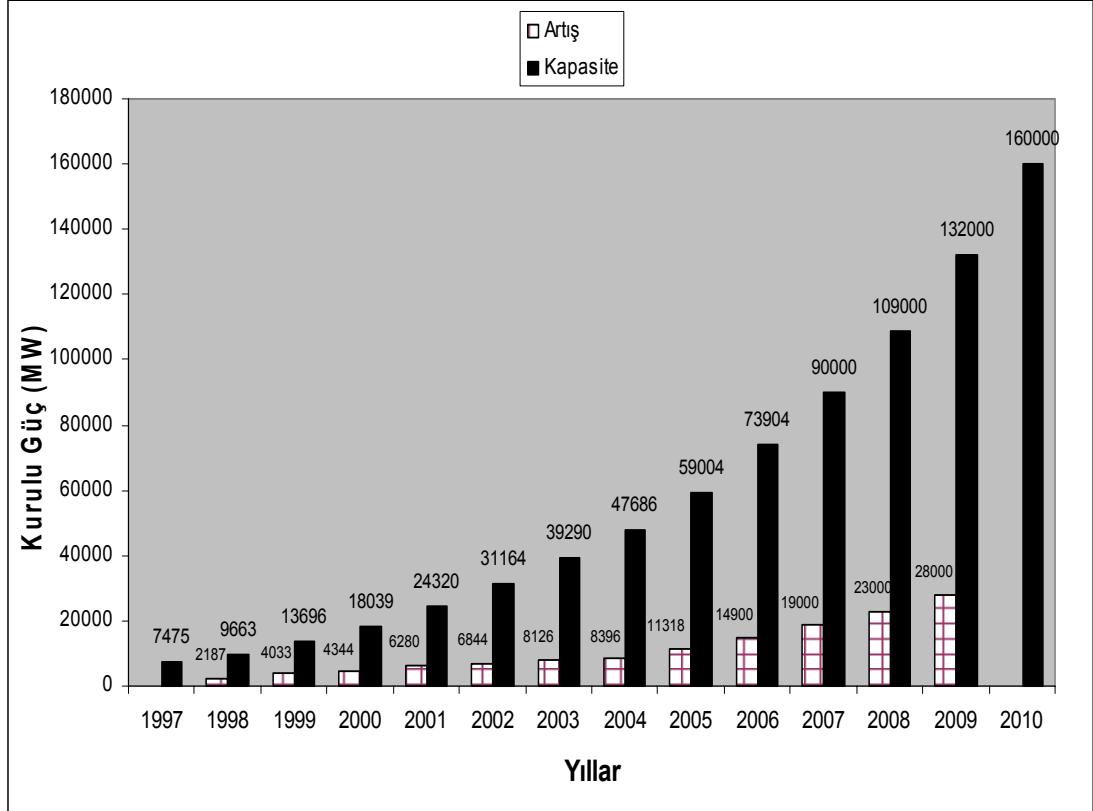
2006 yılı sonu itibari ile dünyada toplam rüzgar enerjisi kurulu gücü 73904 MW’dır. Rüzgar enerjisi son dönemde kullanımı en çok artan yenilenebilir enerji kaynağıdır. Bu kurulu güç değerinin 48062 MW’lık kısmı AB ülkelerindedir. Almanya’da 20622 MW, İspanya’da ise 11615 MW kurulu rüzgar santrali gücü vardır. Diğer ülkelerdeki durum ise Tablo 3.1’de gösterilmiştir [19]. Şekil 3.1’de ise 1997-2006 dönemindeki dünya rüzgar enerjisi kurulu gücünün değişimi ve 2010 yılı hedefleri aşağıdaki şekilde görülmektedir [11].

**Tablo 3.1** 2006 Sonu itibari ile rüzgar enerjisi kurulu gücü bakımından 1000 MW üstü ülkeler

Ülke	2005 Kurulu Gücü (MW)	2006’da Eklenen Kapasite (MW)	Artış oranı 2005-2006 (%)	2006 Kurulu Gücü (MW)
Almanya	18428	2194	11.9	20622
İspanya	10028	1587	15.8	11615
ABD	9149	2454	26.8	11603
Hindistan	4430	1840	41.5	6270
Danimarka	3128	8	0.3	3136
Çin	1260	1145	90.9	2405
İtalya	1718	405	23.6	2123
İngiltere	1353	610	45.1	1963
Portekiz	1022	628	61.4	1650
Fransa	757	810	106.9	1567
Hollanda	1224	336	27.5	1560
Kanada	683	768	112.4	1451
Japonya	1040	354	34	1394
Toplam	59004	14900	25.3	73904

Uluslararası Enerji Ajansının (IEA) rüzgar enerjisi konusunda 2007 yılında yayınladığı çalışmasında 2010 yılı için, Japonya’nın rüzgar enerjisi kurulu gücünü 3000 MW’a, Portekiz’in 3750 MW’a, İspanya’nın 20155 MW’a çıkarma hedefleri olduğu belirtilmektedir. Ayrıca yine aynı dönemde Norveç’in rüzgar enerjisi

kullanarak ürettiği elektrik miktarını 0.671 TWh miktarından 3 TWh'e, çıkartmayı hedeflediği belirtilmektedir [20]. Bununla birlikte BTM'nin (danışmanlık firması) 2007-2011 yılı için yaptığı Avrupa ülkeleri bazındaki tahminler Tablo 3.2'de özetlenmiştir [21]. 2006 sonu yaklaşık 49 bin MW olan kurulu güç değeri 2011 yılında yaklaşık 59 bin MW'lık bir artışla 108 bin MW değerine çıkması beklenmektedir.



**Şekil 3.1** Rüzgar enerjisi kurulu gücünün 1997-2007 gelişimi ve 2010 hedefleri

Rüzgar enerjisi; enerji arz güvenliğinin, bağımsızlığının sağlanması ve enerji arzına katkısı bakımından önemli bir kaynaktır. AB'nin 2010 yılı için yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı ile elektrik üretimi hedefindeki en önemli katkıyı rüzgar enerjisinin yapacağı tahmin edilmektedir. Bununla birlikte sadece çevresel sorunların çözülmesine yardımcı olmakla kalmayacak aynı zamanda ticari faydalar, teknolojik araştırmalar, ihracat ve istihdam olanakları sağlayacaktır. Tablo 3.3' de rüzgar enerjisi endüstrisinin meydana getirdiği iş olanakları çeşitli örnek ülkeler için görülmektedir [20].

**Tablo 3.2** Avrupa ülkeleri için 2007-2011 rüzgar enerjisi kurulu güç tahminleri

Ülkeler	2007	2008	2009	2010	2011	Eklene Kapasite (MW)
Avusturya	100	200	250	250	250	1050
Belçika	100	100	150	250	100	700
Danimarka	20	30	250	300	150	750
Finlandiya	50	50	100	100	100	400
Fransa	1000	1200	1400	1600	2000	7200
Almanya	1800	1600	1400	2000	2500	9300
Yunanistan	150	200	200	300	300	1150
İrlanda	200	200	300	300	350	1350
İtalya	800	800	1000	1000	1200	4800
Hollanda	150	100	250	100	300	900
Norveç	150	250	400	500	800	2100
Polonya	150	250	300	400	700	1800
Portekiz	700	700	800	800	800	3800
İspanya	1600	1700	2000	2000	2200	9500
Türkiye	150	200	250	300	300	1200
İngiltere	900	1500	2000	2000	2500	8900
Geri Kalan Avrupa	400	500	500	600	600	2600
Toplam	8610	9760	12030	13150	15600	59150

2006 yılı verilerine göre Almanya 30500 GWh ile elektrik enerjisi ihtiyacının %5.6' sını, İspanya 23372 GWh ile elektrik enerjisi ihtiyacının %8.72'ini, ABD 31000 GWh ile elektrik enerjisi ihtiyacının %0.77'ini, Danimarka 6108 GWh ile elektrik enerjisi ihtiyacının %16.78'ini, rüzgar enerjisinden sağlamaktadır. Danimarka'nın rüzgar enerjisinin elektrik üretimindeki oranı, yılın bazı dönemlerinde %32'ler seviyesine kadar çıkabilmektedir. Tablo 3.4' de ise 1996-2005 yılları arasında rüzgar enerjisinin dünya elektrik tüketimindeki payı gösterilmektedir [21]. Örnek ülkelerin durumu ve toplam rüzgar türbinleri sayısı Tablo 3.5' de gösterilmektedir [20].

**Tablo 3.3** Rüzgar enerjisi sektöründe çalışan işçi sayısı

Ülke	Almanya	İspanya	ABD	Danimarka	İtalya	İngiltere	Kanada
Tahmini İşçi Sayısı	70000	35000	10000	26000	4500	4000	1200

Rüzgar Gücü 12 raporuna göre 2020 yılında dünyada tüketilen elektrik enerjisi ihtiyacının % 12'sinin rüzgar enerjisinden karşılanmasının teknik ve ekonomik olarak mümkün olduğu belirtilmekte, toplam rüzgar enerjisi kurulu gücünün ise 1.2 Milyon MW'ı aşacağı, sektörde yıllık %20-25'lik bir büyümenin olacağı, bunun iki milyon kişiye iş olanakları sağlayacağı ve 10000 milyon ton CO<sub>2</sub> salınımının azaltılmasının mümkün olacağı belirtilmektedir [11].

**Tablo 3.4** Rüzgar enerjisinin dünya elektrik tüketimindeki payı

Yıllar	Rüzgar Enerjisinden Üretilen Elektrik Miktarı (TWh)	Dünya Elektrik Üretimindeki Payı (%)
1996	12.23	0.09
1997	15.39	0.11
1998	21.25	0.15
1999	23.18	0.16
2000	37.3	0.25
2001	50.27	0.32
2002	64.81	0.4
2003	82.24	0.49
2004	96.5	0.55
2005	120.72	0.67

Rüzgar enerjisine yatırım yapılırken ilk olarak en uygun olan alanlar değerlendirilmek istenir. Bu nedenle bir bölgenin potansiyelinin ne derece kullanıldığı hakkında bilgi vermesi bakımından kapasite faktörü önemlidir. Bir bölgede düşük kapasite faktörlü yatırımlar yapılması, oranın ekonomik potansiyel limitine yaklaştığını gösterir. Rüzgar enerjisi kurulu gücü en fazla ülke olan Almanya'nın kapasite faktörü ortalama değerinin %20.9, son yıllarda hızlı bir şekilde rüzgar enerjisi kurulu gücünü artıran Hindistan'da ortalama kapasite faktörü değerinin ise %20.5 olduğu tahmin edilmektedir. Dünyanın ortalama kapasite faktörünün ise %23.4 olduğu belirtilmektedir [21]. Rüzgar enerjisinden elektrik üretmenin maliyeti kullanılan türbin tipi, türbin fiyatı ile ömrü, işçilik, bağlantı bakım onarım giderleri, enflasyon oranı, yatırımın faize yapılması gibi durumlara göre değişmektedir. Yapılan çalışmalar, farklı türbin tipleri ve enflasyon oranları için elektrik üretim maliyetinin, %30-40 kapasite faktörü ile çalışan bir bölgede, tahmini maliyetinin 2-3 euro cent/kWh seviyesinde olabileceğini göstermektedir [22]. Kömür, linyit, doğal gaz kullanarak elektrik enerjisi üreten santrallerin elektrik enerjisi üretimi kWh maliyeti ile %30-40 kapasite faktörü ile çalışan rüzgar enerjisi santrallerinin maliyeti yaklaşık aynıdır.

Tablo 3.1, Tablo 3.2 ve Tablo 3.5'den görülebileceği gibi dünyada rüzgar enerjisi kullanımı ülkeler ve bölgeler bazında farklı düzeylerde. Bunun nedeni ise ülkelerin buldukları coğrafi bölgelere bağlı olarak farklı rüzgar potansiyeline ve enerji kaynaklarına sahip olmaları, ayrıca uygulanan destek modellerinin ve politikaların ülkeden ülkeye farklılıklar göstermesindedir. Ülkelerin amacı, sadece

rüzgar enerjisi kurulu gücünü artırmak değil, aynı zamanda kendi rüzgar enerjisi sektörünü de geliştirmek olmalıdır.

**Tablo 3.5** Örnek ülkelerin rüzgar enerjisinin elektrik enerjisi tüketimindeki payı

Ülke	İşletmedeki Türbin Sayısı (Adet)	Rüzgar Enerjisi Kurulu Gücü (MW)	Rüzgar Enerjisi Elektrik Üretimi (GWh/yıl)	Elektrik Talebi (TWh/yıl)	Rüzgar Enerjisinin Elektrik Üretimindeki Payı (%)
ABD	-	11603	31000	4027	0.77
Almanya	18685	20622	30500	540	5.65
Avustralya	544	817	2504	208	1.2
Danimarka	5274	3136	6108	36.4	16.78
Hollanda	1792	1560	2747	116	2.37
İspanya	13842	11615	23372	268	8.72
İsveç	812	564	986	150	0.66
İtalya	2575	2123	3215	338	0.95
Japonya	1358	1394	1910	882.6	0.22
Kanada	1186	1451	3800	550	0.69
Norveç	163	325	671	122	0.55
Portekiz	964	1650	2926	49	5.97

### 3.2 Uygulanan Destek Modelleri

Rüzgar enerjisi konusunda dünyada uygulanan destek modelleri elektrik enerjisi sektöründeki liberalleşme çalışmalarına bağlı olarak zaman içinde değişmiştir. Bugün tartışılan konu ise hangi modelin diğerlerine göre daha avantajlı olduğudur. Yatırımlar yapılırken en önemli faktörlerden bir tanesi risk analizi ve geri ödeme süresidir. Uygulanan destek ve teşvik uygulamaları ile yatırım riskleri en aza inebilmekte, güçlü ve güvenilir bir piyasa yapısı oluşmakta, bunun sonucunda da yapılan yatırımların miktarı artmaktadır. Bu nedenle rüzgar enerjisi kurulu gücü ve sektörü yeterli destek ve teşvik politikalarının uygulandığı ülkelerde daha fazla gelişmektedir.

Rüzgar enerjisi kullanımını artırmak için genelde iki çeşit destek modeli bulunmaktadır. Bunlardan birincisi; sabit fiyat sistemleri, ikincisi ise kota sistemleridir [11].

#### 3.2.1 Sabit Fiyat Sistemleri

Sabit fiyat sistemleri, yatırım sübvansiyonları, sabit fiyat tarifeleri, sabit prim sistemleri ve vergi kredilerini kapsamaktadır. Sabit fiyat sistemlerinde üreticiye ödenecek elektrik fiyatı hükümetler tarafından belirlenir [11]. Sabit fiyat sistemlerinde, belirli dönem süresince piyasa fiyatlarının üzerinde bir fiyata elektrik

enerjisi satın alınmaktadır. Böylelikle piyasa riskleri azalacak ve uygun krediler daha kolay bulunabilecektir. Bu sistem bazı değişikliklerle 1988'de Portekiz, 1990'da Almanya, 1992'de Danimarka, 1994'de ise İspanya'da uygulamaya konulmuştur. Son yıllarda birçok Avrupa ülkesi bu sistemi benimsemiştir. Bu sistemi uygulayan ülkelerde rüzgar enerjisinden üretilen elektriğin kWh'inin fiyatı 7.7 ile 9.3 euro cent/kWh arasında değişmektedir. Sistemle ilgili politik bir problem ise, sabit fiyat uygulamalarının geleneksel piyasa işleyişine uymamasıdır. Örneğin, Danimarka hükümeti AB elektrik piyasasında serbestleşme direktifini uygulamaya başladıktan sonra bunun farkına varmış ve uygulamakta olduğu bu sistemi yeşil sertifika sistemi ile değiştirmek için uygulamalar yapmıştır.

**Yatırım Sübvansiyonları:** Rüzgar enerjisi sistemlerinin ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı, yatırım tutarının belirli bir yüzdesinin devlet tarafından finanse edildiği sistemlerdir. Yatırım sübvansiyonları büyük güçlü, fazla üretim yapabilen ama verimsiz sistemlerin oluşmasına neden olmuştur. Bu nedenle bu sistemin tek başına kullanılması dezavantajlar ortaya çıkarabilir. Yatırım sübvansiyonları oranları 1979–1989 yılları arasında Danimarka'da %30-%10 arasında uygulanmıştır. Günümüzdeki eğilim yatırım sübvansiyonlarının uygulanmaması şeklindedir [11,23].

**Sabit Fiyat Tarife Sistemleri:** Elektrik şebekesine verilen her kWh için belirli bir miktar sabit ücretin ödendiği sistemdir. Elektrik enerjisi fiyatının dönemsel olarak belirlenebildiği bu sistemde yatırımcı riskleri daha azalacak ve bunun sonucunda uzun dönemli krediler alınabilecektir. Almanya 20 yıllık bir dönem için (yaklaşık türbin ömrü) üretilen elektrik enerjisi kWh'i için zamanla değişen bir sistemi uygulamaktadır. Bununla birlikte bazı ülkelerin uygulamalarında süre tam olarak belirtilmemiştir. Almanya, İspanya, Danimarka da rüzgar enerjisi kullanımını artırmada yararlı olmuş bir uygulamadır. Sabit fiyat sistemleri daha verimli rüzgar türbinlerinin geliştirilmesi için önemli bir faktördür. Çünkü sektördeki talep bu yönde olmaktadır [11,22].

**Sabit Prim Sistemi:** Sabit fiyat sisteminin başka bir türü olan sabit prim sisteminde, hükümetler elektrik enerjisi kWh başına ödenecek ücreti sabitlemek yerine elektrik enerjisi fiyatında belirli bir oranda artış yaparak alım yapmaktadırlar [11].

Vergi Kredileri: Sabit fiyat sisteminin başka bir türü olan vergi kredileri sistemi ABD’de uygulanmaktadır. Verilen teşvik, elektrik enerjisinin kWh’i başına belirli bir oranda vergiden muaf tutulma şeklindedir [11].

### 3.2.2 Kota Sistemi

İkinci sistem ise ihale ve yeşil sertifika sistemlerinden oluşan yenilenebilir kota sistemleridir. Yenilenebilir kota sistemlerinde, yenilenebilir elektrik miktarı hükümetlerce belirlenirken, fiyat oluşumu piyasa şartlarına bırakılmıştır [11]. Yeşil sertifika sisteminin amacı, şu anki piyasa koşullarında rekabet etmesi zor olan yenilenebilir enerji kaynaklarından üretimin cazip hale getirilmesidir. Hükümetler tarafından alım yapan kuruluşlara belirli zorunlu kota miktarı uygulandığından yenilenebilir enerji kaynaklarından üretim az ise bu kaynaklardan üretilen elektrik enerjisinin fiyatının artmasına neden olacaktır. Üretim miktarı arttığı zaman ise fiyatlar düşecektir. Yani arz artıkça fiyatların düşmesi, buna karşılık arzın yetersiz kaldığı durumlarda fiyatların artması beklenmektedir. Bununla birlikte, bir alt ve üst limit değeri belirtilmiştir. Bu sistem ilk olarak 1998 yılında Hollanda’da uygulanmıştır [22].

Rekabetçi Teklif Verme, İhaleye Çıkma: Bu sistemde genellikle 15-20 yıl süreli olan enerji alım anlaşmaları için ihaleye çıkılmaktadır. En düşük fiyatı veren kurum ihaleyi kazanmaktadır. Rüzgar enerjisi potansiyeli yüksek bölgelerde düşük fiyatlarla enerji üretimi olacağı için bu bölgelerde ihale fiyatları düşük olacaktır. Uzun dönemli alım garantileri olması yatırımcılar için riski ortadan kaldırmaktadır. Bununla birlikte yatırımcılar ihaleyi kazanmazlarsa hazırlanan fizibilite raporu için yapılan yatırım boşa gitmiş olacaktır. Bu sistem Fransa, İngiltere ve İrlanda’da halen kullanılmakta olan bir sistemdir. Bu sistemin bir diğer riskli yönü ise rüzgar enerjisi tesisleri kurmak için gerekli birim rüzgar türbini kW fiyatının yıllara bağlı olarak düşüşler göstermelerinden dolayı, şirketlerin yatırımlarını gerçekleştirmek için beklentilerine neden olmasıdır. Hatta bu, yatırımın yapılmamasına kadar ilerlemektedir. Örneğin İngiltere’de 2000 yılına kadar 1000 MW’ın üzerinde ihaleler sonuçlanmasına rağmen, 2000 yılı kurulu gücü 400 MW’ı geçememiş, yani yatırımlar yapılmamıştır [11,22]. Bu nedenle bu model yatırımın yapılmaması durumunda belirli bir ceza içeren anlaşmalarla birlikte uygulandığında daha verimli işlemesi sağlanabilir. İngiltere’de bu sistem son dönemlerde yerini alınıp satılabilir yeşil sertifika uygulamasına bırakmıştır.

Alınıp Satılabilir Yeşil Sertifika: Bu sistemi ihale sisteminden ayıran temel fark elektrik enerjisi fiyatının uzun dönemli anlaşmaların değil günlük olarak belirlenmesidir. Bu nedenle yatırım yapmak daha riskli olmaktadır. Bu sistemde devlet, yenilenebilir kaynaklı belirli miktar elektriğin piyasa tarafından üretim, satış ve dağıtımının yapılması için zorunluluklar getirmektedir. Bu sertifika sistemi sayesinde yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektriğin miktarı kayıt altına alınabilmekte, alıcıların yükümlülüklerini yerine getirip getirmediği denetlenebilmektedir. Bu sistemin verimli olarak işleyebilmesi için yeşil sertifika satın almayanlara uygulanacak cezaların dikkatli bir şekilde belirlenmesi gereklidir [11]. Tablo 3.6' da iki sistemin avantajları ve riskleri karşılaştırılmalı özet olarak verilmektedir [24].

AB ülkelerinde baskın olan eğilim fiyatların sabitlemesi şeklinde iken, İngiltere ve İrlanda gibi miktar sabitleme eğiliminde olan ülkeler de vardır, ABD' de ise bir federal vergi yasası bulunmakla birlikte eyaletler seviyesinde sabit miktar içeren bir sistem de uygulanmaktadır. Uygulanan bu sistemler sonucunda oluşan rüzgar enerjisinden üretilen elektrik enerjisi fiyatları Tablo 3.7' de gösterilmektedir [25]. Verilen destek düzeyleri ülkelerin politikalarına göre değişmektedir. Verilen teşviklerin ve ülkedeki enerji kaynakları potansiyel ve çeşidinin de etkisi ile rüzgar enerjisi kullanım oranları ülkeler ve bölgeler bazında değişmektedir. Verilen teşvikler sonucunda rüzgar enerjisi kullanımı hızlı bir şekilde artmış ayrıca bunun sonucunda fosil kökenli yakıtların kullanılması sonucunda oluşan sera gazı emisyonları atmosfere verilmemiştir, böylece temiz bir çevre için de rüzgar enerjisi kullanımının önemi anlaşılmaktadır.



