

**KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BİR BÖLGENİN RÜZGAR VERİLERİ KULLANILARAK RAYLEİGH  
YÖNTEMİ İLE RÜZGAR TÜRBİNİ EKONOMİKLİK ANALİZİ VE  
DENEYSEL UYGULAMASI**

**Muhammed Fatih KÖSTEKÇİ**

**OCAK 2014