**Tablo 3.6** Her iki sistemin karşılaştırılması

<b>Sabit Fiyat Sistemi</b>	<b>Kota Sistemi</b>
<b>Avantajları</b>	<b>Avantajları</b>
-İstikrarlı fiyat yatırım güvencesi getirirler, girişimcileri piyasada teşvik eder.  -Türbin üreticilerinin daha verimli sistemler yapmaları için baskı oluşturur, bunun sonucunda birim üretim maliyetleri düşer.  -Piyasa öncesi aşamadan piyasadaki rekabete kadar bir dizi teknolojiye açıktır. Dolayısıyla yeniliklere müsaittir  -Bölge rüzgar potansiyeli ile ilgili olarak, ayırım yapmak mümkündür.	-Fiyatı düşürür, çünkü minimum fiyat şartı genelde yoktur.  -Pazarlanabilir belgeler aracılığı ile verimli piyasa rekabeti sağlanır.  -Teknolojik olarak tarafsız olduğu söylenebilir.  -Kotalardaki uygun artışlarla piyasa büyümesinin planlanmasını sağlar.
<b>Riskleri</b>	<b>Riskleri</b>
-Sabit fiyatın çok yüksek uygulanma riski  -Piyasa gelişimde kontrolü kaybetme riski	-Dalgalanan sertifika değerleri ve bürokratik karmaşalar belirsizlik ve engeller yaratır  -En ucuz yerlerin ilk önce değerlendirilmesine imkan tanır

**Tablo 3.7** Rüzgar enerjisi alım fiyatları

Ülke	Fiyat (Euro cent/kWh)
Almanya	6.2 – 8.5
Fransa	8.4
Portekiz	7.5 – 7.9
Avusturya	7.8
İspanya	6.3 - 7.5
Yunanistan	6.4
Hollanda	9.6 – 9.9

### 3.3 Rüzgar Türbini Sektörü

Rüzgar enerjisinin kullanımı artırılırken yapılmak istenen bir diğer gelişme ise rüzgar türbini ve alt sektörlerinin aynı zamanda geliştirilmesidir. Devletler tarafından rüzgar türbini üreticisi firmalara doğrudan destekler verilebildiği gibi dolaylı yollardan da destekler verilebilmektedir. Bunun sonucunda, rüzgar enerjisi ekipmanlarının üretimi, bakım-onarımı, projelendirilmesi ve inşaatı gibi iş olanakları oluşmakta,

böylelikle ticari büyüme olmakta, elde edilen vergi gelirleri artmaktadır. Türbinlerin taşıma mesafelerinin kısılması ve yerli üretimin daha ucuz olabilmesinden dolayı rüzgar enerjisinden üretilen elektrik enerjisinin fiyatı daha düşük seviyeye inecektir. Bununla birlikte rüzgar enerjisi kullanımının artırılması için uygulanan teşvikler ve destek politikaları, rüzgar türbin ve alt sektörlerinin aynı anda gelişmesi anlamına gelmemektedir. Çünkü türbin sektörü konusunda ar-ge faaliyetleri uzun süredir sürdürülmekte ve günümüzde 5 MW büyüklüğünde türbinlerin üretimi ve satışı yapılmaktadır [26]. Sektörde faaliyet gösterecek firmaların ise ar-ge konusundaki yeterli alt yapıyı oluşturmaları kolay değildir. Danimarka, Norveç ve Hollanda yaklaşık aynı zaman diliminde rüzgar enerjisi konusunda ar-ge çalışmalarına başlamalarına rağmen Norveç ve Hollanda yeterli başarıya ulaşamamıştır [23,27]. Bu nedenle sektörde faaliyet göstermek isteyen firmalar patent haklarının da etkisi ile diğer firmalar ile ortaklık kurmaya ya da onları satın almaya çalışmaktadırlar. Ayrıca bu firmaların uzun süredir sektörde faaliyet göstermesi sonucu markalaşmaları, servis ve bakım garantileri, sektöre girmeyi zorlaştıran diğer etkenler arasındadır. Bunun yanı sıra firmaların faaliyetlerini sürdürebilmeleri için 150-200 MW'lık yıllık satış değerlerine ulaşmaları gerekmektedir. Firmaların yeni kurulmuş olması onları ilk aşamada daha çok iç pazara çalışan firmalar yapacağından iç pazarın stabil ve kararlı bir şekilde büyümesi önemlidir [28]. Günümüzde türbin endüstrisinin ar-ge konusundaki en önemli gereksinimi büyük güçlü, düşük fiyatlı, verimi yüksek, şebeke etkileşimi konusunda gelişmiş türbinlerin üretilmesidir. Tablo 3.8'de 2004-2005-2006 yıllarında rüzgar enerjisi sektöründe faaliyet gösteren satışları bakımından en büyük 10 firmanın sektördeki payları görülmektedir [21,29,30].

Tablo 3.8'den görüldüğü gibi 2006 yılı satışlarının neredeyse % 75'lik kısmı Vestas, Gamesa, GE Wind ve Enercon tarafından gerçekleştirilmiştir. Danimarka kökenli Vestas ve Siemens rüzgar türbini satışları pazarının 1/3'ünden fazlasını kapsamaktadır. Danimarka kökenli şirketler çok önceden kurulmalarının, ar-ge konusundaki liderliklerinin, patent haklarının, uzun dönem garanti ve bakım onarım sağlamalarının da etkisi ile Tablo 3.8'den görülebileceği gibi dünya türbin sektöründe hakimiyetleri söz konusudur. Danimarka firması olan Vestas 2000 yılında üretiminin % 86'sını ihraç ederken, 2004-2006 arasında ihracat oranı %99 oranını geçmiştir. Şirketin 2005 yılı satışlarının ekonomik tutarı 3.583 milyar dolar iken 2006 yılı bu rakam 3.854 milyar dolar seviyesine çıkmıştır [31].

**Tablo 3.8** 2004-2006 Arasındaki en büyük 10 firma

		2004yılına Kadar market payı (%)	2004 deki market payı (%)	2005 deki Market Payı (%)	2006 yılı market payı (%)	2006 Yılına Kadarki Satışları (MW)	2006 yılı satışları (MW)	2006 sonuna kadar ki satışları	2006 Sonu Kadar ki Market Payı (%)	2004- 2005-2006 market sırası
Almanya										
	Enercon	13.9	15.1	13.2	15.4	8685	2316	11001	14.8	#3,#3,#4
	Repower	2.3	3.2	3.1	3.2	1522	480	2002	2.7	#7,#7,#8
	Nordex	4.7	2.2	2.6	3.4	2704	505	3209	4.3	#10,#8,#7
İspanya										
	Gamesa	12.7	17.3	12.9	15.6	7,912	2346	10258	13.8	#2,#4,#2
	Ecotecnia	1.5	2.5	2.1	*	*			*	#9,#9,#*
	Acciona	*	*	*	2.8	372	426	798	1.1	#*,#*,#9
ABD										
	GE Wind	10.5	10.8	17.7	15.5	7370	2326		13	#4,#2,#3
Danimarka										
	Vestas	34.6	32.7	27.9	28.2	20,766	4239	25005	33.7	#1,#1,#1
	Siemens	7.6	6	5.5	7.3	4502	1103	5605	7.5	#5,#6,#6
Hindistan										
	Suzlon	1.5	3.8	6.1	7.7	1485	1157	2642	3.6	#6,#5,#5
Çin										
	Gold Wind	*	*	*	2.8	211	416	627	0.8	#*,#12,#10
Japonya										
	Mitsubishi	2	2.5	2	*	*	*	*	*	#8,#10,#*

2006 yılında rüzgar enerjisi kurulu gücünü en çok artıran ilk on ülkede ve bu ülkelerde en fazla satış yapan rüzgar türbin üreticileri Tablo 3.9’da gösterilmektedir [21]. Tablo 3.9’ dan da görülebileceği gibi yatırım yapılırken en fazla tercih edilen rüzgar türbini ilk beş ülkede kendi üreticilerinin türbinleridir. İlk beş dışında kalan Fransa, Kanada, İngiltere, Portekiz, İtalya’da ise rüzgar türbini üretimi gelişmemiş bu nedenle kendi ürünlerini tercih edebilme şansları yoktur. Rüzgar türbinlerinin üretimi ve satışı konusunda bir diğer önemli faktör ise bölgenin özelliklerine daha iyi uyan türbin üretimidir, bir bölgeden talep ne kadar fazla ise o bölge için daha uygun olan türbinin yapılma olasılığı daha fazla olmaktadır. Böylece hem türbin üretim maliyetleri hem de bunun sonucunda kWh elektrik enerjisi üretim maliyetleri düşecektir.

Günümüz de yapılan tahminlerde dünya rüzgar enerjisi kurulu gücü bakımından önemli ülkeler olan ve aynı zamanda türbin üreticisi konumunda olan ülkelerin rüzgar enerjisi kurulu güçlerini daha da artıracaklarını göstermektedir. Fakat elektrik şebekesinin özelliklerinden dolayı şebeke güçlendirmelerinin yapılması gerekmektedir. Aksi halde daha fazla rüzgar enerjisi kullanmaları teknik olarak

sorunlara yol açabilir. Ayrıca bu ülkelerin elektrik kullanımları belirli bir doygunluğa erişmesi nedeni ile yeni tesisler kurulması ve arzın talepten fazla olması durumunda bunun satışını yapacak yeni yerler bulmaları gerekmektedir. Almanya ve Danimarka gibi ülkelerde uygulanmakta olan bir başka yöntem ise küçük güçlü eski türbinlerin daha büyük güçlü ve verimi yüksek yeni türbinlerle değiştirilmesidir.

**Tablo 3.9** Rüzgar Türbini Seçimleri

Ülkeler	En fazla satış yapan ilk 3 firma
ABD	GE Wind-Vestas-Siemens
Almanya	Enercon-Vestas-Repower
Hindistan	Suzlon-Enercon-Vestas
Çin	Goldwind-Vestas-Gamesa
İspanya	Gamesa-Acciona-Vestas
Fransa	Nortex-Vestas-Repower
Kanada	GE WIND-Seimens-Repower
İngiltere	Vestas-Siemens-Repower
Portekiz	Vestas-Gamesa-Enercon
İtalya	Gamesa-Vestas-Enercon

Rüzgar türbinleri hız kontrolüne göre 4 temel çeşit altında incelenebilir. Bunlar sabit hızlı rüzgar türbinleri (A tipi), değişken hızlı türbinler ile değişken rotor dirençli türbinler (B tipi), kısmi ölçekli frekans çeviricili değişken hızlı (C tipi), tam ölçekli frekans çeviricili değişken hızlı (D tipi) türbinleridir [32].

A tipi rüzgar türbinlerinde, sincap kafesli asenkron generatörler kullanılmaktadır. Şebeke bağlantısı bir yol verici üzerinden olmaktadır. Bu türbinler reaktif enerji ihtiyacını elektrik şebekesinden karşılamaktadırlar. Bu nedenle bu türbinlerle birlikte yeterli kompanzasyon sisteminin oluşturulması şebeke kayıplarının azaltılması ve elektrik şebekesinin enerji kalitesi bakımından önem arz eder.

B tipi rüzgar türbinlerinde, bilezikli asenkron generatörler kullanılmaktadır. Generatör sistemi elektrik şebekesine doğrudan bağlanabildiği gibi bir yol verici vasıtası ile de bağlanabilir. Bu generatör sistemi içinde ayrı bir kondansatör grubunun tesis edilmesi enerji kalitesi bakımından önemlidir. Değişken direnç uygulaması sayesinde rotor direnci kontrol edilebilmekte böylece kayma istenilen sınırlar altında tutulabilmektedir.

C tipi rüzgar türbinlerinde, B tipinde olduğu gibi bilezikli asenkron generatörler kullanılmaktadır. Bununla birlikte reaktif güç kompanzasyonu B tipine göre daha gelişmiştir.

D tipi rüzgar türbinlerinde ise bilezikli senkron genaratör, bilezikli asenkron genaratör ya da sürekli mıknatıslı senkron genaratörler kullanılmaktadır.

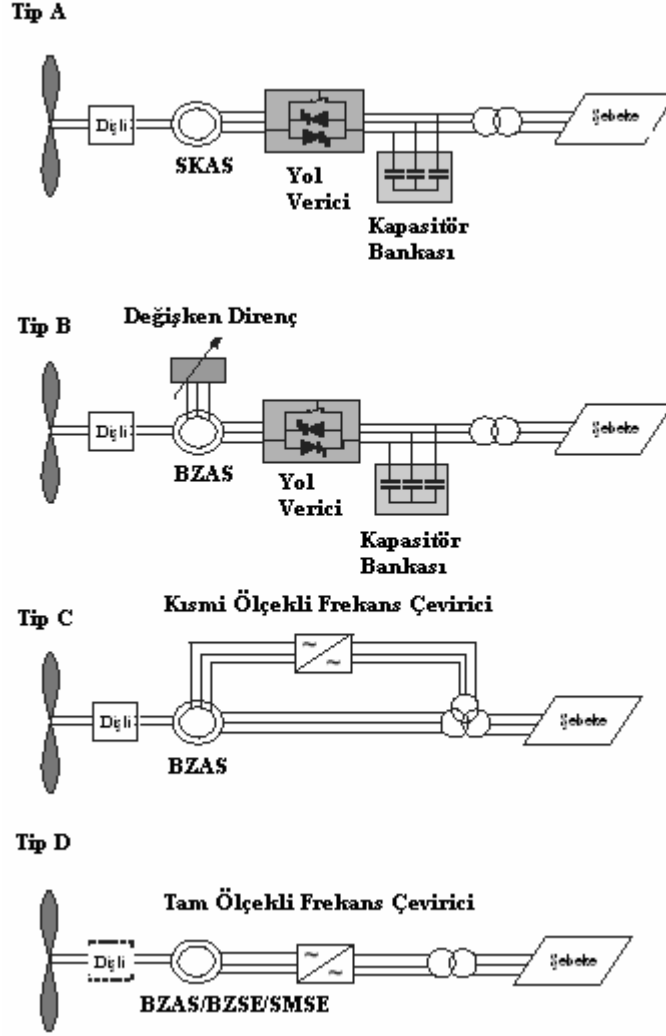
A,B,C,D tipi rüzgar türbinlerinin elektrik şebekesine bağlantısı Şekil 3.2' de gösterilmiştir.

Teknolojik gelişmelere bağlı olarak zaman içinde bu sistemlerin kullanımı değişmektedir. Tablo 3.10' da 1995-2004 yılları bu türbinlerin market payları gösterilmiştir [33].

**Tablo 3.10** Türbin tiplerinin 1995-2004 arası satışları (MW)

	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	Toplam Satış (MW)
A tipi	807	685	793	929	1546	1709	2196	2013	1552	2037	14266
B tipi	188	256	400	417	648	754	1091	377	251	181	4562
C tipi	0	1	46	621	1064	1235	2676	3382	4834	4519	18380
D tipi	166	150	242	378	530	683	1213	1470	1447	1509	7788
										Toplam	44995

Teknolojik gelişmeler ve üretim maliyetlerine bağlı olarak rüzgar enerjisi sistemlerinde kullanılan türbin tiplerinin pazar payları zaman içinde değişmiştir. Yıllar itibari ile C tipi rüzgar türbinlerinin toplam türbin kurulu gücü içindeki payı sürekli artmaktadır. 2004 sonu itibari ile toplam kurulu gücün % 40.8' i C tipi türbinlerden oluşmaktadır. A tipi türbinlerin kullanımı ise sürekli azalmasına rağmen 2004 sonu itibari ile %31.7' lik payla ikinci sırada yer almıştır. D tipi türbinler ise %17.3' lük bir paya sahiptir bunu %10.1 ile B tipi türbinler takip etmektedir.



**Şekil 3.2** Rüzgar türbini elektrik şebekesine bağlantıları

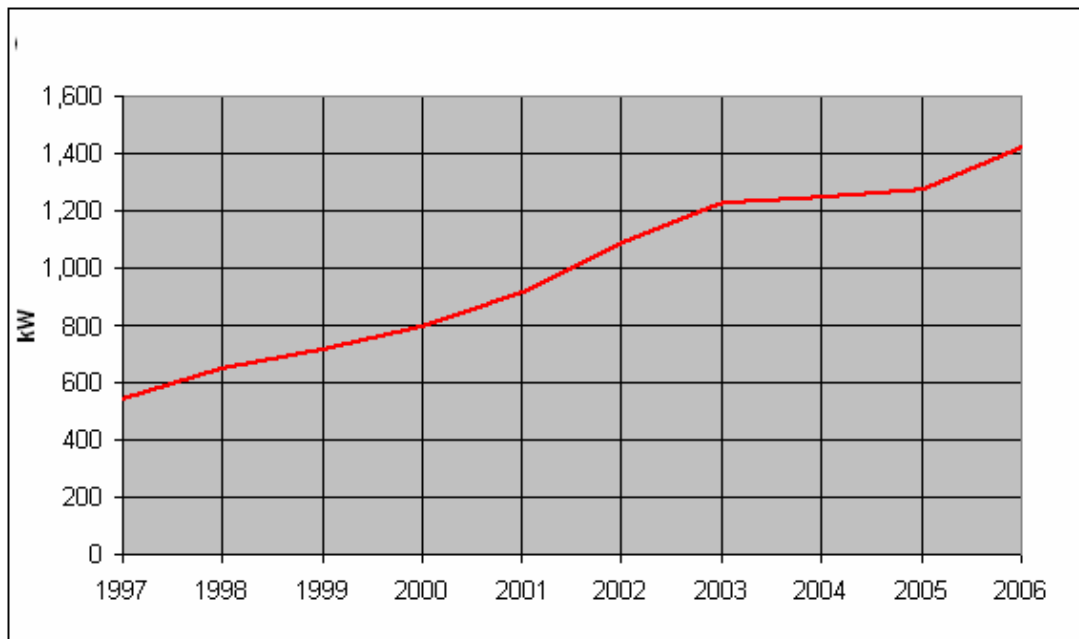
### 3.3.1 Günümüzdeki Rüzgar Türbinlerinin Kurulu Güç Olarak Satış Eğilimleri

Günümüzdeki rüzgar türbinleri bundan 20 yıl öncesine göre çok daha gelişmiş kontrol yapısına, elektrik sistemine, verime ve uzun ömre sahiptirler. Bunların bir sonucu olarak büyük güçlü türbin sistemlerine yapılan yatırımlar daha risksiz duruma gelmiştir. Tablo 3.11’ de dünyada örnek ülkeler bazında 2002-2006 yılları arasında kurulan türbinlerin ortalama güçleri görülmektedir. Bu dönem zarfında Çin ve Hindistan hariç belirtilen ülkelerin ortalama türbin kurulu güçleri 1000 kW seviyesini aşmıştır. Almanya, İngiltere, Danimarka ve ABD için bu değer 2000 kW seviyesine yaklaşmıştır. Çin ve Hindistan’daki ortalama türbin gücünün diğer ülkelere düşük olması, bu ülkelerin kendi ürettiği rüzgar türbinlerinin ekonomik olarak daha uygun fakat küçük güçlü olmasındandır. Bu nedenle bu ülkelerdeki ortalama türbin kurulu gücü diğer ülkelere ve dünya ortalamasına göre düşüktür.

**Tablo 3.11** Yıllar bazında kurulan türbinlerin ortalama kurulu gücü (kW)

Yıllar	Çin	Danimarka	Almanya	Hindistan	İspanya	İngiltere	ABD
2002	709	1443	1397	553	845	843	893
2003	726	1988	1650	729	872	1773	1374
2004	771	2225	1715	767	1123	1695	1309
2005	897	1381	1634	780	1105	2172	1466
2006	931	1875	1848	926	1469	1953	1667

Dünyadaki durum ise Şekil 3.3’ de görülmektedir. Dünya ortalama rüzgar türbini gücü teknolojik gelişmeler ve ekonomik nedenlerin etkisi ile birlikte 1997’lerdeki 550 kW seviyesinden 2006 sonunda 1400 kW seviyesini geçmiştir. Bu artış eğilimi, kıyı ötesi rüzgar türbinlerinin hızlı bir şekilde gelişmesi ile devam edecektir



**Şekil 3.3** Ortalama türbin kurulu gücü

2004-2006 dönemi zarfında rüzgar türbinlerinin satışları incelenecek olursa 750 kW gücün altındaki türbinlerin toplam satış içerisindeki payında azalma olduğu görülebilir. Tablo 3.12’ den görülebileceği üzere günümüz eğilimini ise 1501–2500 kW türbinlere doğru kaymaktadır. Tercihler konusunu etkileyen en önemli faktörlerden bir tanesi ekonomik ve teknik nedenlerdir.

Rüzgar enerjisi kurulu gücünün elektrik üretimindeki önemli bir yeri ve türbin sektöründeki pazar payı en fazla olan ülke Danimarka’dır. Danimarka’ nın rüzgar enerjisi sektörünü geliştirirken ve kurulu gücünü artırırken geçtiği tarihsel noktalar önemlidir.

**Tablo 3.12** Büyüklük olarak rüzgar türbinlerinin satışı

Yıl	2004	2005	2006
Değerlendirilen Satış	8508	11338	16007
Türbin Gücü	Toplam Satışın Dağılımı (%)		
<750 kW	5.4	3.6	2.4
750-1500 kW	50.9	48.2	43.3
1501-2500 kW	42.8	45.8	49.9
>2500 kW	0.9	2.4	4.3

### 3.4 Danimarka'da Rüzgar Enerjisi Kullanımının ve Sektörünün Gelişimi

Rüzgar enerjisinden ilk elektrik üretimi 1881 yılında Danimarka'da gerçekleştirilmiştir. Danimarka hükümetinin desteği ile test amaçlı bir rüzgar santrali kurulmuştur [18,34]. 1918 yılında Danimarka'da kapasiteleri 30 kW kadar olan 120 türbin bulunmaktaydı. Bunların toplam kurulu gücü 3 MW civarındaydı [35]. Rüzgar enerjisinin sürekli olmaması ve türbinlerde yaşanan teknik sorunlar ve fosil kökenli yakıtların düşük fiyatlarda olması bu sistemlerin yayılmasını dünyada olduğu gibi Danimarka'da da engellemiştir. 1970'li yıllarda yaşanan petrol krizlerinin ardından, yerli enerji kaynaklarına sahip olmanın önemi bir kez daha anlaşılmış ve Danimarka'da da rüzgar enerjisi konusunda yapılan çalışmalar hızlanmıştır.

1976 yılında, ana hedefi büyük güçlü rüzgar türbinleri olan, Danimarka Rüzgar Enerjisi Programı uygulanmaya başlamıştır. Bu programın devamında 1979'da %30 oranında yatırım teşviği verilmiştir. Teşviğin alınabilmesi için ise üretilen türbinlerin Riso (Danimarka Ulusal Laboratuvarı) tarafından onaylanması gerekmektedir. Bunun sonucunda üretilen türbinler için belirli standartlar oluşturularak; daha verimli türbinlerin üretilmesine katkı sağlamıştır. Yine bu dönemde Danimarka rüzgar atlası çıkarılmıştır [36]. 1981'de Danimarka Enerji Bakanlığı tarafından Energiplan81 isimli bir plan yapılmıştır. Bu planla hedef, ortalama kurulu gücü 15 kW olan 60,000 türbinin 2000 yılına kadar kurulması ve böylelikle tüketilen elektrik enerjisinin %8.5 inin rüzgar enerjisinden karşılanmasıydı. 1997 yılında Danimarka elektrik enerjisinin % 10' unu rüzgardan karşılayan bir konuma gelmiştir. Ortalama türbin kapasitesi ise 230 kW olarak gerçekleşmiştir [11,36]. Energiaplan81 den de anlaşılacağı gibi Danimarka bu dönemde elektrik enerjisi tüketiminde yerli bir kaynak olan rüzgar enerjisinin kullanımının artırılmasına yönelmiştir. 1980'lerin başında büyük rüzgar türbinlerinin prototipi geliştirilmiş ve deneyler yapılmıştır. Fakat gerek elektriksel ve malzeme bilimi açısından yeterli teknik altyapının henüz oluşmamasından, gerekse



de ekonomik olarak risklerden dolayı istenilen seviyede başarı kazanılamamıştır. Bunların sonucunda en büyük kapasiteli türbin en iyi türbindir yaklaşımından uzaklaşmaya ve daha küçük güçlü ama teknik açıdan daha iyi makineler üzerinde çalışılmıştır [11,37].

Uygulanmakta olan %30 yatırım teşviği 1985, 1986 ve 1987' de sırası ile %20, %15 ve % 10 seviyesine indirilmiştir ve şartların ağırlaştırması sonucunda iç pazarda durağanlık oluşmuştur. Verilen yatırım teşvikleri 1989 yılında kaldırılmıştır. Bu süre zarfında hükümetçe verilen yatırım teşvik miktarı 37.6 milyon euro olmuştur [38]. Aynı dönemde, Kaliforniya pazarında rüzgar yatırımcıları için uygulanan vergi indiriminin süresinin dolması sonucunda ithal edilen türbin miktarı 1986 yılında en aza inmiştir. Üretilen türbinlerin ithalatında oluşan problemler birçok türbin üreticisini ekonomik olarak zor durumda bırakmıştır [36,37].

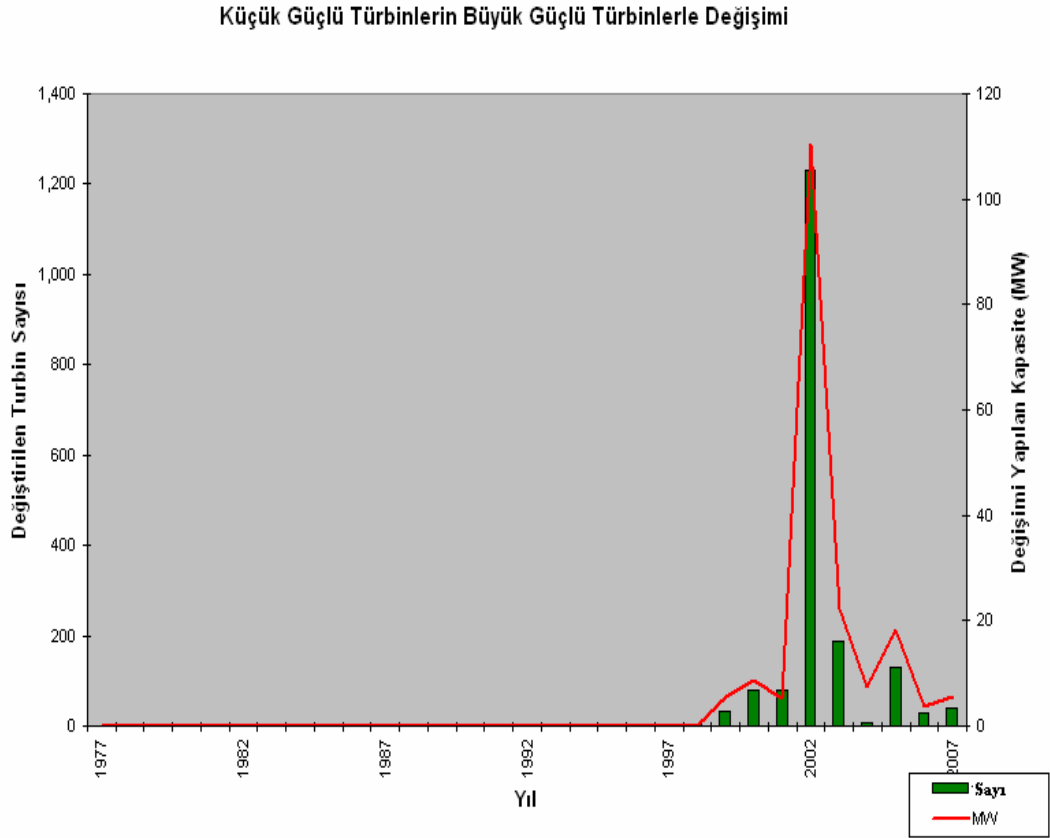
1985 yılı sonunda enerji şirketleri ile hükümet arasında 1990 yılı sonuna kadar 100 MW' lık üretim tesisi kurma anlaşması imzalanmıştır. Fakat bu 100 MW' lık hedefe 1992 yılı sonunda ulaşılabilmiştir. Hedefin gecikme nedeni arasında daha önceden % 30'dan, % 10'a indirilen yatırım teşviğinin kaldırılmasının yanında yerel halkın tepkisinin etkisi de bulunmaktadır [36]. 1990' lı yıllarda ise kurulacak olan türbinlerin yerlerinin daha iyi belirlenmesi ve ülkenin rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesi amacı ile Riso tarafından Wasp isimli bir simülasyon programı geliştirilmiştir.

1999 yılında yapılan bir projeksiyon çalışmasında 2003 yılı için tüketilen elektrik enerjisinin % 20' sinin rüzgar enerjisinden karşılanması hedeflenmekteydi. 2001 yılında uygulanmakta olan fiyat politikasının değişeceği yönündeki beklentiler, yatırımcıları 2001 yılından önce rüzgar türbinleri kurma yönünde teşvik etmiş ve 2000 yılında hızlı artan bir kapasite oluşmuştur. 2000 yılındaki artışın diğer bir nedeni de 1996'da 2000 yılı sonuna kadar 200 MW'lık tesisin kurulacağı yönündeki anlaşmadır. 2001 yılında ki düşüşün bir neden ise rüzgar türbini için kuralların katılaştırılmasıdır [36].

2002 yılında eski ve küçük güçlü, kurulu gücü 110,5 MW olan, 1200'ün üzerinde türbinin, kurulu gücü 300 MW civarı olan yenileri ile değiştirilmesinden dolayı türbin sayısı azalmış fakat kurulu güç değeri artmıştır. Şekil 3.4' de Danimarka rüzgar türbini değişimini göstermektedir [40].

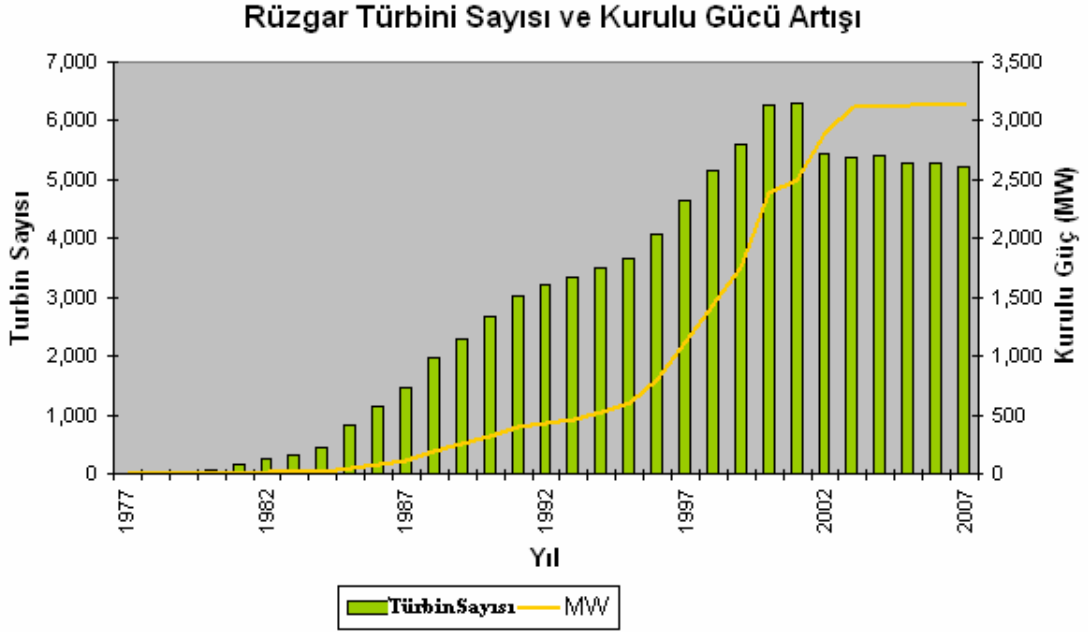
1980' li yılların başında Danimarka rüzgar türbini endüstrisinde çalışan insan sayısı birkaç yüzle ifade edilirken, günümüzde bu rakam 20,000 kişiyi aşmıştır. Ayrıca 125,000 Danimarkalının rüzgar çiftliklerinde ortaklıkları bulunmaktadır [39].

Şekil 3.5' de 1970-2007 (Temmuz) arasında Danimarka'nın toplam rüzgar türbini sayısı ve kapasite gelişimi gösterilmektedir [40].



**Şekil 3.4** Danimarka Türbin Değişim Programı

Danimarka 2030 yılında elektrik enerjisi ihtiyacının % 50'sini rüzgar enerjisinden karşılamayı hedeflemektedir [40]. Bu hedefin gerçekleşmesinde özellikle kıyıda uzak rüzgar santrallerinin katkısı beklenmektedir. Bu santrallerde kullanılacak olan rüzgar türbinleri ise kara rüzgar türbinlerine göre daha büyük güçte olabilmektedir.



**Şekil 3.5** Danimarka Türbin Sayısı ve Kurulu Gücünün Gelişimi

### 3.5 Türkiye’ de Rüzgar Enerjisi Durumu

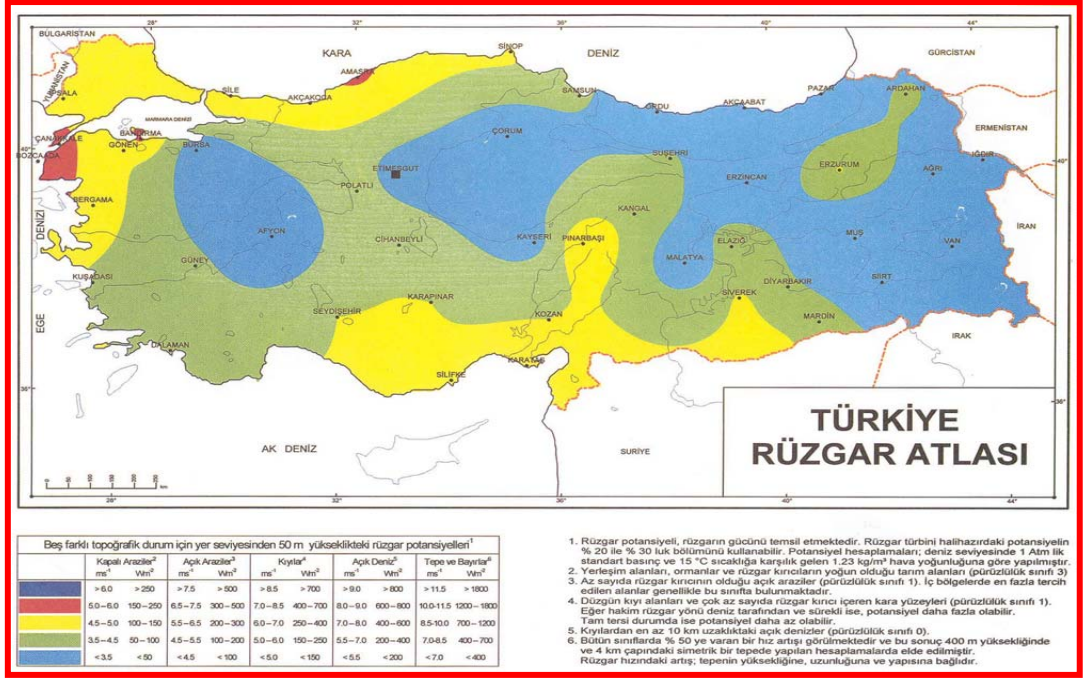
Türkiye’nin rüzgar enerji potansiyeli ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır, bununla birlikte bu çalışmalarda ağırlıklı olarak kullanılan teknik, ekonomik ve üretim potansiyeli ile ilgili rakamların temeli 1993 yılında Wijk ve Coelingh tarafından yapılan ve OECD ülkelerinin rüzgar enerjisi potansiyelini inceleyen çalışmaya dayanmaktadır. Bu çalışmada ülkemiz teknik potansiyelinin 83000 MW, ekonomik potansiyelinin ise 10000 MW olduğu belirtilmiştir. Tablo 3.13’de OECD ülkelerinin 2006 yılı başı kurulu güç, nüfus ve yüz ölçümüne göre değerlendirilmesi özetlenmektedir. 2002 yılında ise Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü’nün (DMİ) ülke çapındaki ölçüm istasyonu verileri kullanılarak Türkiye Rüzgar Haritası çıkartılmıştır. Şekil 3.6’ da 50 metre yükseklik için Türkiye Rüzgar Atlası gösterilmektedir. Haritanın sonuçlarına göre Wijk ve Coelingh tarafından yapılan çalışmaya benzer sonuçlar elde edilmiş olup, 10000 MW ekonomik ve 88000 MW teknik potansiyelin olduğu belirtilmiştir [42]. Bununla birlikte, teknik potansiyel kavramını zamanla değişme ihtimalini azdır fakat ekonomik potansiyel kavramı alternatif yakıt türlerine göre değişmektedir. Bu nedenle rüzgar enerjisinden daha iyi bir şekilde faydalanmak için zaman içinde değişen ekonomik potansiyel kavramına göre tekrar değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, 2006 yılında ise uydu verileri kullanılarak Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA)

hazırlanmıştır. REPA ile 50 m yükseklikte kara bölgelerinde  $300 \text{ W/m}^2$ , den büyük olan  $131756 \text{ MW}$ 'lık, derinliği 50 metreye kadar olan denizlerde ise  $17393 \text{ MW}$ 'lık potansiyelin olduğu hesaplanmıştır [43]. REPA rüzgar atlasının 50 metre yükseklik için ortalama hızları Şekil 3.7' de, 70 metre yükseklik için ortalama hızlar Şekil 3.8'de ve 50 metre yükseklik için olan güç yoğunluğu ise şekil 3.9'de gösterilmektedir. REPA rüzgar atlası çalışmaları sadece karasal alanlar için sınırlı değildir, ayrıca denizlerdeki potansiyel için de hesaplamalar yapılmıştır. 50 metre derinliğe kadar olan yerler için yapılan çalışma sonucunda ise  $300 \text{ W/m}^2$  den büyük potansiyel toplamı ise  $83.906 \text{ MW}$  olarak belirtilmektedir.

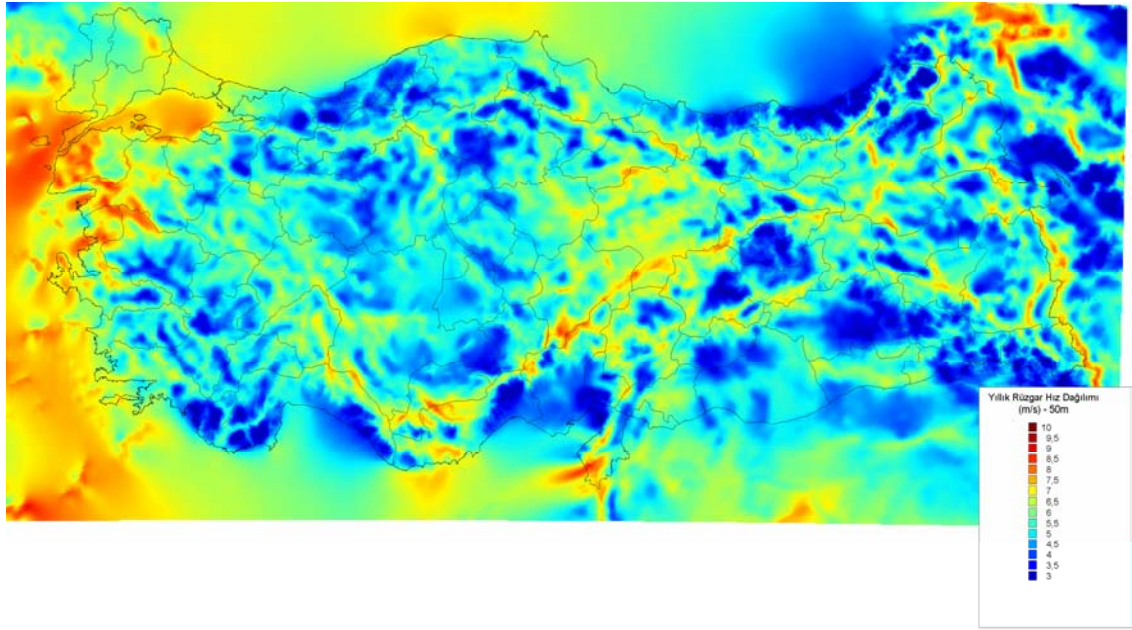
**Tablo 3.13** OECD ülkelerinin rüzgar enerjisi potansiyeli

Ülke	Teknik Potansiyel		Kurulu Rüzgar Gücü (MW)	Kurulu Rüzgar Gücü/Teknik Potansiyel	kW/km <sup>2</sup>	W/kışı
	MW	TWh/yıl				
Avusturya	2000	3	819	40.95	9.77	100.25
Belçika	2000	5	167.4	8.37	5.14	16.29
Danimarka	14000	29	3128	22.34	72.58	582.62
Finlandiya	4000	7	82	2.05	0.24	15.82
Fransa	42000	85	757.2	1.8	1.39	12.67
Almanya	12000	24	18427.5	153.56	51.61	221.35
Yunanistan	22000	44	573.3	2.61	4.34	53.85
İrlanda	22000	44	496	2.25	7.06	129.4
İtalya	35000	69	1717.4	4.91	5.7	22.63
Hollanda	3000	7	1219	40.63	29.36	75.87
Norveç	38000	76	270	0.71	0.83	59.67
Portekiz	7000	15	1022	14.6	11.07	101.35
İspanya	43000	86	10027	23.32	19.86	250.19
İsveç	20000	41	509.9	2.55	1.13	57.44
İsviçre	1000	1	11.6	1.16	0.28	1.59
Türkiye	83000	166	21.84	0.03	0.03	0.31
İngiltere	57000	114	1353	2.37	5.57	22.63

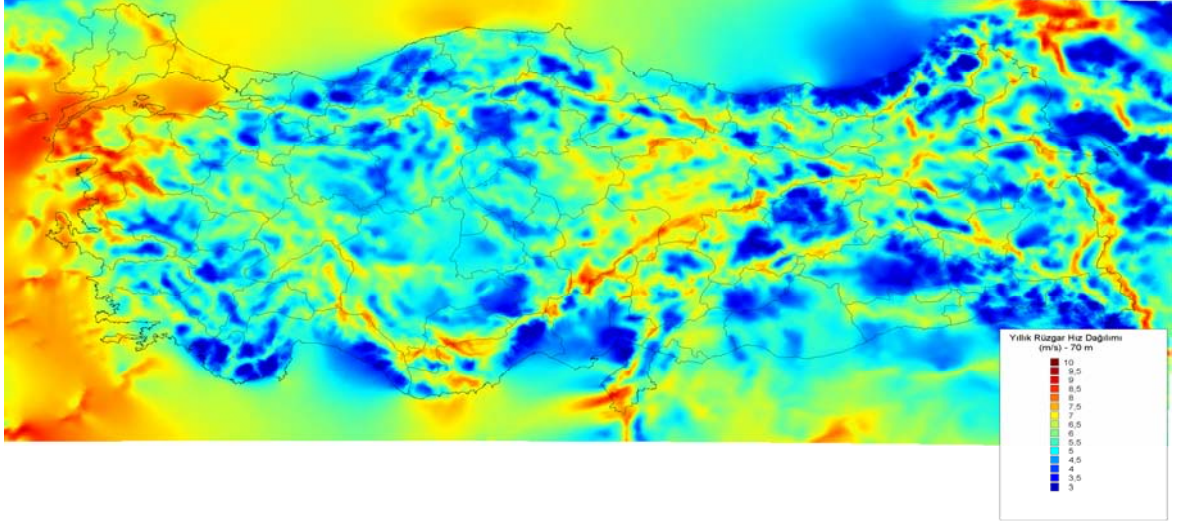
Türkiye'de elektrik üretimi amaçlı büyük güçlü ilk rüzgar türbini 22 sene önce Çeşme'de turistik bir tesisin elektrik ihtiyacının karşılamak üzere kurulan  $55 \text{ kW}$  gücünde bir tesistir [44]. Türkiye'de 2007 Kasım ayı itibari ile işletmedeki kapasite güçleri  $0,85$  ile  $39.20 \text{ MW}$  arasında General Electric, Vestas ve Enercon'un ürettiği türbinleri kullanan toplam kurulu gücü  $146.25 \text{ MW}$  olan 10 adet rüzgar santrali bulunmaktadır [45]. Tablo 3.14'de santrallerin üretime geçiş tarihleri, kurulu güçleri, türbin imalatçıları ve türbin sayıları gösterilmektedir. Son yıllarda rüzgar enerjisi ile elektrik üreten tesislerde hızlı bir sayı ve kurulu güç artışı vardır



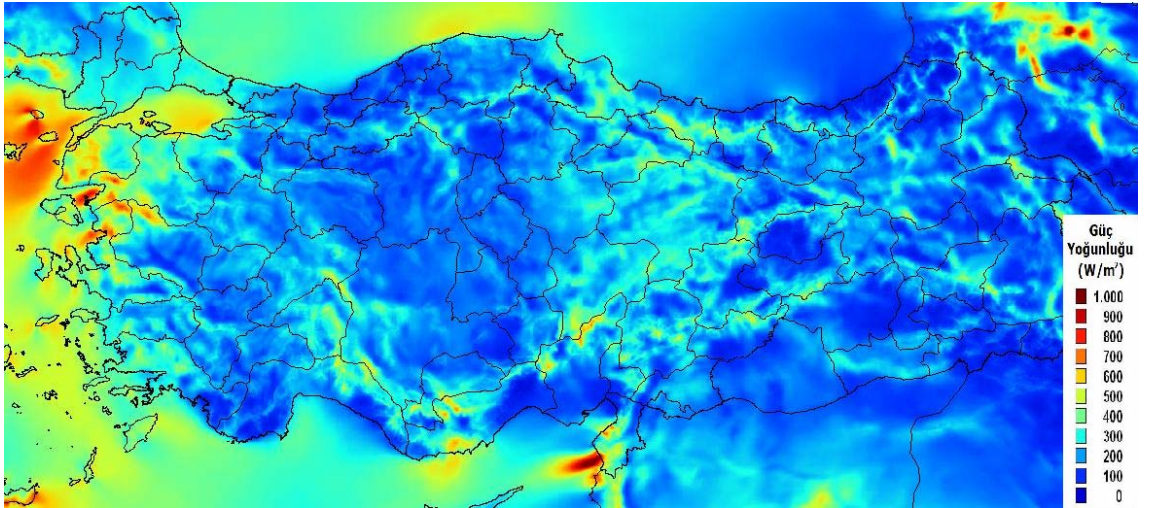
Şekil 3.6 Türkiye rüzgar atlası



Şekil 3.7 Repa rüzgar atlası 50 metre yıllık ortalama rüzgar hızları



Şekil 3.8 Repa rüzgar atlası 70 metre yıllık ortalama rüzgar hızları



Şekil 3.9 Repa rüzgar atlası 50 metre yıllık ortalama güç yoğunlukları

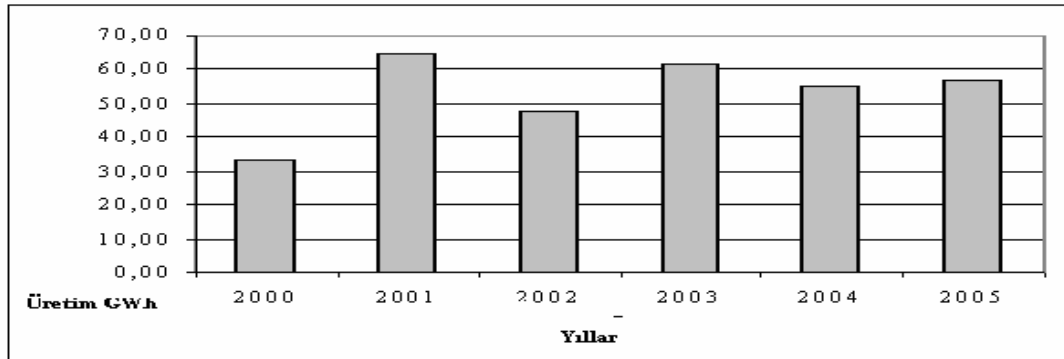
İnşaat halinde ise kurulu güçleri 24 ile 90 MW arasında kurulu gücü 276.9 MW olacak olan 6 adet proje bulunmaktadır. Bu projelerde ise Vestas, Enercon ve Nortex in üretimini yaptığı 800 ile 3000 kW arasında 132 adet türbin bulunmaktadır [45].

9. kalkınma planı Enerji Özel ihtisas komisyonu raporunda 2013 yılında toplam elektrik üretimi amaçlı kurulu gücün 52863 MW'a çıkması hedeflenirken bunun 2163 MW'ının rüzgar santralinden oluşması beklenmektedir. 2013 yılı toplam rüzgar enerjisi üretiminin ise 5939 GWh olması hedeflenmektedir [9]. Buna karşılık ülkemiz rüzgar enerjisini ile elektrik üretim miktarı Şekil 3.10'da aşağıdaki gibi gösterilmiştir [46].

**Tablo 3.14 İşletmedeki rüzgar santralleri**

Mevkii	Şirket	Üretime Geçiş Tarihi	Kurulu Güç (MW)	Türbin imalatçısı	Türbin adet ve kapasitesi
İzmir-Çeşme	Alize A.Ş.	1998	1.5	Enercon	3 adet 500 kW
İzmir-Çeşme	Güçbirliği A.Ş.	1998	7.2	Vestas	12 adet 600 kW
Çanakkale-Bozcaada	Bores A.Ş.	2000	10.2	Enercon	17 adet 600 kW
İstanbul-Hadımköy	Sunjüt A.Ş.	2003	1.2	Enercon	2 adet 600 kW
Balıkesir-Bandırma	Bares A.Ş.	I/2006	30	GE	20 adet 1.500 kW
İstanbul-Silivri	Ertürk A.Ş.	II/2006	0.85	Vestas	1 adet 850 kW
İzmir-Çeşme	Mare A.Ş.	I/2007	39.2	Enercon	49 adet 800 kW
Manisa-Akhisar	Deniz A.Ş.	I/2007	10.8	Vestas	6 adet 1.800 kW
Çanakkale-İntepe	Anemon A.Ş.	I/2007	30.4	Enercon	38 adet 800 kW
Çanakkale-Gelibolu	Doğal A.Ş.	II/2007	14.9	Enercon	13 adet 800 kW + 5 adet 900 kW

Ülkemizde belirli gücün üzerinde elektrik üretimi amaçlı bir tesis kurulmadan önce Enerji Piyasası Düzenleme Kurumundan (EPDK) lisans alması gereklidir. Ülkemizde Aralık 2007 itibari ile lisansı geçerli rüzgar enerjisi üretim tesisi proje sayısı 55 ve lisans gücü değeri 1958.05 MW seviyesindedir. Lisans alan tesislerin kurulu güçleri 0.85 MW ile 142.5 MW arasında değişmektedir. Lisans alan bu tesislerin kapasite faktörleri ise %25'in üzerindedir. Dünya kapasite faktörünün ortalamasının ise %23.4 olduğu tahmin edilmektedir. Tablo 3.15'de ülkemizde lisans almış bazı tesislerin tahmini ortalama kapasite faktörleri ve lisans güçleri gösterilmektedir

**Şekil 3.10 Rüzgar enerjisinden üretilen elektrik enerjisi miktarı**

EPDK'nın Kasım ayı lisans başvurusunda ise yaklaşık 73000 MW'lık başvuru yapılmıştır. Bu lisans başvuru gücü dünya rüzgar enerjisi kurulu gücüne eşit, Türkiye toplam elektrik enerjisi kurulu gücünün ise neredeyse 2 katı kadardır.

Ülkemizde 2001 yılında çıkarılan elektrik piyasası kanundan önce kurulmuş olan rüzgar enerjisi santralleri otoprodüktör ya da yap işlet devret sistemine göre çalışan tesislerdir. Elektrik enerjisi fiyatlandırması Yap İşlet Devret sistemi ile çalışan santraller için üretilen kWh başına daha önceden belirlenen sabit bir ücret ödenmesi şeklindedir. Türkiye'de rüzgar enerjisi fiyatlandırma konusunda ise Mayıs 2005 yılında kabul edilen 5346 numaralı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretim Amaçlı Kullanılmasına ilişkin kanuna göre 2011 yılı sonuna kadar yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilecek elektriğin fiyatı bir önceki yıla ait Türkiye elektrik toptan satış fiyatı olarak belirlenmiştir. Ayrıca Bakanlar kuruluna % 20 oranında bu rakamı artırma konusunda yetki verilmiştir. Bunun yanında orman ve hazine arazilerine kurulacak tesisler için bu arazilerin izin, kira, irtifak hakkı ve kullanma bedellerinde %50 indirim uygulanacağı ve orman ve ağaçlandırma özel ödenek gelirleri alınmayacağı belirtilmiştir [47]. Elektrik piyasası lisans yönetmeliğinde ise yenilenebilir enerji kaynaklarından üretim yapan tesislerden alınan lisans bedelleri hakkında düzenleme yapılmıştır. Ayrıca enerji verimliliği kanunu ile de çeşitli düzenlemeler yapılmıştır.

Türkiye'de rüzgar enerjisi konusunda 4 önemli problem bulunmaktadır. Bunlardan birincisi gerek Elektrik İşleri Etüt İdaresi gerekse de DMI'nin ölçüm yaptığı istasyonların yüksekliklerin ağırlıklı olarak 10 metrede olması ile ilgilidir. İlgili verilerinin bir kısmı kaydedilememiş ve ölçüm yapılan noktaların zamanla şehir sınırları içinde kalmıştır, bu da hatalı potansiyel tahminlerine neden olmaktadır. Diğer bir problem ise EPDK'dan lisans almış bulunan bir çok firmanın rüzgar enerjisi üretim tesisi kurma konusunda yatırımlarını yapmamış olmasıdır. Yatırımın yapılmamasının ana nedenlerinden biri destek politikalarının beklenen düzeyde olmaması ve çoğu lisans almış firmanın bu yatırımları yapacak ekonomik gücünün olmamasıdır. Elektrik sektöründe rüzgar enerjisi ile ilgili bir diğer problem ise lisanslar verilirken ilgili bölgenin şebeke alt yapısının tam olarak incelenmemesidir. Şu an için bu tesisler devreye alınmadığı için her hangi bir problem oluşturmamıştır. Fakat bu tesisler devreye alınmadan önce ilgili sistem güçlendirme işlemleri yapılmazsa, bu tesislerin beklenmedik zamanlarda üretimlerindeki ani değişikliklerin



sistem üzerinde ve hassas yükler üzerinde önemli etkileri olabilecektir. Bu nedenle EPDK yaptığı açıklamalar ile bu tesislere lisans verme işlemini çeşitli defalar ertelemiştir. Bir başka problem ise yenilenebilir enerji kanununda belirtilmiş olan sektörünün geliştirilmesi için geç kalınmak üzeredir. Ülkemizde büyük güçlü rüzgar türbini üretimi konusunda yerli firmalardan Soyut AŞ çalışmalarını sürdürmekte, kanat üretimi konusunda ise Enercon ve Demirer Holdingin ortak kurmuş oldukları bir tesis bulunmaktadır. Bu tesiste yaklaşık 400 kişi çalışmaktadır [48].

**Tablo 3.15** Bazı Lisans almış rüzgar enerjisi tesislerin ortalama kapasite faktörleri

Bölge	Yeri	Alınana Lisans Gücü (MW)	Tahmini Kapasite Faktörü (%)
Marmara	Bilecik/Kapaklıköy	67	34,5
Marmara	Çanakkale/Karacaören	29.7	39,8
Marmara	Balıkesir/Bandırma	30	40,0
Marmara	Balıkesir/Şamlı	90	55,8
Marmara	İstanbul/Kumburgaz	0.66	33,2
Marmara	Kocaeli/Hereke	90.9	37,7
Marmara	Balıkesir/Bandırma	15	45,7
Marmara	İstanbul/Çatalca	62	38,7
Marmara	Bursa/Karacabey	26.1	30,0
Marmara	Bursa/Karacabey	42	35,5
Marmara	Çanakkale/İntepe	30	35,2
Marmara	İstanbul/Eyüp	24.3	36,0
Marmara	Kocaeli/Hereke	28.8	34,9
Marmara	Tekirdağ/Saray	45	30,2
Marmara	Çanakkale/Gelibolu	15	36,3
Marmara	Balıkesir/Ayvalık	30	40,5
Ege	Manisa/Akhisar	43.75	32,1
Ege	İzmir/Aliağa	41.25	44,5
Ege	Manisa/Sayalar	30	37,0
Ege	Aydın/Söke	21.25	27,9
Ege	İzmir/Bergama	55.8	40,9
Ege	Aydın/Çine	24.3	31,9
Ege	Muğla/Fethiye	24.3	28,2
Ege	İzmir/Kemalpaşa	66.66	40,2
Ege	Manisa/Akhisar	10.5	32,7
Ege	Denizli/Babadağ	25.2	31,0
Akdeniz	Hatay/Samandağ	30	38,1
Akdeniz	Hatay/Belen	19.8	38,3
Akdeniz	Hatay/Samandağ	50	41,5
Akdeniz	Hatay/Samandağ	22.5	51,8
Akdeniz	Hatay/Mağaracık	35.1	45,5
Akdeniz	Osmaniye/Kabaklar	27.9	31,9
Akdeniz	Osmaniye/Türkbahçe	27.9	47,1
Akdeniz	Osmaniye/Bahçe	135	34,1
Akdeniz	Karaman/Sertavulgeçidi	46.25	37,3
Güney Anadolu	Doğu Adıyaman/Kahta	43	32,8

#### 4. RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ HESAP YÖNTEMLERİ

Rüzgar enerjisi potansiyelini hesaplamak için kullanılan temel denklemler aşağıda verilmektedir.

##### 4.1 Temel Denklemler

Hareket eden bir cismin taşıdığı enerji kinetik enerjidir ve denklem 4.1'deki gibi ifade edilebilir.

$$\text{Kinetik enerji} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4.1)$$

Denklem 4.1' 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 4.2 ile gösterilmiştir.

$$\dot{m} = \rho Av \quad (4.2)$$

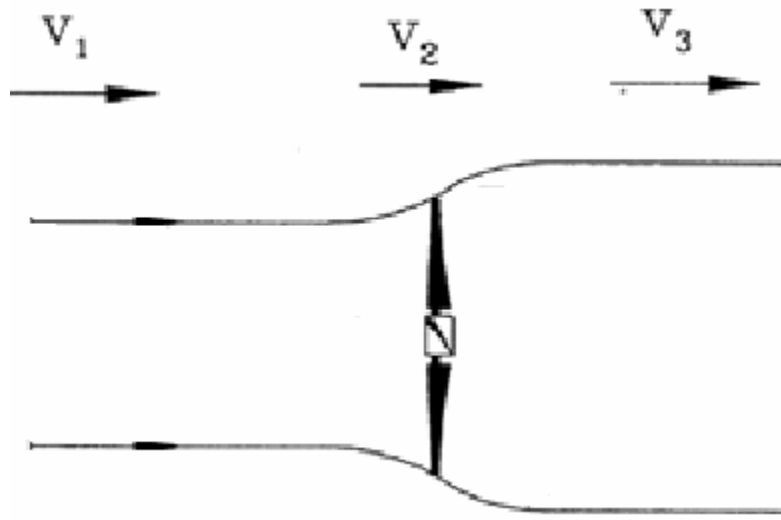
Denklem 4.2' de  $\rho$  özgül ağırlığı göstermektedir. Denklem 4.2'nin denklem 4.1'de yerine yazılması sonucunda, rüzgar enerjisinin taşımakta olduğu enerji bulunabilir ve denklem 4.3 ile aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\text{Kinetik enerji} = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (4.3)$$

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 [49]. 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 bağı olarak enerji üretilebilmektedir. Şekil 4.1' de rüzgarın türbine girerken genişlemesi gösterilmektedir.



**Şekil 4.1** Rüzgarın türbine girerken genişlemesi

Rüzgar türbinine girmeden önceki rüzgarın enerjisi ile türbinden çıktıktan sonraki enerjisinin farkı rüzgar türbini tarafından çekilen enerjidir ve denklem 4.4 ile ifade edilebilir.

$$P = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_3^2) \quad (4.4)$$

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

$$V_2 = \frac{(V_1 + V_3)}{2} \quad (4.5)$$

Bu durumda akışkanın kütlesi denklem 4.6 ile ifade aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$m = \rho A \frac{(V_1 + V_3)}{2} \quad (4.6)$$

Rotorun rüzgardan elde ettiği güç ise denklem 4.7 ile ifade edilebilir.

$$P_i = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_3^2) \quad (4.7)$$

Denklem 4.6'nın denklem 4.7 de kullanılması sonucunda denklem 4.8 elde edilir.

$$P_t = \frac{1}{4} \rho A (V_1 + V_3) (V_1^2 - V_3^2) \quad (4.8)$$

Rüzgardaki gücün rotor tarafından çekilen güce oranı ise denklem 4.9 ile aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$c_p = \frac{P_t}{P_r} = \frac{\frac{1}{4} \rho A (V_1 + V_3) (V_1^2 - V_3^2)}{\frac{1}{2} \rho A V_1^3} \quad (4.9)$$

Türbine giren ve türbinden çıkan hızların oranı denklem 4.10 ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir

$$\frac{V_3}{V_1} = a \quad (4.10)$$

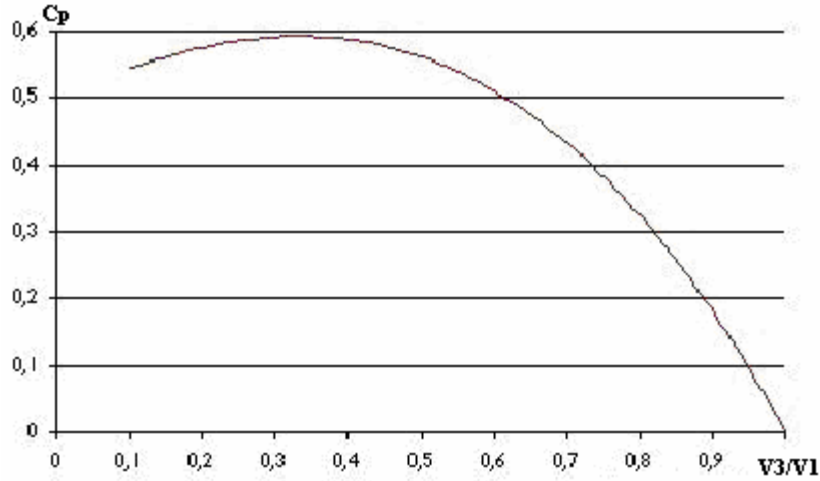
Denklem 4.9 ve denklem 4.10'un kullanılması sonucunda denklem 4.11 elde edilir.

$$\frac{dc_p}{da} = \frac{1}{2} (3a - 1) (a + 1) = 0 \quad (4.11)$$

Denklem 4.11'in çözümü ise denklem aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$a = \frac{1}{3} \quad (4.12)$$

Burada  $P_t$ ; 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 4.12 sonucunda bulunan değer, denklem 4.10'da yerine yazılması sonucunda  $c_p$  değerinin en büyük değeri olan yaklaşık (0.59) hesaplanabilir. Şekil 4.2 ile  $c_p$  katsayısının türbine giren ve çıkan akışkanın hızlarının oranına göre değişimi gösterilmektedir.



Şekil 4.2 Betz limitinin değişimi

#### 4.1.1 Rüzgar Güç Profili Kanunu

Rüzgar ölçümleri genelde 10-30 metre aralığında yapılmaktadır, fakat günümüz büyük güçlü rüzgar türbinlerinin göbek yükseklikleri bu değerlerin çok üzerindedir. Bu nedenle belirli bir yükseklikte ölçülen rüzgar verileri istenilen yükseklikteki değerinin bulunması için rüzgar güç profili kanunu kullanılmaktadır [49]. Farklı yükseklikler için hız aşağıdaki denklem hesaplanır.

$$\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^\alpha \quad (4.13)$$

Denklem 4.13 de  $v_1$  ölçülmüş rüzgar hızını,  $v_2$  belirlenmek istenen rüzgar hızını,  $v_1$  hızının ölçüldüğü yükseklik  $h_1$ ,  $v_2$  hızının belirlenmek istediği yükseklik ise  $h_2$ ,  $\alpha$  ise Helman katsayısıdır ve rüzgar hızı ölçüm yerinin özelliklerine bağlıdır.

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{3\alpha} \quad (4.14)$$

Denklem 4.14'de  $h_1$  yüksekliğinde hesaplanmış güç yoğunluğu  $P_1$ ,  $P_2$  ise hesaplanmak istenen  $h_2$  yüksekliğindeki güç yoğunluğudur.

#### 4.2 Rüzgar Potansiyelinin Hesaplama Yöntemleri

Her hangi bir bölgedeki rüzgar enerjisi potansiyelinin hesaplanması ve rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi için uygun yer seçilmesi için rüzgar şiddeti ölçümlerinin en

az bir sene zarfında yapılması bölge potansiyeli hakkında yeterli doğrulukta bilgiye ulaşılması bakımından önemlidir. Bununla birlikte yapılan ölçümlerin uzun pratikte uzun zaman yapılması yapılacak yatırımın fizibilite çalışmalarının daha doğru sonuçlar vermesini sağlayacaktır. Rüzgar enerjisi potansiyelini etkileyen en önemli faktörlerden bir tanesi rüzgarın şiddetidir. Rüzgarın şiddeti ise yer yüzünün topografik yapısından etkilenmektedir. Rüzgar enerjisi, rüzgarın hızının küpü ve havanın yoğunluğuyla doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu nedenle rüzgar ölçümlerinde yapılacak %1'lik bir hata enerji çıkışına %3 olarak yansıya bilmektedir. Rüzgar santralının kurulmasından önce yapılması gereken işlemlerden bir tanesi bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelinin hesaplanmasıdır. Rüzgar enerjisi tahmininde farklı yöntemler vardır, atmosferik sınır tabakanın davranışlarını anlatan nümerik analizler sonucu incelenebileceği gibi bir rüzgar tüneli vasıtasıyla hava akımının modellenmesi yapılabilir. Diğer bir model ise amprik modellerdir [17]. Bu modeller rüzgar rejiminin ve karakteristiğinin belirlenmesi için ekonomik bir metottur. Günümüzde ise rüzgar enerjisi potansiyeli WASP, Wind Pro, Alvin, RetScreen [50-52] gibi yazılımların kullanılması ile hesaplanabileceği gibi uydu verileri aracılığı [44] ve istatistiksel olarak da hesaplanabilmektedir [53]. İstatistiksel olarak yapılan çalışmalar rüzgar şiddet dağılımının Weibull dağılımına uyduğunu göstermiştir [53]. Fakat her bölge için rüzgar davranışının hangi dağılıma uyduğunun incelenmesi gereklidir. Bununla birlikte WASP, Wind Pro, Alvin gibi yazılımlar hesaplamalarında Weibull dağılımını kullanmaktadır.

### 4.3 Weibull Dağılımı

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 [53].

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (4.15)$$

burada  $v$  rüzgar hızı (m/s),  $k$  ve  $c$  sırasıyla boyutsuz şekil ve ölçek (m/s) parametreleridir. Weibull dağılımının birikimli (kümülatif) olasılık yoğunluk fonksiyonu ise aşağıdaki denklem 4.16 ile ifade edilebilir.

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (4.16)$$

Rüzgar verilerinin dağılımını göstermek için yapılan çalışmalar Weibull dağılımının rüzgar verileri dağılımı için uygun olduğunu göstermiştir. Gerek ülkemizde gerekse de diğer bölgelerde, bir çok çalışmada rüzgar enerjisi potansiyelinin hesaplanmasında Weibull dağılımı yaygın olarak kullanılmıştır [54-70]. Rüzgar verilerinin genelde bu dağılıma uyduğu bilinmektedir. Bununla birlikte bazı bölgelerde rüzgar verileri iki parametrelili Weibull dağılımına uymamaktadır [71-72].

Weibull dağılım parametrelerini hesaplamak için literatürde bir çok yöntem geliştirilmiştir [73-74]. Yapılan çalışmalar, Grafik Yöntem, En Yüksek Olabilirlik Yöntemi ve Moment yönteminin, şekil ve ölçek parametrelerini hesaplamada daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Grafik Yöntem, En yüksek olabilirlik Yöntemi ve Moment yöntemi kullanılarak Weibull dağılım parametrelerinin hesaplanmasında yaklaşık benzer sonuçlar çıkabildiği gibi çok farklı sonuçlarda çıkabilmektedir [75-77]. Bu nedenle Weibull dağılım parametrelerini hesaplama yöntemlerini sonuçlarının gerçek veri ile hata analizinin yapılmalı böylelikle hangi yöntemin daha iyi sonuçlar verdiğini göstermesi bakımından önemlidir.

Weibull dağılımı rüzgar verilerine uygulandığı zaman, şekil parametresinin ekvator yakınlarda 1 civarında, ılıman enlemler için ise 2 ve sürekli rüzgar alanları için ise 3 civarında olduğu bilinmektedir [78].

Weibull dağılımında ölçek parametresinin 1 ve 2' ye eşit olduğu zaman, özel durumlar söz konusudur. Ölçek parametresinin 1'e eşit olması durumunda dağılım Gaussian dağılıma benzemektedir, 2' ye eşit olması durumunda ise Rayleigh dağılımı olarak bilinen tek parametrelili bir dağılıma dönüşmektedir [53].

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

### 4.3.1 Grafik Yöntem

Weibull dağılımının şekil ve ölçek parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan bir yöntem de grafik yöntemidir. Weibull birikimli olasılık yoğunluk fonksiyonunun

(4.16) iki tarafının iki defa doğal logaritması alınırsa aşağıdaki denklem 4.17 elde edilir.

$$\ln[-\ln[1-F(v)]] = k \ln v - k \ln c \quad (4.17)$$

$\ln[-\ln[1-F(v)]]$ 'nin  $\ln v$ 'ye göre grafiği uzayda doğruyu gösterir ve  $k$  parametresi bu doğrunun eğimidir. Bu doğrunun ordinat değerlerinin ( $\ln[-\ln[1-F(v)]]$ ) hesaplanması için önce frekans dağılımının hesaplanması sonra da birikimli frekans dağılımının hesaplanması gereklidir. Hesaplanan bu değerler ile oluşan en küçük kareler problemi çözülerek  $k$  ve  $c$  parametreleri bulunur [79].

### 4.3.2 Moment Yöntemi

Bir dağılımın ikinci momenti aşağıdaki denklem 4.18 ile ifade edilebilir [80].

$$m_2 = \int_0^{\infty} v^2 f(v) dv \quad (4.18)$$

Weibull dağılımının ikinci momenti ise denklem 4.18' de, Weibull dağılımının yerine yazılması ile bulunabilir. Denklem 4.15'in denklem 4.18' de yerine yazılması sonucunda Weibull dağılımının ikinci momentinin açık hali aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

Denklem 4.18'de, denklem 4.19' da belirtilen değişken dönüşümü yapılarak denklem 4.20 elde edilir.

$$\xi = \left(\frac{v}{c}\right)^k, \quad v = c\xi^{\frac{1}{k}}, \quad dv = \frac{c}{k} \xi^{\frac{1-k}{k}} d\xi \quad (4.19)$$

İkinci momentin açık hali denklem 4.20 ile aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$m_2 = c^2 \int_0^{\infty} \xi^{\frac{2}{k}} e^{-\xi} d\xi \quad (4.20)$$

Gamma fonksiyonu denklem 4.21 ile gösterilmektedir.

$$\int_0^{\infty} \xi^x e^{-\xi} d\xi = \Gamma(1+x) \quad (4.21)$$

Gamma fonksiyonunun denklem 4.20' de yerine yazılması sonucunda Weibull dağılımının ikinci momenti bulunmuş olur ve denklem 4.22'de gösterilmektedir.



$$m_2 = c^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) \quad (4.22)$$

Bir dağılımın ortalama ise denklem 4.23 ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$v_{ort} = \int_{-\infty}^{\infty} v f(v) dv \quad (4.23)$$

Denklem 4.23 ile belirtilen integral iki parça halinde denklem 4.24' deki gibi yazılabilir.

$$v_{ort} = \int_{-\infty}^0 v \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv + \int_0^{\infty} v \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv \quad (4.24)$$

Denklem 4.24 ifadesindeki ilk  $0 -\infty$  integrali 0 olur ve denklem 4.25'deki gibi ifade edilebilir.

$$v_{ort} = \int_0^{\infty} v \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv \quad (4.25)$$

Denklem 4.25'e denklem 4.19'daki değişken dönüşümlerinin uygulanması sonucunda denklem 4.26 elde edilir.

$$v_{ort} = c \int_0^{\infty} \xi^{\frac{1}{k}} e^{-\xi} d\xi \quad (4.26)$$

Denklem 4.21'deki Gamma fonksiyonu kullanılarak Weibull dağılımın ölçek parametresi denklem 4.27 ile ifade edilebilir.

$$c = \frac{v_{ort}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (4.27)$$

Bir dağılımın standart sapması ise denklem 4.28 ile gösterilebilir. Rüzgar dağılımının standart sapmasının küçük olması rüzgar rejiminin düzenli olduğunu göstermektedir.

$$\sigma = \left(m_2 - v_{ort}^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.28)$$

Denklem 4.22 ve denklem 4.27 kullanılarak standart sapmanın karesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\sigma^2 = c^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \left(c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right)^2 \quad (4.29)$$

Denklem 4.29'un her iki taraftan  $c^2\Gamma\left(1+\frac{2}{k}\right)$  ile bölünmesi sonucunda denklem 4.30 elde edilir.

$$\left(\frac{\sigma}{c\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)}\right)^2 = \frac{\Gamma\left(1+\frac{2}{k}\right)}{\left(\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)\right)^2} - 1 \quad (4.30)$$

Denklem 4.27 ile ölçek parametresi ortalama hız cinsinden ifade edilmişti. Bunun denklem 4.30'daki ifadede yerine yazılması sonucunda aşağıdaki denklem elde edilebilir

$$\left(\frac{\sigma}{v_{ort}}\right)^2 - \frac{\Gamma\left(1+\frac{2}{k}\right)}{\left(\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)\right)^2} + 1 = 0 \quad (4.31)$$

Weibull şekil parametresi (k), rüzgar verilerinin analizinde genelde 1 den büyük 5 den de küçük değerler alır, fakat en büyük sınırların kullanılması ile k değerinin 1 ile 10 arasında olması durumunda denklem 4.31 ile ifade edilen ifade edilen denklemin nümerik yöntemlerle çözümü aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_{ort}}\right)^{-1.086} \quad (4.32)$$

### 4.3.3 En Yüksek Olabilirlik Yöntemi

Weibull dağılımının sırası ile şekil ve ölçek parametreleri olan k ve c değerini hesaplama yöntemlerinden bir tanesi de en yüksek olabilirlik yöntemidir [81-83]. Bu yöntem kullanılırken rüzgar verileri  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$  şeklinde n elemanlı bir küme oluşturmaktadır. Bir gözlemede  $V = v_i$  olma olasılığı,  $f(v_i; k, c)$  ile orantılıdır. Benzer bir şekilde  $V = v_1, \dots, V = v_n$  olaylarının meydana gelme olasılığı da ifade edilebilir. Bu olaylar birbirinden bağımsız olmaları nedeni ile alınan ölçümler sonucunda  $L = \prod_1^n, \dots, V = v_n$  olaylarının meydana gelme olasılığı olabilirlik fonksiyonu denklem 4.33 ile aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [81].

$$L = \prod_{i=1}^n f(v_i; k, c) \quad (4.33)$$

Denklem 4.33’de belirtilen çarpım ifadesi sonucu ise denklem 4.34 ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$L = \frac{k^n}{c^{nk}} \prod_{i=1}^n (v_i)^{k-1} e^{-\frac{1}{c^k} \sum_{i=1}^n (v_i)^k} \quad (4.34)$$

Denklem 4.33’ de belirtilen çarpım ifadesinden denklemin her iki tarafın ln ifadesi alınarak kurtulabilmir. Böylece çarpım ifadesi toplam ifadesine dönüştürebiliriz ve aşağıdaki denklem 4.35 ile ifade edilebilir.

$$\ln L = n \ln k - nk \ln c + (k-1) \ln \left( \prod_{i=1}^n (v_i) \right) - \frac{1}{c^k} \sum_{i=1}^n (v_i)^k \quad (4.35)$$

Denklem 4.35’in k ve c’ ye göre türevleri alınıp sıfıra eşitlenirse denklemi en büyük yapan değerler elde edilebilir ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{\partial \ln L(k, c)}{\partial c} = -\frac{nk}{c} + kc^{-(k+1)} \sum_{i=1}^n (v_i)^k = 0 \quad (4.36)$$

Ölçek parametresi ise denklem 4.36’nın kullanılması sonucunda aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$c = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (v_i)^k}{n} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (4.37)$$

Şekil parametresini bulmak için aynı işlem k için yapılır ve aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{\partial \ln L(k, c)}{\partial k} = \frac{n}{k} + \sum_{i=1}^n (v_i)^k - n \frac{\sum_{i=1}^n (v_i)^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n (v_i)^k} = 0 \quad (4.37)$$

Denklem 4.38’ den şekil parametresi aşağıdaki denklem 4.38’ deki gibi çekilebilir.

$$k = \left( \frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right)^{-1} \quad (4.38)$$

Olabilirlik fonksiyonunu en büyük yapan k ve c değerleri bulunarak denklem 4.38' in çözülemeyeceği için, bu nedenle veri setinden 0 değerlerinin çıkarılıp kullanılması ile çözüm gerçekleştirilecektir. Günümüz bilgisayarlarının 50000 verilik bir data setinin şekil ve ölçek parametrelerini hesaplaması birkaç dakika sürmektedir. Bu çalışma kapsamında denklem 4.38 ile belirtilen ifadenin çözümü için MATLAB kullanılmıştır.

#### 4.4 Hata Analizi

Grafik, moment, en yüksek olabilirlik yöntemleri sonucunda elde edilen şekil ve ölçek parametrelerinin hangisinin gerçek veri için daha uygun olduğunun bulunması için hata analizinin yapılması gereklidir. Bu çalışmada kullanılan yöntemler iki farklı hata hesabı formülü ile analiz edilmiştir. Bunlardan birincisi  $R^2$  analizidir ve denklem 4.39 ile ifade edilebilir.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.39)$$

İkinci hata formülü ise RMSE formülüdür ve denklem 4.40 ile ifade edilebilir.

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 \right]^{0.5} \quad (4.40)$$

burada n gözlem sayısı, y'ler gerçek değerler, x'ler Weibull dağılımı ile hesaplanan değerler ve  $\bar{y}$  ortalama gerçek değerdir.  $R^2$  değeri büyük ya da RMSE değeri küçük dağılım fonksiyonu en iyi dağılım fonksiyonu olarak kabul edilir [84].

#### 4.5 Güç Yoğunluğunun Belirlenmesi

Rüzgarın kinetik enerjisi denklem 4.3 ile gösterilmektedir. Weibull dağılımında güç yoğunluğu ise denklem 4.41 ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir [82].

$$P_w = \int_0^{\infty} P(v)f(v)dv \quad (4.41)$$

Denklem 4.3 ve denklem 4.15' in denklem 4.41' de kullanılması ile Weibull dağılımı güç yoğunluğu aşağıdaki denklem 4.42' deki gibi ifade edilebilir.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} v^3 \frac{k}{v} \left(\frac{v}{c}\right)^k e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} v^2 k \left(\frac{v}{c}\right)^k e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv \quad (4.42)$$

Yapılan sadeleştirmeler ve Gamma fonksiyonunun kullanılması ile aşağıdaki denklem 4.43 elde edilir.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (4.43)$$

#### 4.6 En Olası Hız Değeri

Weibull dağılımı bir fonksiyondur ve bu fonksiyonun bir tepe noktası vardır. Bu noktanın bulunması en olası hızın bulunması yani en fazla esen rüzgar hızının bulunması anlamına gelmektedir. Bu fonksiyonun türevi alınıp sıfıra eşitlenmesi,  $\frac{f(v)}{dv} = 0$ , durumunda en olası hız değeri bulunmuş olur ve aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$\frac{f(v)}{dv} = 0 \quad (4.44)$$

Denklem 4.15 ile belirtilen olasılık yoğunluk fonksiyonu denklem 4.44'de yerine yazılması sonucunda denklem 4.47 elde edilir.

$$\frac{\left(\frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}\right)}{dv} = 0 \quad (4.47)$$

Denklem 4.48 ise denklem 4.47' nin türevinin alınması sonucu aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{f(v)}{dv} = \frac{k}{c} (k-1) \frac{v^{k-2}}{c^{k-1}} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} - \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} (k) c^{-k} (v)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} = 0 \quad (4.48)$$

Denklem 4.48'de yapılan sadeleştirilmeler sonucunda aşağıdaki denklem 4.49 elde edilir.

$$(k-1) - (k) \left( \frac{v}{c} \right)^k = 0 \quad (4.49)$$

Denklem 4.49 ile bulunan  $v$  değeri en olası hızı ifade eder ve denklem 4.50 ile ifade edilebilir.

$$v_{enolasi} = c \left( \frac{k-1}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (4.50)$$

#### 4.7 En Fazla Enerjiyi Taşıyan Hız

Enerji zaman ile gücün çarpımı şeklinde ifade edilebilir. Birim zaman ve birim alan için enerji denklemi aşağıdaki denklem 4.51' deki gibi ifade edilebilir.

$$E = Pf(v) \quad (4.51)$$

Denklem 4.3 ile denklem 4.15'in kullanılması sonucunda aşağıdaki denklem elde edilmiş olur.

$$E = \frac{1}{2} \rho v^3 \frac{k}{v} \left( \frac{v}{c} \right)^k e^{-\left( \frac{v}{c} \right)^k} \quad (4.52)$$

Denklem 4.52' nin türevi alınıp sıfıra eşitlenmesi sonucunda enerji akısına en fazla katkıyı yapan hız değeri bulunmuş olur ve denklem 4.53' deki gibi ifade edilebilir.

$$V_{max E} = c \left( \frac{k+2}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (4.53)$$

#### 4.8 Rüzgar Türbininin Ürettiği Enerjinin Bulunması

Rüzgar türbinin belirli bir zaman aralığında ürettiği enerjinin bulunması için Weibull fonksiyonun olasılık yoğunluk fonksiyonunun, türbin güç eğrisi ile integre edilmesi gereklidir. Bu integral sınırları rüzgar türbininin üretime başladığı nokta ve üretiminin son bulunduğu nokta alınarak hesaplanır ve denklem 4.54 ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir [82].

$$E_{turbine} = T \int_{v_1}^{v_0} P_T(v) f(v) dv \quad (4.54)$$

Türbin eğrisi fonksiyonunun ( $P_T(v)$ ) parçalı bir fonksiyon olması nedeni ile integral ifadesi iki parçaya ayrılabilir.

$$E_{turbın} = T \left( P_R \int_{v_1}^{v_R} (a_1 v^3 + a_2 v^2 + a_3 v + a_4) \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left( \frac{v}{c} \right)^k} dv + P_R \int_{v_R}^{v_0} \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left( \frac{v}{c} \right)^k} dv \right) \quad (4.55)$$

Denklem 4.55 ile belirtilen integral ifadesinin hesaplanması için MATEMATICA kullanılmıştır.

#### 4.9 Rüzgar Türbinlerinin Güç Eğrileri

Rüzgar türbinlerinin güç eğrilerini modellemek için literatürde 3 yöntem ağırlıklı olarak kullanılmaktadır [83,86,87]. Bu 3 yöntem, , 2. dereceden bir denklem olarak modelleyen denklem ve rüzgar türbinin çalışmaya başladığı ve tam kapasiteye ulaştığı hızlar ile modelleme sistemidir. 3. dereceden bir denklem olarak rüzgar türbinini modelleyen denklem aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$P_T(V) = \begin{cases} 0 & , v < v_1 \\ (a_1 v^3 + a_2 v^2 + a_3 v + a_4) P_R & , v_1 \leq v < v_R \\ P_R & , v_R \leq v < v_o \\ 0 & , v \geq v_o \end{cases} \quad (4.56)$$

İkinci dereceden bir denklemle modelleme ise denklem 4.57 ile aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$P_T(V) = \begin{cases} 0 & , v < v_1 \\ (a_1 v^2 + a_2 v + a_3) P_R & , v_1 \leq v < v_R \\ P_R & , v_R \leq v < v_o \\ 0 & , v \geq v_o \end{cases} \quad (4.57)$$

Rüzgar türbinin çalışmaya başladığı ve tam kapasiteye ulaştığı hızlar ile modelleme sistemi denklem 4.58 ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$P_T(V) = \begin{cases} 0 & , v < v_1 \\ P_R \frac{v^2 - v_1^2}{v_R^2 - v_1^2} & , v_1 \leq v < v_R \\ P_R & , v_R \leq v < v_o \\ 0 & , v > v_o \end{cases} \quad (4.58)$$

Hangi denklemin seçilen türbini daha iyi modellediği anlaşılabilmesi için sayısal olarak türbinlerin gerçek değerleri ve denklemler sonucu çıkan sonuçları EK A da verilmiştir. Yapılan modelleme işlemini en iyi 3. derecen bir denklemin yapabildiği

görülmüştür. Bu çalışmada kullanılan 1000, 1300, 2000 ve 2300 kW'lık 4 türbinin 3. dereceden denklem ile modellenmesi sonucunda çıkan katsayılar Tablo 4.1' de verilmiştir.

**Tablo 4.1** 4 türbin için 3. dereceden türbin denkleminin katsayıları

Katsayılar	1000 kW	1300 kW	2000 kW	2300 kW
$a_1$	-0.00137881	-0.00188482	-0.00180938	-0.00190236
$a_2$	0.03916670	0.05047410	0.05109090	0.05309970
$a_3$	-0.23855900	-0.30598500	-0.33889000	-0.34927600
$a_4$	0.44596900	0.56102000	0.69082100	0.70518400

#### 4.10 Kapasite Faktörünün Hesaplanması

Kapasite faktörü, rüzgar türbininin belirli bir zaman aralığında ürettiği enerjinin üretmesi gereken enerjiye oranı şeklinde tanımlanmaktadır. Denklem 4.55 ile rüzgar türbininin belirli bir zaman aralığı için üretebileceği enerji miktarı belirtilmiştir. Kapasite faktörü ise denklem 4.60 ve denklem 4.61'de gösterilmiştir [82].

$$C_f = \frac{TP_R \left( \int_{v_1}^{v_R} (a_1 v^3 + a_2 v^2 + a_3 v + a_4) \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left( \frac{v}{c} \right)^k} dv + \int_{v_R}^{v_0} \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left( \frac{v}{c} \right)^k} dv \right)}{TP_R} \quad (4.60)$$

Denklemin son hali ise denklem 4.61 ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$C_f = \int_{v_1}^{v_R} (a_1 v^3 + a_2 v^2 + a_3 v + a_4) \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left( \frac{v}{c} \right)^k} dv + \int_{v_R}^{v_0} \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left( \frac{v}{c} \right)^k} dv \quad (4.61)$$



## 5. ÇANAKKALE BÖLGESİ İÇİN POTANSİYEL BELİRLENMESİ ve EKONOMİK ANALİZİ

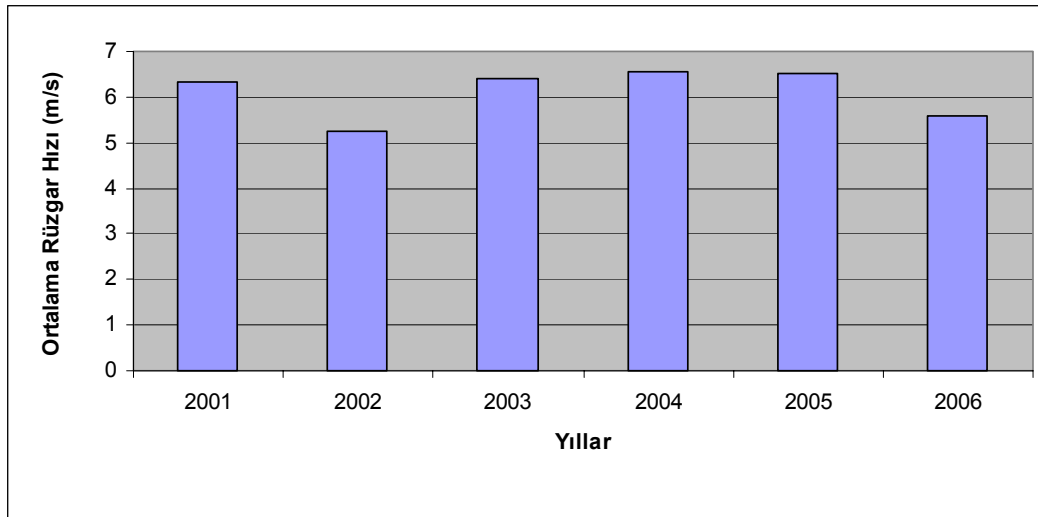
Bir bölgenin rüzgar karakteristiği analiz edilirken, saatlik ortalama, günlük ortalama, aylık ortalama, mevsimsel ortalama değerlerine ihtiyaç vardır. Ayrıca rüzgarın esme yönü bilgileri de gereklidir. Böylelikle standart sapma, türbülans, enerji üretimine en büyük katkıyı yapan hız, en olası hız, hızların kümülatif dağılımı gibi parametreler görülebilecektir. Bu sayede bölgede kurulacak olan rüzgar enerjisi üretim tesisi için yer ve rüzgar türbini seçimi yapılacaktır. Ölçüm değerleri genelde 10 m için yapılmasından dolayı bu değerlerin rüzgar türbini göbek yüksekliğine göre revize edilmesi gereklidir.

Ülkemizde Aralık 2007 itibari ile lisansı geçerli rüzgar enerjisi üretim tesisi proje sayısı 55 ve lisans gücü değeri 1958.05 MW' dır. Alınan lisansların 5 tanesi Çanakkale ili sınırları içerisindedir ve lisans güçleri 5 ile 30.4 MW arasında değişmektedir. Tesislerin tahmini ortalama kapasite faktörleri ise %34' ün üzerindedir.

Bu çalışma kapsamında, Çanakkale bölgesindeki rüzgar enerjisinin potansiyeli DMI' nin 2001-2006 yılları 10 metre yükseklikte ölçülen saatlik ortalama rüzgar şiddeti verileri kullanılarak Weibull dağılımı ve gerçek zaman serisi analizi ile incelenmiştir. Bu çalışmada denklem 4.14 ile belirtilen Helman katsayısı ( $\alpha$ ) 0.2 olarak seçilmiş ve güç kanununun 100 metreye kadar geçerli olduğu kabul edilmiştir ayrıca hava yoğunluğunun yükseklik ve rüzgar hızı ile değişimi ihmal edilmiştir. 10 metre yükseklik için yapılmış olan ölçümler türbin göbek yüksekliklerine göre denklem 4.14 kullanılarak tekrar hesaplanmıştır. Weibull parametreleri aylık, mevsimsel ve yıllık olarak 3 farklı yöntemle göre hesaplanmış hata analizi sonuçlarına göre hangi yöntemin kullanılması gerektiğine karar verilmiştir. Seçilen 1000, 1300, 2000 ve 2300 kW gücünde 4 türbinin, toplam 6 farklı göbek yüksekliğinde, 13 farklı durumu kapasite faktörleri sonuçları karşılaştırılmış ve üretim maliyeti en düşük çıkan türbin için yıllık ve mevsimsel bazda kapasite faktörü değerleri hesaplanmıştır.

## 5.1 Ortalama Rüzgar Hızı Değerleri

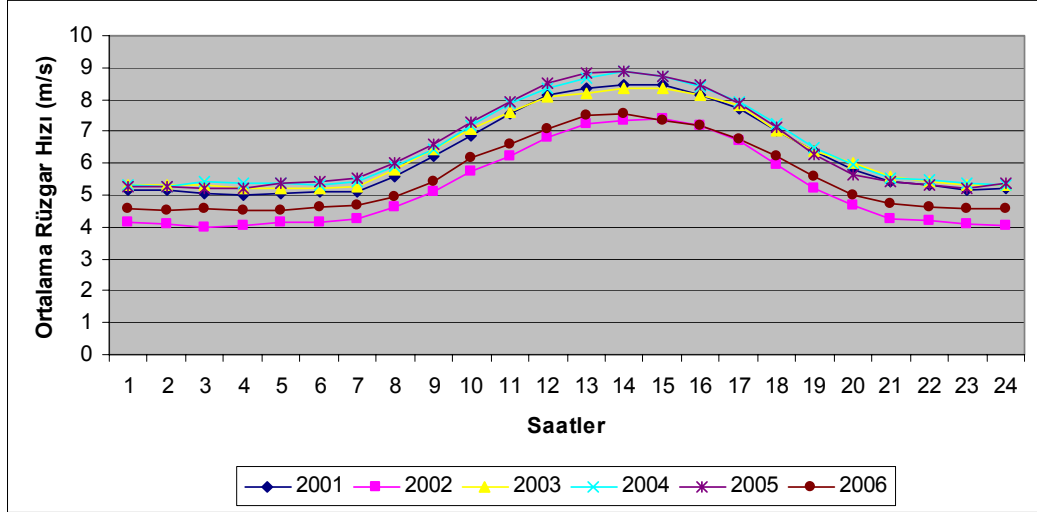
Saatlik ortalama, aylık ortalama ve yıllık ortalama rüzgar hızları, güç yoğunluğu bu çalışmada kullanılan türbinlerin göbek yüksekliği olan 50, 60, 70, 80, 90, 100 metre yükseklikleri için hesaplanmış, 50 metre için çıkan sonuçlar Tablo 5.1’de gösterilmektedir. Şekil 5.1’de ise 50 metre yükseklik için hesaplanmış yıllık ortalama rüzgar hızları gösterilmektedir. Şekil 5.2’ de ise 2001-2006 yılları için saatlik ortalama 50 metre yükseklikte yıllık ortalama rüzgar hızlarını göstermektedir. Farklı yükseklikler için rüzgar ortalama rüzgar hızları ve zaman serisi güç yoğunlukları denklem 4.13 ile belirlenebilir. Farklı yüksekliklerde ki güç yoğunluğu ise denklem 4.14 ile belirlenebilir. Yapılan çalışmada aylık veri seti 6 yılın aynı ayları kullanılarak oluşturulmuştur, aynı şekilde mevsimsel veri seti de aynı şekilde oluşturulmuştur.



Şekil 5.1 Yıllık ortalama hızlar

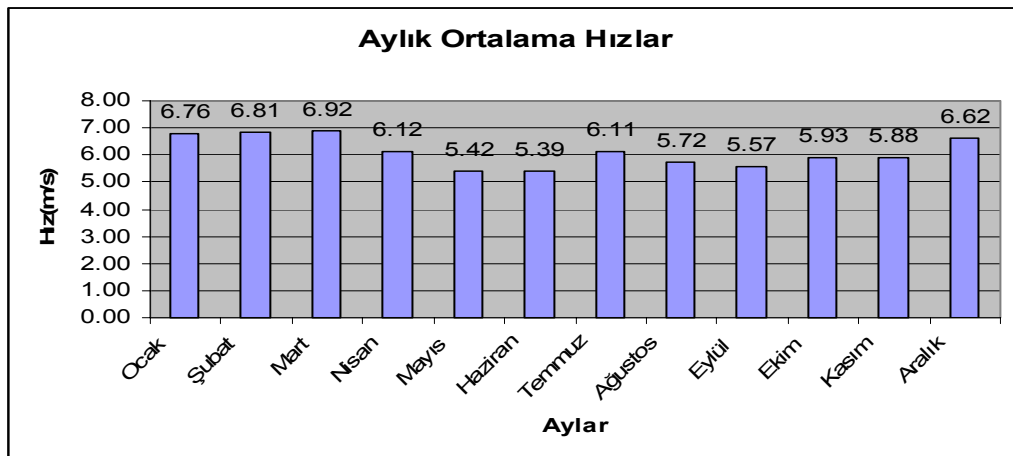
Zaman zaman anemometre cihazında olan arızalar ya da elektrik kesilmesinden dolayı oluşan hatalı ölçümlerin belirlenmesinde MS Excel kullanılmıştır. Ülkemizde fırtına kayıtlarının olmamasından dolayı 10 metre yükseklikte 30 m/s’den büyük hızların olduğu günlerde hatalı ölçümlerin yapıldığı kabul edilmiştir. Ayrıca 4 saat rüzgar hızının sıfır olması durumu da hatalı ölçüm olarak kabul edilmiştir. Kullanılan verilerdeki yanlış ölçümlerin olduğu ya da hatalı kayıtların yapıldığı zaman dilimi bir saat için olsa bile hatalı ölçümün olduğu bir tam gün veri setinden çıkarılmıştır. Anemometrenin 2003 yılında mayıs ayında arıza yaptığı için mayıs ayında 19 günlük ölçüm sonucu alınamamıştır bu nedenle mayıs 2003 yılı verileri bu çalışmada

kullanılmamıştır. Şekil 5.2 aylık ortalama rüzgar hızlarını göstermektedir. Şekil 5.3 ise aylık ortalama güç yoğunluklarını zaman serisi ve Weibull dağılımına göre karşılaştırmaktadır.



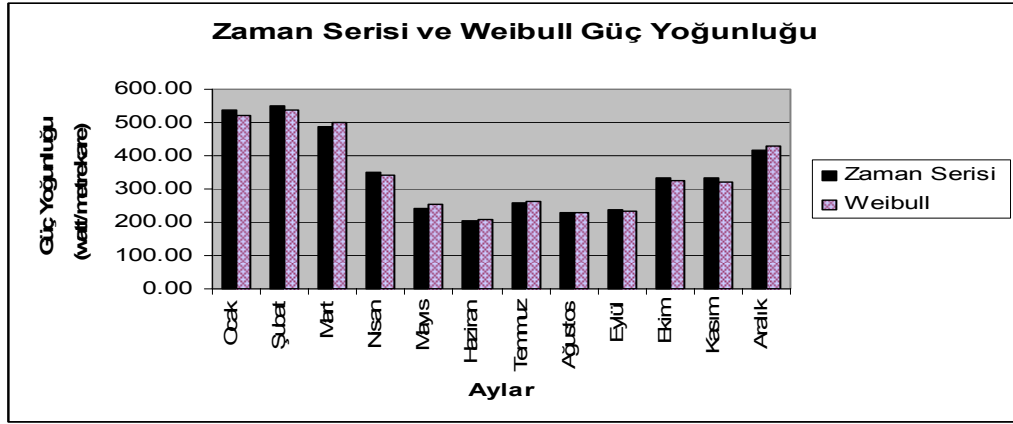
Şekil 5.2 Saatlik ortalama hızlar

Saatlik ortalama rüzgar hızları incelendiğinde, sabah saatlerinde ortalama rüzgar hızının düşük olduğu buna karşılık öğle saatlerine bu hızın arttığı görülmektedir. Enerji tüketiminin fazla olduğu öğle saatlerinde rüzgar ortamla hızının daha fazla olması üretilen elektrik enerjisine daha fazla ihtiyaç olan zaman diliminde olması üretilen elektriğin daha yüksek fiyatlardan satılması bakımından da önemlidir. Aylık ortalama rüzgar hızları ise Şekil 5.3 ile gösterilmektedir.



Şekil 5.3 Aylık ortalama hızlar

Zaman serisi güç yoğunlukları ile Weibull güç yoğunlukları şekil 5.4 ile aşağıdaki gibi gösterilmektedir.



Şekil 5.4 Aylık ortalama zaman serisi ve Weibull güç yoğunlukları

Zaman serisi ve Weibull güç yoğunlukları değerinin birbirlerine çok yakın çıkması Weibull dağılımının bölge verilerine uyduğunun bir başka göstergesidir.

Tablo 5.1 50metre yükseklik için zaman serisi ve Weibull ortalama değerleri

Aylar	Zaman Serisi Ortalama Hız (m/s)	Zaman Serisi Güç Yoğunluğu (watt/m <sup>2</sup> )	$P_w$ (watt/m <sup>2</sup> )	$v_{enolasi}$ (m/s)	$V_{maxE}$ (m/s)
Ocak	6.75907	535.452	520.956	3.52975	13.2681
Şubat	6.81498	551.874	537.486	3.52399	13.4265
Mart	6.92133	487.29	501.851	4.22713	12.7772
Nisan	6.11719	351.792	341.889	3.77697	11.218
Mayıs	5.41974	239.809	253.165	3.4427	10.1381
Haziran	5.3873	206.056	207.247	3.84679	9.22212
Temmuz	6.11351	258.677	261.287	4.99023	9.62112
Ağustos	5.71982	227.516	231.044	4.37193	9.40542
Eylül	5.5659	238.903	234.336	3.83755	9.67777
Ekim	5.92619	332.289	323.961	3.46889	11.1223
Kasım	5.87931	334.224	322.527	3.35239	11.1546
Aralık	6.62382	415.37	428.466	4.22842	12.0283

Tablo 5.1’de görülebileceği gibi ortalama hız değeri büyük olan bir ayın güç yoğunluğu diğer aydan büyük olmayabilmektedir, burada önemli olan verilerin dağılımıdır. Veri dağılımı rüzgar türbinlerinin üretimleri içinde önemlidir. Bir tesisin kurulacağı bölge seçilirken sadece ortalama hız ve güç yoğunluğu ile hareket edilip veri dağılımının nasıl olduğuna dikkat edilmemesi ekonomik analizde hatalara neden olabilir. Örneğin rüzgar verilerinin dağılımı iki parçaya ayrılmış bir bölge olsun, ilk parça 0-4 m/s aralığında olan veriler, ikinci parça ise 26-30 m/s olan veriler olsun. Yaklaşık ortalama hız değeri 15 m/s civarında olacaktır fakat buraya yerleştirilen

türbin üretim yapamayacaktır. Çünkü türbin üretime geçiş noktası 4 m/s den büyük ve 25 m/s den küçüktür. Yani önemli olan ortalama hızın ya da güç yoğunluğunun yüksek olmasının yanında rüzgar verilerinin dağılımıdır.

## 5.2 Weibull Parametrelerinin Hesabında En Uygun Yöntemin Seçilmesi

Weibull parametrelerini belirleme yöntemlerinden hangisinin daha iyi sonuç verdiği belirlenmesi için 3 yöntemle hesaplanan Weibull parametreleri gerçek veri ile RMSE ve  $R^2$  hata analizleri yapılmıştır.  $R^2$  değerinin büyük RMSE değerinin ise küçük olduğu durum iyi durumu göstermektedir. Yapılan analiz sonucunda çıkan sonuçlar ve en iyi yöntemin hangisinin olduğu Tablo 5.2, Tablo 5.3 ve Tablo 5.4' de özetlenmektedir.

**Tablo 5.2** Farklı yükseklikler için Weibull dağılım parametreleri belirleme yöntemlerinin karşılaştırılması

Yükseklik (m)	YÖNTEMLER	k	c	$R^2$	RMSE	En İyi Yöntem
50	Grafik Yöntemi	1.64255	7.07923	0.950019	0.009127	
	En Yüksek Olabilirlik	1.63453	6.84159	0.954115	0.008745	
	Moment Yöntemi	1.6258	6.81429	0.954687	0.00869	√
60	Grafik Yöntemi	1.68102	7.49455	0.937536	0.009922	
	En Yüksek Olabilirlik	1.63453	7.09567	0.937536	0.009922	
	Moment Yöntemi	1.6258	7.06735	0.947206	0.009122	√
70	Grafik Yöntemi	1.66246	7.63136	0.926209	0.010525	
	En Yüksek Olabilirlik	1.63453	7.31783	0.934353	0.009927	
	Moment Yöntemi	1.6258	7.28863	0.935055	0.0098738	√
80	Grafik Yöntemi	1.64931	7.81279	0.934862	0.0096	
	En Yüksek Olabilirlik	1.63453	7.5159	0.941038	0.009134	
	Moment Yöntemi	1.6258	7.4859	0.941781	0.009076	√
90	Grafik Yöntemi	1.6517	8.00323	0.918064	0.010625	
	En Yüksek Olabilirlik	1.63453	7.69505	0.924712	0.010185	
	Moment Yöntemi	1.6258	7.66434	0.925446	0.011225	√
100	Grafik Yöntemi	1.64735	8.15789	0.926608	0.009825	
	En Yüksek Olabilirlik	1.63453	7.85892	0.932296	0.009437	
	Moment Yöntemi	1.6258	7.82756	0.932892	0.009395	√

Tablo 5.2 de özetlenen 2001-2006 yıllarını kapsayan yaklaşık 52000 veri için 50-100 metre yüksekliklerde yapılan analizde moment yönteminin diğer yöntemlere göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Veri setinin değiştirilmesi durumunda sonucun nasıl olduğunun belirlenmesi amacı ile Tablo 5.3'de 6 yılın bütün Ocak-Aralık ayları

için 50 metre yükseklik için incelenmiştir. Aynı veriler ile yüksekliğin 80 metre yükseklik içinde analiz sonuçları Tablo 5.3 ve 5.4 de gösterilmiştir.

**Tablo 5.3** 50 metre yükseklik için aylık veriler ile yöntemlerin karşılaştırılması

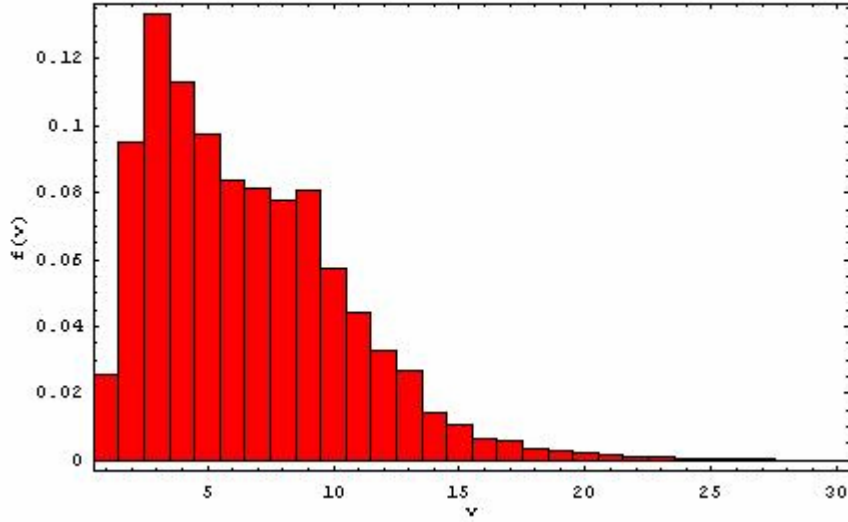
AYLAR	YÖNTEMLER	k	c	R <sup>2</sup>	En İyi Yöntem
	Grafik Yöntemi	1.52745	7.67337	0.929222	
OCAK	En Yüksek Olabilirlik	1.50378	6.7958	0.932247	
	Moment Yöntemi	1.48685	7.47911	0.93256	√
	Grafik Yöntemi	1.47959	7.67262	0.949361	
ŞUBAT	En Yüksek Olabilirlik	1.48169	7.55903	0.949706	
	Moment Yöntemi	1.48042	7.53685	0.949749	√
	Grafik Yöntemi	1.63269	7.62311	0.889832	
MART	En Yüksek Olabilirlik	1.60884	7.73311	0.897386	√
	Moment Yöntemi	1.63692	7.73515	0.891808	
	Grafik Yöntemi	1.63167	7.11509	0.952124	
NİSAN	En Yüksek Olabilirlik	1.63111	6.86313	0.956563	
	Moment Yöntemi	1.6204	6.83058	0.957126	√
	Grafik Yöntemi	1.62616	6.19129	0.926283	√
MAYIS	En Yüksek Olabilirlik	1.63203	6.06931	0.926206	
	Moment Yöntemi	1.63656	6.05689	0.925815	
	Grafik Yöntemi	1.89592	6.06531	0.927719	
HAZİRAN	En Yüksek Olabilirlik	1.79159	6.06878	0.951142	√
	Moment Yöntemi	1.79857	6.05777	0.950056	
	Grafik Yöntemi	2.11034	6.81724	0.934752	
TEMMUZ	En Yüksek Olabilirlik	2.05305	6.90796	0.953286	√
	Moment Yöntemi	2.06337	6.90146	0.950861	
	Grafik Yöntemi	1.9961	6.41987	0.892076	
AGUSTOS	En Yüksek Olabilirlik	1.90667	6.45636	0.91724	√
	Moment Yöntemi	1.91785	6.44771	0.914464	
	Grafik Yöntemi	1.94438	6.56647	0.850087	
EYLÜL	En Yüksek Olabilirlik	1.76557	6.27965	0.907033	
	Moment Yöntemi	1.74534	6.24851	0.910019	√
	Grafik Yöntemi	1.62142	6.92552	0.884916	
EKİM	En Yüksek Olabilirlik	1.58854	6.63127	0.896175	
	Moment Yöntemi	1.57207	6.59867	0.897787	√
	Grafik Yöntemi	1.67883	6.9606	0.872485	
KASIM	En Yüksek Olabilirlik	1.58631	6.58668	0.899093	
	Moment Yöntemi	1.55051	6.5372	0.89963	√
	Grafik Yöntemi	1.67878	7.31326	0.885437	
ARALIK	En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	1.65024	7.43497	0.894537	√
	Moment Yöntemi	1.66895	7.41397	0.890196	

**Tablo 5.4** 80 metre yükseklik için aylık veriler ile yöntemlerin karşılaştırılması

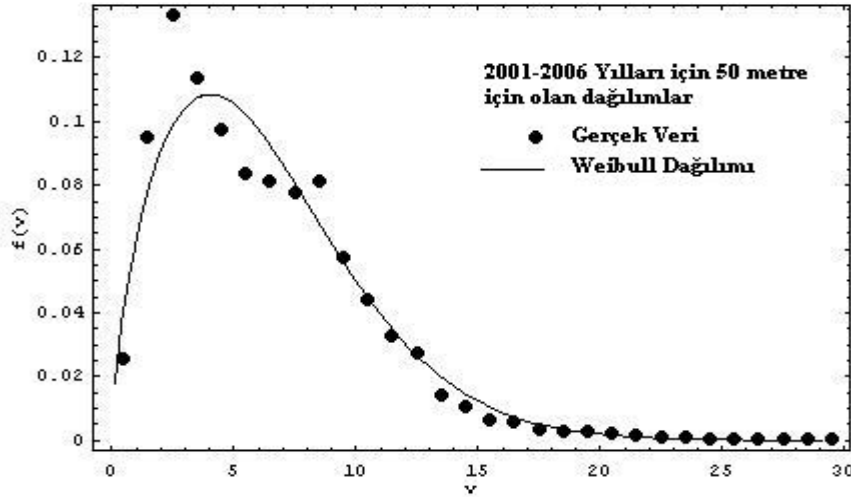
AYLAR	YÖNTEMLER	k	c	R <sup>2</sup>	En İyi Yöntem
	Grafik Yöntemi	1.54109	8.46134	0.914809	
OCAK	En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	1.50378	7.46559	0.920152	
	Moment Yöntemi	1.48685	8.21626	0.920813	√
	Grafik Yöntemi	1.48954	8.42585	0.949033	
ŞUBAT	En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	1.48169	8.30405	0.950191	
	Moment Yöntemi	1.48042	8.27968	0.950293	√
	Grafik Yöntemi	1.63311	8.39611	0.87727	
MART	En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	1.60884	8.49529	0.884431	√
	Moment Yöntemi	1.63692	8.49753	0.878616	
	Grafik Yöntemi	1.64177	7.84213	0.936595	
NİSAN	En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	1.63111	7.53956	0.94279	
	Moment Yöntemi	1.6204	7.5038	0.943475	√
	Grafik Yöntemi	1.636	6.81954	0.922585	
MAYIS	En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	1.63203	6.6675	0.924213	√
	Moment Yöntemi	1.63656	6.65386	0.92383	
	Grafik Yöntemi	1.89099	6.69457	0.893993	
HAZİRAN	En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	1.79159	6.66692	0.918421	√
	Moment Yöntemi	1.79857	6.65483	0.917227	
	Grafik Yöntemi	2.12181	7.47553	0.912128	
TEMMUZ	En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	2.05305	7.58882	0.933289	√
	Moment Yöntemi	2.06337	7.58167	0.930979	
	Grafik Yöntemi	2.02583	7.05904	0.846057	
AGUSTOS	En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	1.90667	7.0927	0.882815	√
	Moment Yöntemi	1.91785	7.0832	0.87986	
	Grafik Yöntemi	1.98549	7.28167	0.809683	
EYLÜL	En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	1.76557	6.89858	0.888757	
	Moment Yöntemi	1.74534	6.86437	0.892145	√
	Grafik Yöntemi	1.63738	7.69333	0.85698	
EKİM	En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	1.58854	7.28485	0.874869	
	Moment Yöntemi	1.57207	7.24904	0.876772	√
	Grafik Yöntemi	1.69364	7.66999	0.862807	
KASIM	En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	1.58631	7.23586	0.896727	
	Moment Yöntemi	1.55051	7.18151	0.898169	√
	Grafik Yöntemi	1.677	8.06455	0.857615	
ARALIK	En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	1.65024	8.16776	0.865784	√
	Moment Yöntemi	1.66895	8.1447	0.861108	

Tablo 5.3 ve 5.4'den de görülebileceği gibi aylık bazda moment yönteminin daha iyi sonuçlar vermesine rağmen bütün aylar için en iyi yöntem moment yöntemi değildir. Bu nedenle veriler incelenirken bir yöntemin her zaman için diğerlerinden daha iyi sonuçlar vereceğinin söylenmesi doğru değildir.

50 metre yükseklik için 6 yıl verilerini kapsayan gerçek veri dağılımı Şekil 5.5’ de gösterilmiştir. Şekil 5.6’ da ise bu verilerden geçirilen en uygun Weibull dağılımı gösterilmektedir. Ek B’de 50 metre yükseklik için aylık ve mevsimsel bazda gerçek veri dağılımı ve bu dağılım için olan Weibull dağılımı görülebilir.



Şekil 5.5 2001-2006 yılları verilerinin dağılımı



Şekil 5.6 2001-2006 yılları verileri için olan Weibull dağılımı

Mevsimsel olarak 50 ve 80 metre yükseklikler için yapılan analiz sonucu Tablo 5.5 ve Tablo 5.6’de sunulmuştur. Mevsimsel veriler için yapılan incelemede de yüksekliğin değişmesi sonucunda en iyi yöntemin değişebileceği görülmektedir



**Tablo 5.5** 50 metre yükseklik için mevsimsel veriler ile yöntemlerin karşılaştırılması

Mevsimler	YÖNTEMLER	k	c	R <sup>2</sup>	RMSE	En İyi Yöntem
	Grafik Yöntemi	1.61606	7.11623	0.933716	0.0101613	
İlkbahar	En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	1.58786	6.996227	0.937416	0.0098737	√
	Moment Yöntemi	1.58921	6.97778	0.937326	0.0098807	
	Grafik Yöntemi	2.0095	6.3978	0.922173	0.01259	
Yaz	En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	1.90643	6.48212	0.949206	0.0101711	√
	Moment Yöntemi	1.91841	6.47432	0.946787	0.0104104	
	Grafik Yöntemi	1.69663	6.88351	0.897233	0.0142583	
Sonbahar	En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	1.6352	6.50202	0.917978	0.0127381	
	Moment Yöntemi	1.60932	6.46351	0.919603	0.0126113	√
	Grafik Yöntemi	1.55254	7.5805	0.938572	0.0090593	
Kış	En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	1.53931	7.50775	0.939821	0.0089667	√
	Moment Yöntemi	1.53864	7.47676	0.939814	0.0095928	

**Tablo 5.6** 80 metre yükseklik için mevsimsel veriler ile yöntemlerin karşılaştırılması

Mevsimler	YÖNTEMLER	k	c	R <sup>2</sup>	RMSE	En İyi Yöntem
	Grafik Yöntemi	1.62483	7.84462	0.924216	0.0098415	
İlkbahar	En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	1.58786	7.68583	0.930016	0.0095945	√
	Moment Yöntemi	1.58921	7.66551	0.929959	0.0095984	
	Grafik Yöntemi	2.019115	7.04005	0.889707	0.0137027	
Yaz	En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	1.90643	7.121	0.921222	0.0115734	√
	Moment Yöntemi	1.91841	7.11243	0.918699	0.0117647	
	Grafik Yöntemi	1.71228	7.6313	0.87873	0.014186	
Sonbahar	En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	1.6352	7.14286	0.906937	0.0124272	
	Moment Yöntemi	1.60932	7.10055	0.909047	0.0122855	√
	Grafik Yöntemi	1.56326	8.34132	0.926019	0.0091109	
Kış	En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	1.53931	8.24771	0.928936	0.0089272	
	Moment Yöntemi	1.53864	8.20058	0.928999	0.0089233	√

Yapılan analizler sonucunda moment yöntemi ve en yüksek olabilirlik yönteminin şekil parametresi hesaplarının yükseklikle değişmediği görülmektedir. Buna karşılık bu iki yöntemin ölçek parametresi ortalama hızdaki yüzde değişim kadar artmaktadır. Yani dağılımda şekil parametresi daha çok tepe nokta ile ilgili iken ölçek parametresi ortalama hız ile orantılıdır.

### 5.3 Ekonomik Analiz

Bir bölgeye rüzgar türbini kurulurken yapılması gereken çalışmalardan bir tanesi de kWh enerji maliyetinin hesaplanmasıdır. Enerji maliyeti, seçilen türbine, seçilen göbek yüksekliğine, bağlantı giderlerine, enflasyon oranına, faiz oranına göre değişmektedir. Denklem 5.1 sistem ömrü boyunca yapılan yatırımın şimdiki zaman değerini göstermektedir. Denklem 5.2 ise bakım onarım giderlerini göstermektedir. Denklem 5.3 ise rüzgar türbinlerinden üretilen enerjinin birim maliyeti hesaplanmasını göstermektedir [88].

$$PVC = I + B \left[ \frac{1+i}{r-i} \right] * \left[ 1 - \left( \frac{1+i}{1+r} \right)^t \right] - S \left( \frac{1+i}{1+r} \right)^t \quad (5.1)$$

PVC değeri sistemin ömrü boyunca yapılan yatırımın şimdiki zaman değerini göstermektedir. I ilk yatırım maliyetini yani türbin fiyatı ile onun % 20' si kadar olan bağlantı giderlerini, B yıllık bakım onarım giderlerini, i enflasyon oranını, r faiz değerini, S hurda bedelini, t ise türbinin ömrünü göstermektedir. Yapılan çalışmalar sonunda B yıllık bakım onarım gideri denklem 5.2 ile ifade edilmektedir.

$$B = \frac{I}{(t * 4)} \quad (5.2)$$

Elektrik enerjisinin kWh maliyeti ise denklem 5.3 ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$kWh \text{ Maliyeti} = \frac{PVC}{P_R * C_f * t} \quad (5.3)$$

Denklem 5.3 de ise  $P_R$  türbin gücünü,  $C_f$  kapasite faktörünü göstermektedir.

Tablo 5.7 bu çalışma kapsamında kullanılan 1000, 1300, 2000 ve 2300 kW gücünde 4 türbinin, 50, 60, 70, 80, 90, 100 metre göbek yüksekliğinde 13 farklı durumu için % 3.5 enflasyon ve % 4.5 faiz oranlarında türbin fiyatlarının şimdiki zaman değerlerini göstermektedir [88]. Türbinlerin gerçek fiyatları ise denklem 5.1' den türbin fiyatı çekilerek hesaplanmıştır.

Tablo 5.7' den de görülebileceği gibi rüzgar türbinlerinin fiyatları sadece kullanılan generatöre göre değil aynı zamanda göbek yüksekliklerine bağlı olarak da değişmektedir. Fiyatın değişim nedenlerinden bir tanesi kullanılan malzemenin ve işçilik süresinin uzamasıdır, bunlar kadar önemli olan bir diğer faktör ise bu kulelerin taşınmasından kaynaklanmaktadır.

**Tablo 5.7** Farklı Yüksekliklere Göre Türbin Fiyatları

Durumlar	Türbin Gücü kW	Yükseklik m	Türbin Maliyeti PVC €	Türbin Fiyatı €
Durum1	1000	50	1099031	827999.4
Durum2	1000	60	1138272	857563.2
Durum3	1000	70	1193272	898999.7
Durum4	1300	60	1417592	1068000
Durum5	1300	70	1546343	1165000
Durum6	1300	80	1668457	1256999
Durum7	1300	90	1797209	1354000
Durum8	2000	60	2203372	1659999
Durum9	2000	80	2374598	1788999
Durum10	2000	90	2521932	1899999
Durum11	2300	80	2561762	1930007
Durum12	2300	90	2721032	2049999
Durum13	2300	100	2860402	2154999

Tablo 5.8 enflasyon oranları ve faiz oranlarının farklı olması durumu için yapılan yatırımın şimdiki değerini göstermektedir. Bu çalışmada euro için %3.5 enflasyon ve % 4.5 faiz oranları esas alınmıştır. Bunun sonucunda oluşan birim kWh maliyeti ise Tablo 5.8’ de sunulmaktadır. Ayrıca Tablo 5.8’ de türbinlerin kullanılabilirlik, kapasite faktörü değerleri belirtilmektedir. Kullanılabilirlik; rüzgar türbininin belirli zaman diliminde çalışma yüzdesi olarak ifade edilmektedir. Türbinlerin kapasite faktörleri değerleri incelendiği zaman en büyük kapasite faktörüne sahip türbinin durum 7 ile belirtilen 1300 kW 90 metre göbek yüksekliğine sahip olan türbin olduğu karşımıza çıkmaktadır, en küçük kapasite faktörüne sahip türbin ise 1000 kW ve 50 metre göbek yüksekliği olan durum 1 içindir. Bununla birlikte kapasite faktörü en büyük olan rüzgar türbini en ekonomik çözümü her zaman vermediği Tablo 5.8’ den görülebilir. Önemli olan ekonomik analiz sonuçlarıdır çünkü burada amaç en ekonomik olan üretim seçeneğinin belirlenmesidir. Fakat amacın en fazla elektrik üretimi ya da en büyük kapasite faktörlü sistemin seçilmesi de olabilir. Bu çalışma kapsamında en ekonomik çözümün belirlenmesi hedeflendiğinden en ekonomik çözüm olan durum 11 ile belirtilen 2300 kW ve 80 metre göbek yüksekliğine sahip olan türbinin aylık olarak kapasite faktörü değeri Tablo 5.9 ile gösterilmektedir.

**Tablo 5.8** 13 farklı durumun karşılaştırılması

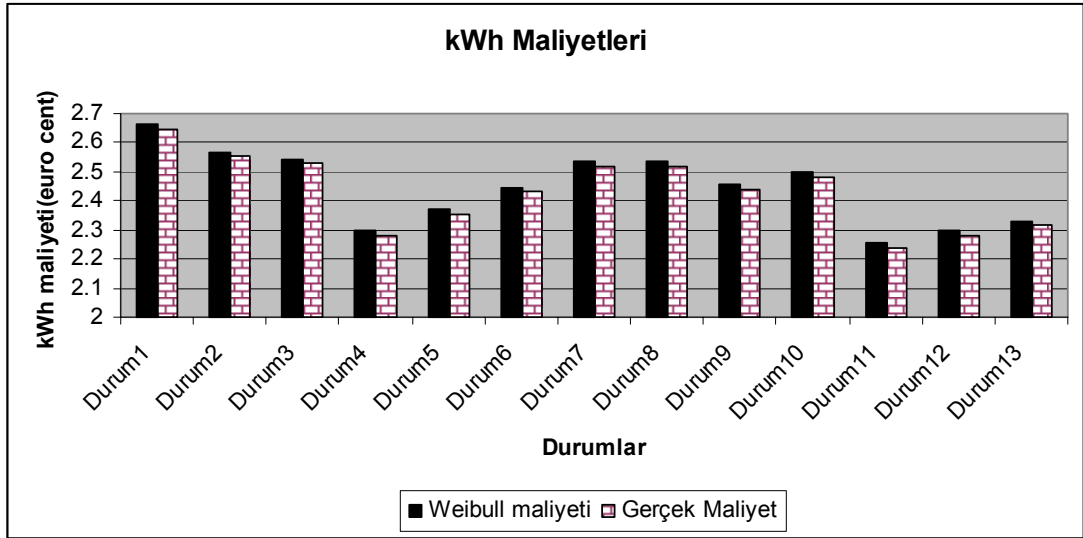
Durumlar	Kapasite Faktörü Weibull	Kapasite Faktörü Gerçek	Kullanılabilirlik Weibull	Kullanılabilirlik Gerçek	Yıllık Türbin Maliyeti	kWh Weibull maliyeti euro cent	kWh Gerçek maliyeti
Durum1	0.236	0.237	0.656	0.631	54951.55	2.661	2.647
Durum2	0.253	0.254	0.672	0.648	56913.6	2.568	2.554
Durum3	0.268	0.269	0.685	0.648	59663.6	2.542	2.532
Durum4	0.27	0.273	0.672	0.648	70879.6	2.301	2.281
Durum5	0.286	0.288	0.685	0.648	77317.15	2.374	2.356
Durum6	0.3	0.301	0.696	0.658	83422.85	2.446	2.43
Durum7	0.312	0.314	0.705	0.675	89860.45	2.533	2.515
Durum8	0.248	0.25	0.672	0.648	110168.6	2.538	2.517
Durum9	0.276	0.278	0.696	0.658	118729.9	2.455	2.44
Durum10	0.288	0.29	0.705	0.675	126096.6	2.5	2.482
Durum11	0.282	0.284	0.696	0.658	128088.1	2.254	2.238
Durum12	0.294	0.296	0.705	0.675	136051.6	2.297	2.279
Durum13	0.305	0.307	0.713	0.674	143020.1	2.33	2.316

Weibull dağılımının ve gerçek verilerin kullanılması sonucunda elde edilen kapasite faktörü değerleri birbirine çok yakın bulunmuştur. Yapılan ekonomik analiz sonucunda ise hem Weibull dağılımı hem de gerçek verilerin zaman serisine göre kullanılması ile Durum 11 yani 2300 kW 80 metre yükseklikteki türbinin en ekonomik üretim yapabileceği anlaşılmaktadır. Birim kWh enerji maliyeti Weibull dağılımı kullanılarak 2.254 eurocent, zaman serisi analizi sonucunda ise 2.238 eurocent olarak bulunmuştur. Günümüz fosil kökenli yakıtlardan enerji üretim maliyetleri de bu seviyededir

**Tablo 5.9** Durum 11 ile belirtilen türbinin aylık kapasite faktörleri

Aylar	Kapasite Faktörü Gerçek	Kapasite Faktörü Weibull	Kullanılabilirlik Gerçek	Kullanılabilirlik Weibull
Ocak	0.326594	0.32919	0.676075	0.704346
Şubat	0.332262	0.332602	0.677827	0.705446
Mart	0.36447	0.345391	0.696658	0.735661
Nisan	0.283179	0.283436	0.661546	0.69623
Mayıs	0.228543	0.225215	0.612634	0.647505
Haziran	0.222693	0.215699	0.627546	0.67002
Temmuz	0.283043	0.274771	0.731532	0.764481
Ağustos	0.253348	0.24181	0.671595	0.714953
Eylül	0.237411	0.232769	0.629398	0.677239
Ekim	0.274773	0.270277	0.616935	0.677388
Kasım	0.261689	0.264742	0.623611	0.666935
Aralık	0.341729	0.326291	0.678763	0.733244

Bu çalışmada kullanılan grafik yöntem kullanılması sonucunda ekonomik analizlerde meydana gelen değişimlerin incelenmesi için Tablo 5.10 ile gösterilmektedir.



Şekil 5.7 Gerçek Maliyet ve Weibull Maliyetlerinin Karşılaştırılması

Tablo 5.10 Grafik Yönteme göre türbinin aylık kapasite faktörleri

Durumlar	Kapasite Faktörü Weibull	Kapasite Faktörü Gerçek	Kullanılabilirlik Weibull	Kullanılabilirlik Gerçek	Yıllık Türbin Maliyeti	kWh Weibull maliyeti euro cent	kWh Gerçek maliyeti
Durum1	0.253	0.237	0.676	0.631	54951.55	2.479	2.647
Durum2	0.280	0.254	0.705	0.648	56913.6	2.323	2.554
Durum3	0.290	0.269	0.709	0.648	59663.6	2.353	2.532
Durum4	0.299	0.273	0.705	0.648	70879.6	2.084	2.281
Durum5	0.309	0.288	0.709	0.648	77317.15	2.200	2.356
Durum6	0.321	0.301	0.716	0.658	83422.85	2.281	2.430
Durum7	0.334	0.314	0.726	0.675	89860.45	2.364	2.515
Durum8	0.275	0.250	0.705	0.648	110168.6	2.291	2.517
Durum9	0.297	0.278	0.716	0.278	118729.9	2.282	2.440
Durum10	0.309	0.290	0.726	0.675	126096.6	2.327	2.482
Durum11	0.303	0.284	0.716	0.658	128088.1	2.097	2.238
Durum12	0.316	0.296	0.726	0.675	136051.6	2.139	2.279
Durum13	0.326	0.307	0.732	0.674	143020.1	2.180	2.316

Grafik yöntem kullanılması sonucunda gerçek verinin kullanılması ile yapılan sonuçlara göre hata miktarı önemli derecede artmakta bu da yanlış türbin seçimi ve hatalı fizibilite çalışmalarına neden olabilmektedir. Bu nedenle Weibull parametrelerinin doğru olarak belirlenebilmesi önemlidir.

## 6. SONUÇLAR

Rüzgar enerjisinin elektrik enerjisi üretmek amacıyla kullanılması ülkelere göre farklılık göstermektedir. Bunun nedeni mevcut potansiyelin farklı olmasının yanı sıra uygulanan politikalardan kaynaklanmaktadır. İngiltere, AB ülkeleri arasında en fazla rüzgar enerjisi potansiyeline sahip olmasına rağmen, Tablo 3.1' den de görülebileceği gibi kurulu güç olarak bir çok ülkenin gerisindedir. Bunun nedeni ise uygulanan enerji politikalarının ve destek sistemlerinin farklı olmasıdır. Yani sadece ekonomik potansiyelin olması tek başına yeterli değildir, ülkemiz için de benzer durum söz konusudur.

Rüzgar enerjisi potansiyeli hesaplarında Wasp, Wind Pro, Alwin gibi programlar kullanılmaktadır. Bu programlar Weibull dağılımını referans almaktadırlar ve bu dağılım sonucu çıkan değerler ile gerçek zaman serisi verileri ile yapılan analizler birbirine çok yakın sonuçları vermektedir. Bu çalışma kapsamında incelenen Çanakkale bölgesinin 2001-2006 yılları arası 6 yıllık saatlik ortalama rüzgar verisinin Weibull dağılımı ile hata analizleri yapılmış 50 metre yükseklikte yıllık veriler için  $R^2$  sonucunun 0.9547, RMSE'nin ise 0.00869 olduğu yani gölgenin rüzgar karakteristiğinin Weibull dağılımına uyduğu söylenebilir.

Weibull dağılım parametreleri hesaplanmasında kullanılan yöntemlerden moment yöntemi, yapılan analiz sonucunda bölge verilerini analiz etmede diğer yöntemlere göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Bununla birlikte bütün bölgeler için bunun geçerli olduğu söylenemez, çünkü yüksekliğin değişmesi durumunda bazı durumlar için en iyi yöntem değişebilmektedir. Karşılaştırma sonuçlarında moment ve en yüksek olabilirlik yöntemi sonuçlarının birbirine çok yakın çıktığı bulunmuştur. Ayrıca şekil parametresinin moment yöntemi ve en yüksek olabilirlik yöntemi ile bir yükseklikte hesaplandığında aynı değer farklı yükseklikler için de kullanılabilir olduğu ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte ölçek parametresindeki değişimi ise her iki yöntemde de rüzgar hızındaki değişime oranla aynı sonucu verdiği bulunmuştur, yani moment ya da en yüksek olabilirlik yöntemi sonucunda belirli bir yükseklik için hesap edilmiş

değerler istenilen yüksekliğe güç kanunu profiline göre çıkartılıp ekonomik analiz yapılabilir.

Literatürde türbin denklemini modellemek için en çok 3.dereceden bir denklem, ikinci dereceden bir denklem ve karesel bir ifade kullanılmaktadır. Yapılan hesaplamalar sonucunda kullanılan 3 modelden 3. dereceden denklem ile türbin güç ergilerinin modellenmesinin seçilen türbinler için daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Yapılan çalışmada mevcut bölge için kWh enerji maliyetinin 2.65 ile 2.22 kWh/eurocent arasında olduğu görülmüştür. İncelenen 13 durumdan en ekonomik çözümü 2300 kW 80 metre yükseklikte türbinin (Durum 11) en ekonomik üretimi yapacağı sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum için kWh maliyeti 2.22 eurocent'dir. Aynı güçteki türbinler için göbek yüksekliği fazla olan sistemin her zaman daha ucuz enerji üretmesi gibi bir durum söz konusu değildir. Tablo 3.12'de belirtildiği gibi dünya türbin satış eğilimleri 1501 kW- 2500 kW arasında değişmekte olup, yapılan çalışmada da en ekonomik çözüme 2300 kW'lık türbin için ulaşılmıştır. Bu da yapılan çalışmayı desteklemektedir. Rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesi ve ekonomik analizinin ülkemizde başka bölgeleri için de yapılması gereklidir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Şen Ç.**, 2003. Gökçeada'nın elektrik enerjisi ihtiyacının rüzgar enerjisi ile karşılanması, Yüksek Lisans Tezi, D.E.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü. İzmir
- [2] **Çengel Y. A., Boles M.**, 2005. Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik, Literatür
- [3] **Sohtaoglu. H, Diz İ., Erbaş M. F.**, 2006. Enerji Kaynaklarının Arz ve Talebe Yönelik Küresel Eğilimlerinin Tarihsel Süreçte Karşılaştırmalı Analizi, Türkiye 10. Enerji Kongresi, 9-22
- [4] **İTU**, 2007. Türkiye'de Enerji ve Geleceği İTÜ Görüşü, İ.T.Ü Matbaası, İstanbul.
- [5] **IEA**, 2007. Key World Energy Statistics, Paris.
- [6] **IEA**, 2007. World Energy Outlook 2007, Paris.
- [7] **EIA**, 2006. International Energy Outlook 2006, Newyork.
- [8] **Onaygil S., Acuner E., Erkin E.**, 2007. Bina sektörü enerji verimliliği uygulamalar ve Türkiye için öneriler, EVK 2007, İzmit.
- [9] **DPT**, 2006. Enerji Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Ankara.
- [10] <http://www.eia.doe.gov/pub/international/iea2005/table64.xls>
- [11] [www.ewea.org/fileadmin/ewea\\_documents/documents/publications/reports/wf12-2005.pdf](http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/reports/wf12-2005.pdf)
- [12] **Shata, A.S.A.**, 2005. The potential of electricity generation on the east coast of Red Sea in Egypt, *Renewable Energy*, 31, 1597-1615
- [13] [http://www.tedas.gov.tr/29,Istatistiki\\_Bilgiler.html](http://www.tedas.gov.tr/29,Istatistiki_Bilgiler.html)
- [14] **Erdogdu E.**, 2007. Regulatory Reform in Turkish Energy Industry: An analysis, *Energy Policy*, 35, 984-993
- [15] [www.epdk.org.tr/yayin\\_rapor/elektrik/yayin/uretimKapasiteProjeksiyonu.pdf](http://www.epdk.org.tr/yayin_rapor/elektrik/yayin/uretimKapasiteProjeksiyonu.pdf)
- [16] **Ozkivrak, Ö.** 2005. Electricity restructuring in Turkey, *Energy Policy*, 33, 1339-1350
- [17] **Karadeli, S.**, 2001. Rüzgar Enerjisi, Temiz Enerji Vakfı, Ankara
- [18] **Menteş, Ş., S.**, 2006. Rüzgar Enerjisi Ders Notları
- [19] [www.wwindea.org/home/images/stories/pdfs/pr\\_statistics2006\\_290107.pdf](http://www.wwindea.org/home/images/stories/pdfs/pr_statistics2006_290107.pdf)
- [20] **IEA**, 2007. Wind Energy Annual Report 2006, Paris.
- [21] **BTM-Constult**, 2007. World Market Update 2006. BTM constult, Ringkobing
- [22] **Shata A. S. A., Hanitsch R.** , 2006. Evaluation of wind energy potential and electricity generation on the coast of Mediterranean Sea in Egypt *Renewable Energy*, 31, 1183-1202.



- [23] **Buen J.**, 2006. Danish and Norwegian wind industry: The relationship between policy instruments, innovation and diffusion, *Energy Policy* 34, 3887-3897
- [24] **Akdağ, S. A., Güler, Ö.** 2007. Dünyada Uygulanan Destek Modellerine Bağlı Olarak Rüzgar Enerjisi ile Sektörünün Gelişimi ve Ülkemizdeki Mevcut Durumun Değerlendirilmesi, VI. Ulusal Enerji Sempozyumu, Ankara, 22-24 Ekim
- [25] **Guler, Ö.**, Wind Energy Status in Electrical Energy Production of Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- [26] [http://www.repower5m.de/index\\_flash.htm](http://www.repower5m.de/index_flash.htm)
- [27] **Kamp L. M.**, 2004. Notions on learning applied to wind turbine development in the Netherlands and Denmark, *Energy Policy*, 32,1625-1637
- [28] **Lewis J. I., Wisler R. H.**, 2007. Fostering a renewable energy technology industry : an comparison of wind industry policy support mechanisms, *Energy Policy* 35, p.1844-1857
- [29] **BTM-Constult**, 2005. World Market Update 2004. BTM constult, Ringkobing
- [30] **BTM-Constult**, 2006. World Market Update 2005. BTM constult, Ringkobing
- [31] How much does Vestas sell - and to which countries? [http://www.vestas.com/vestas/global/en/Students\\_Room/Marketing\\_markets/export\\_markets.htm](http://www.vestas.com/vestas/global/en/Students_Room/Marketing_markets/export_markets.htm)
- [32] **Ackerman, T.**, 2005. Wind Power in Power System, John & Sons, Chichester.
- [33] **Hansen, A. D.**, 2007. Wind Turbine Concept Market Penetration over 10 Years (1995-2004), *Wind Energy* 10, 81-97.
- [34] **Ackermann T., Söder L.**, 2000. Wind energy technology and current status: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, 315-374
- [35] **Meyer N. I., Koefoed A. L.**, 2003. Danish energy reform: policy implications for renewables, *Energy Policy*, 31, 7, 597-607
- [36] **Buen J.**, 2006. Danish and Norwegian wind industry: The relationship between policy instruments, innovation and diffusion, *Energy Policy*, 34, 3887-3897
- [37] **Kamp L. M.**, 2004. Notions on learning applied to wind turbine development in the Netherlands and Denmark, *Energy Policy*, 32,1625-1637
- [38] **Buen J.**, 2006, Danish and Norwegian wind industry: The relationship between policy instruments, innovation and diffusion, *Energy Policy*, 34, 3887-3897
- [39] **Meyer N. I., Koefoed A. L.**, 2003. Danish energy reform: policy implications for renewables, *Energy Policy*, 31, 7, 597-607
- [40] <http://www.ens.dk/sw14294.asp>
- [41] **Wijk A.J.M. V., Coelingh J. P.**, 1993. OECD countries wind potential, 93091. Utrecht University
- [42] [http://www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar/ruzgar\\_ruzgar\\_atlas.html](http://www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar/ruzgar_ruzgar_atlas.html)
- [43] **Malkoç, Y.**, 2007. Numerik Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası, 26. Enerji Verimliliği Haftası Konferansı, Ankara

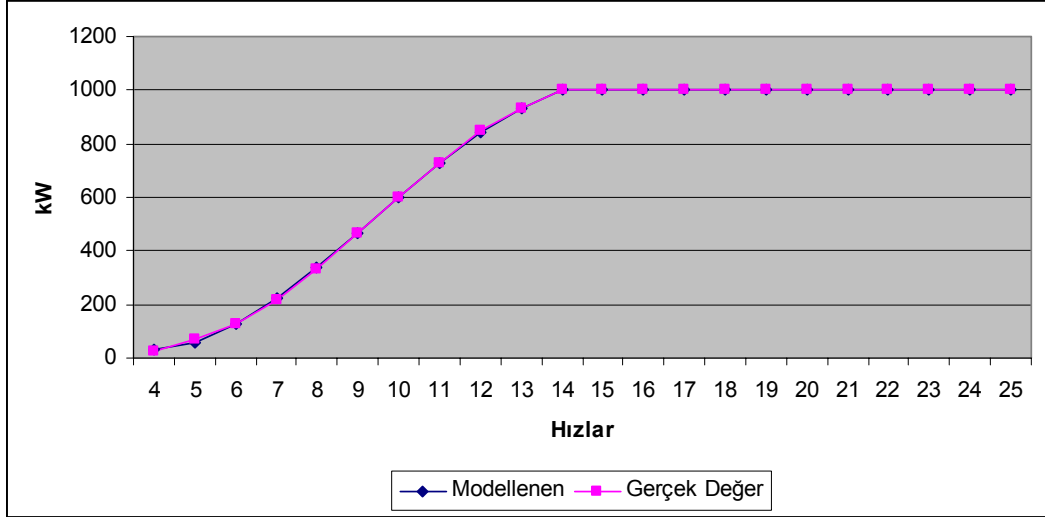
- [44] **Kenisarın M., Karlı V M., Çağlar M.**, 2006. Wind power engineering in the world and perspectives of its development in Turkey, *Renewable&Sustainable Energy Reviews*, p. 341-369
- [45] <http://www.epdk.org.tr/lisans/elektrik/yek/ruzgarprojeleriningelisimi.xls>
- [46] [www.tuik.gov.tr](http://www.tuik.gov.tr)
- [47] <http://www.epdk.org.tr/mevzuat/diger/yenilenebilir/yenilenebilir.doc>
- [48] <http://www.demirer.com.tr/>
- [49] **Patel, M.R.**, 2006. *Wind and Solar Power System Desing Analysis and Operation*, Taylor & Francis, Raton.
- [50] **Kose R.**, 2004. The analysis of wind data and wind energy potential in Kutahya, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8, 277-288
- [51] [http://www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar/ruzgar\\_potansiyel.html](http://www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar/ruzgar_potansiyel.html)
- [52] **Ozerdem B., Ozer S., Tosun M.**, 2006. Feasibility study of wind farms: A case study for Izmir, Turkey, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 94, p. 725-743
- [53] **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
- [54] **Celik, A.N.**, 2003. A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey, *Renewable Energy*, 29, 593-604
- [55] **Ulgen, K., Genç A., Hepbasli A., Oturanc G.**, 2004. Assesment Of Wind Characteritics For Energy Generation, *Energy Sources*, 26, 1227 – 1337
- [56] **Gökçek, M., Bayülken, A., Bekdemir, Ş.**, 2007. Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Kırklareli, Turkey, *Renewable Energy*, 32, 1739-1752
- [57] **Karsli, V.M., Geçit, C.**, 2003. An investigation on wind power potential of NurdağGaziantep, Turkey, *Renewable Energy*, 28, 823-830
- [58] **Kavak Akpınar, E., Akpınar, S.**, 2005. An assessment on seasonal analysis of wind energy charactersitics and wind turbine characteristics, *Energy Conversion & Management*, 46, 1848-1867
- [59] **Lu, L., Yang, H., Burnet, J.**, 2002. Investigation on wind power potential on Hong Kong islands-an analysis of wind power and wind turbine characteristics, *Renewable Energy*, 27, 1-12
- [60] **Lun I. Y. F., Lam J. C.**, 2000. A study of Weibull parameters using long-term wind observations, *Renewable Energy*, 20, 145-153
- [61] **Ngala G.M., Alkali B., Aji M.A.**, 2007. Viability of wind energy as a power generation source in Maiduguri, Borno state, Nigeria, *Renewable Energy*, 32, 2242-2246
- [62] **Akpınar E. K, Akpınar S.**,2004. Determination of the wind energy potential for Maden-Elazig, Turkey, *Energy Conversion and Management*, 45, 2901-2914

- [63] **Vogiatzis N., Kotti K., Spanomitsios S., Stoukides M.** 2004, Analysis of wind potential and characteristics in North Aegean, Greece, *Renewable Energy*, 29, 1193-1208
- [64] **Weisser D.**, 2003. A wind energy analysis of Grenada: an estimation using the Weibull density function. *Renewable Energy*, 28, 1803-1812
- [65] Elamouri M., Amar F. B., Energy assessment of the first wind farm section of Sidi Daoud, Tunisia *Renewable Energy*,
- [66] **Sulaiman Y., Akaak A. M., Sulaiman Z. A., Suradi J.**, 2002. Wind characteristics of Oman, *Energy*, 27, 35-46
- [67] **Persaud S., Flynn D., Fox B.**, 1999. Potential for wind generation on the Guyana coastlands, *Renewable Energy* 18, 175-189
- [68] **Şahin A. Z., Aksakal A.**,1998. Wind power energy potential at the northeastern region of Saudi Arabia, *Renewable Energy*, 14, 435-440
- [69] **Jamil M., Parsa S.,Majidi M.** 1995. Wind power statistics and an evaluation of wind energy density, *Renewable Energy*, 6, 623-628
- [70] **Zhou W., Yang H., Fang Z.**, 2006. Wind power potential and characteristic analysis of the Pearl River Delta region, China, *Renewable Energy* ,31, 739–753
- [71] **Jaramillo O. A., Borja M. A.**, 2004. Windspeedanalysis in La Ventosa, Mexico: a bimodal probability distribution case, *Renewable Energy*,29,1613-1630
- [72] **Ramírez P., Carta J A.**, 2006. The use of wind probability distributions derived from the maximum entropy principle in the analysis of wind energy. A case study. *Energy Conversion and Management* ,47, 2564-2577
- [73] **Tar K.**, Some statistical characteristics of monthly average wind speed at various heights, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,
- [74] **Dorvlo A.S. S.**, 2002. Estimating wind speed distribution, *Energy Conversion and Management*, 43, 2002, 2311-2318
- [75] **Yingni J. , Xiulinga Y., Jianmeia F., Xiaojunb C.**, 2006. Wind Power Density Statistics Using the Weibull Model for Inner Mongolia, China
- [76] **Seguro J. V., Lambert T. W.**, 2000. Modern estimation of thr parametre sor the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis. *J. Wind Energy and Industrial Aerodynamics*, 85, 75-84.
- [77] **Cook N. J.**, 2001. Discussion on modern estimaiton of the parameters or the Weibull wind speed distribution for wind speed energy analysis, *J. Wind Energy and Industrial Aerodynamics*, 89, 867-869.
- [78] **Akdağ S.A, Dinler A., Menteş Ş. S**, 2007. Rüzgar Karakteristiğinin Analizi, *YEKSEM 07 1 Kasım 2007*, Gaziantep.
- [79] **Shata, A.S.A., Hanitsch, R.**, 2006. Evaluation of wind energy potential and electricity generation on the coast of Mediterranean Sea in Egypt, *Renewable Energy*, 31, 1183-1202

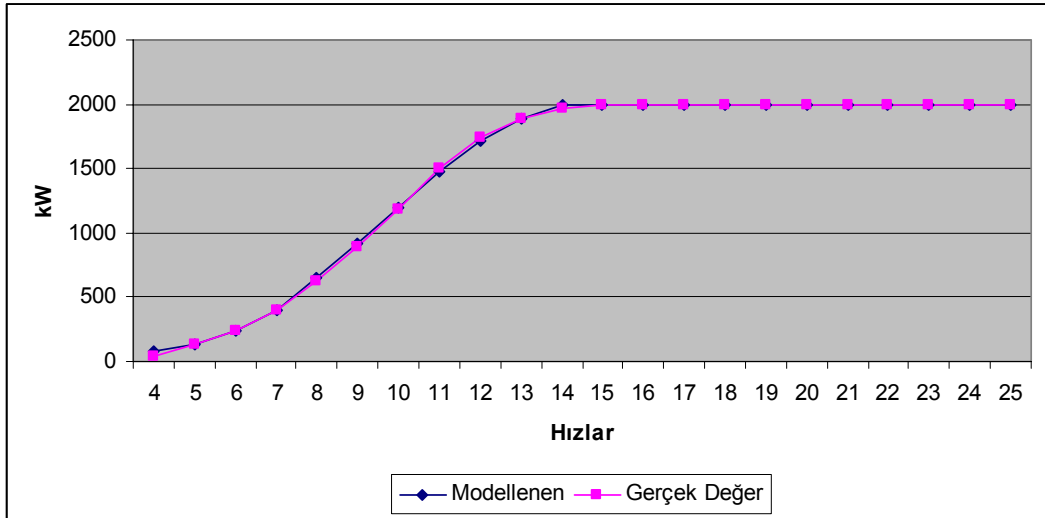
- [80] **Genc, A., Erisoglu, M., Oturanc, G., Hepbasli, A., Ulgen, K.,** 2005. Estimation of wind power potential using Weibull distribution, *Energy Sources*, 27, 809-822
- [81] **Elitok Ö.,** 2006. Weibull Dağılımı ve Uygulamaları, *Yüksek Lisans Tezi*, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale
- [82] **Chang T. J., Wu Y. T., Hsu H., Chu C., Liao C.,** 2003. Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan, *Renewable Energy*, 28, 851-871
- [83] **Eskin N., Artar H., Tolun S.** 2008. Wind energy potential of Gökçeada Island in Turkey *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 839-851
- [84] **Akpınar E. K.,** 2006. S Statistical Investigation of Wind Energy Potential, *Energy Sources Part A*, 807-820
- [85] **Celik N.A.,** 2007. A Techno-economic analysis of wind energy in southern Turkey, *I.J. Green Energy*, 4, 233-247
- [86] **Justus C. G., Hargraves W.R., Yalcın A.,** 1976. Nationwide Assesment of Potential from wind powered generators, *J. Applied Meteorology*. 15, 673-678
- [87] **Pallabazzer R.,** 2004. Effect of site wind properties on wind electric conversion costs, *Wind Engineering*, 28, 679-694
- [88] **Bagiorgas H.S., Assimakopoulos M.N., Theoharopoulos D., Matthopoulos D. Mihalakakou G.K.,** 2007. Electricity generation using wind energy conversion systems in the area of Western Greece *Energy Conversion and Management*, 48, 1640-1655

## EK A

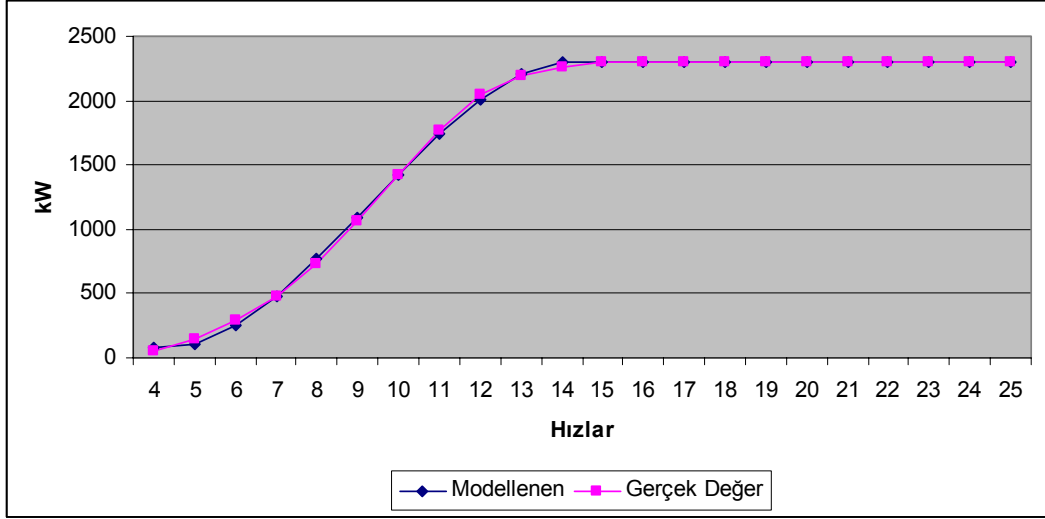
### Rüzgar türbinleri modellenmesi sonuçları



Şekil A.1 1000 kW türbinin modellenmesi



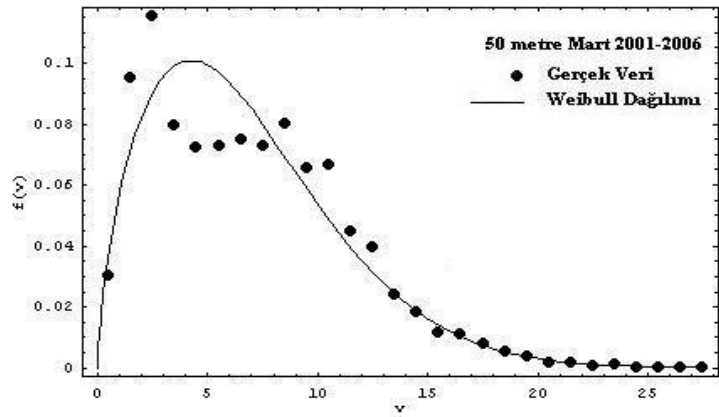
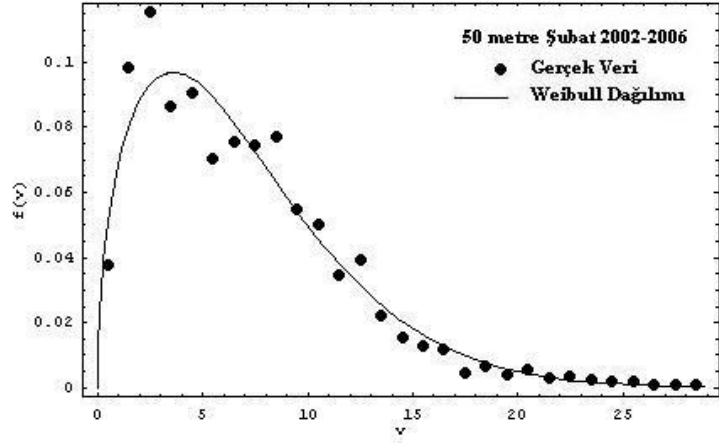
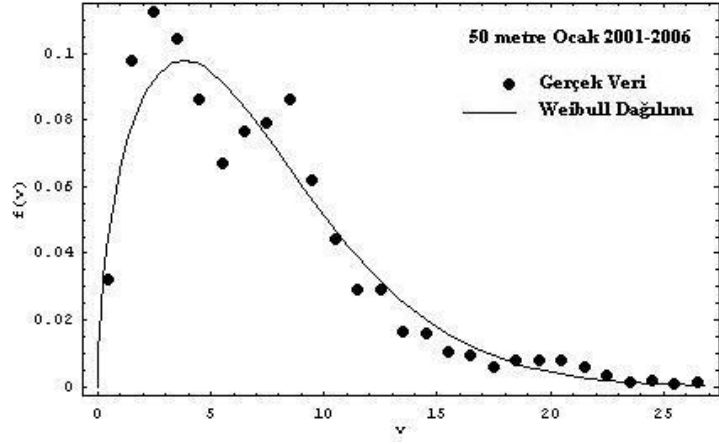
Şekil A.2 2000 kW türbinin modellenmesi



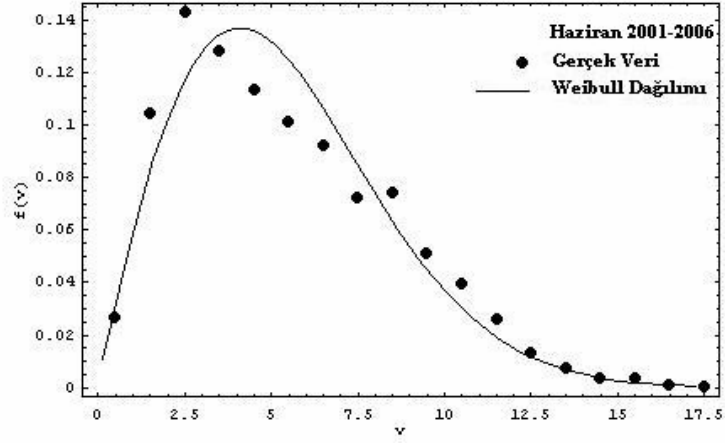
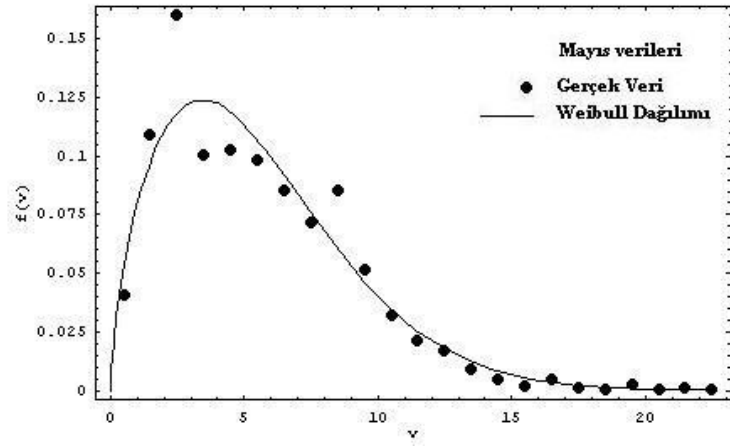
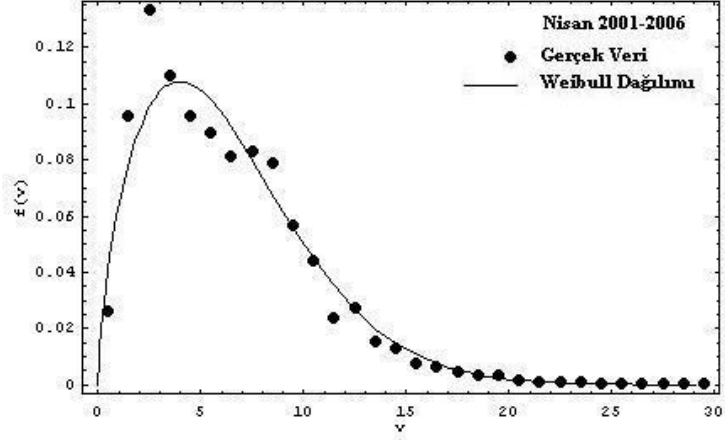
Şekil A.3 2300 kW türbinin modellenmesi

## EK B

Aylık bazda gerçek veriler ve Weibull dağılımı

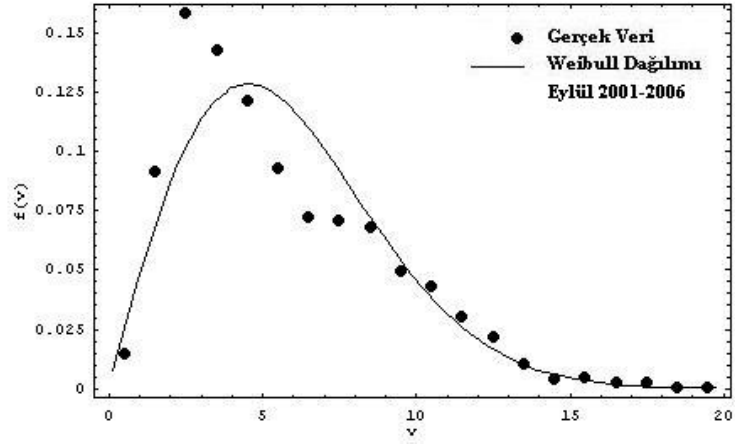
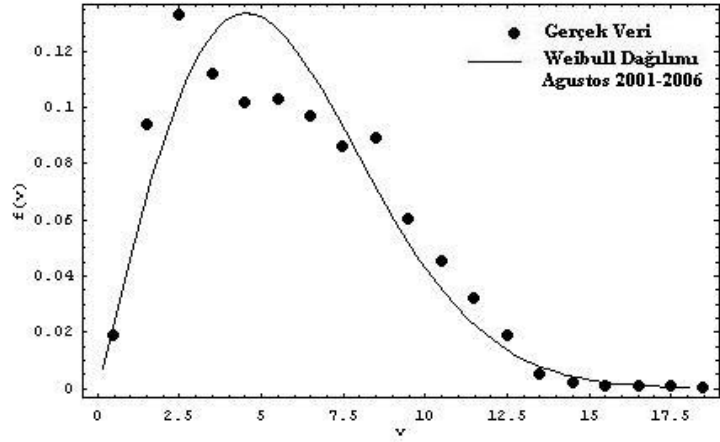
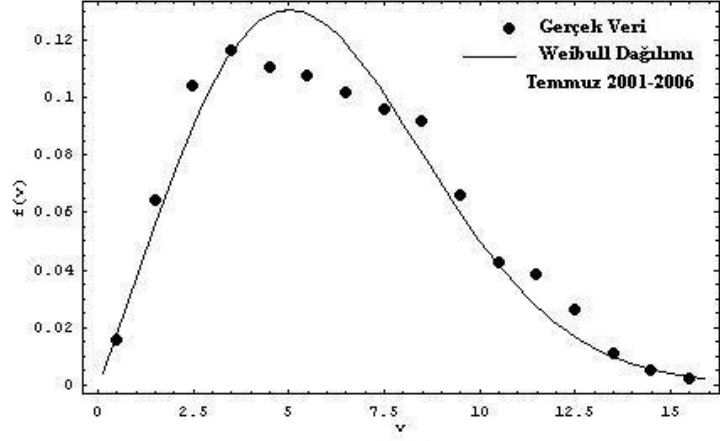


Şekil B.1 Ocak-Şubat-Mart ayları dağılımları

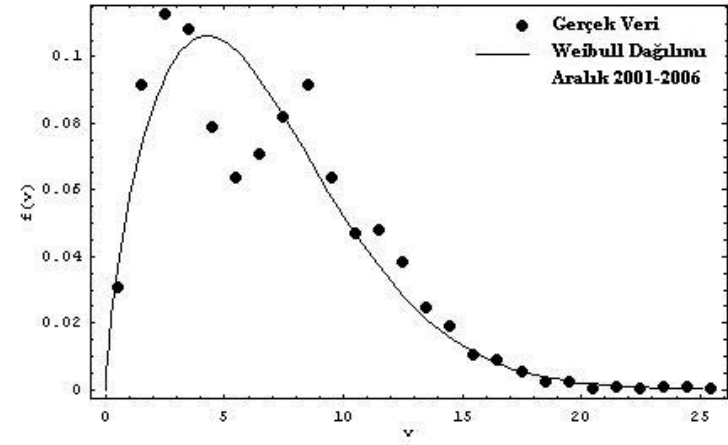
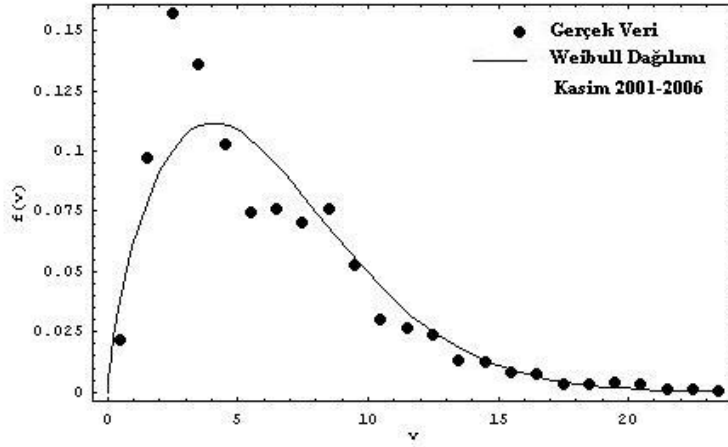
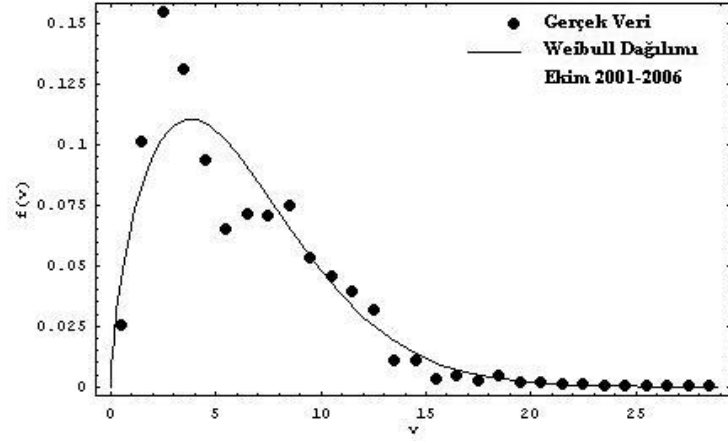


**Şekil B.2** Nisan-Mayıs-Haziran ayları dağılımları





Şekil B.3 Temmuz-Ağustos-Eylül ayı dağılımları



Şekil B.4 Ekim-Kasım-Aralık ayı dağılımları

## **ÖZGEÇMİŞ**

Seyit Ahmet AKDAĞ, 1981 yılında Kırşehir’de doğdu. Lise öğrenimini 2000 yılında Kırşehir lisesinde, lisans öğrenimini ise 2005 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği bölümünde tamamladı. Aynı dönem Enerji Enstitüsü, Enerji Bilim ve Teknolojileri, Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Yüksek lisans öğrenimine ve İ.T.Ü. Enerji Enstitüsü Enerji Planlaması ve Yönetimi Anabilim dalında 2005 yılında başladığı Araştırma Görevliliğine halen devam etmektedir.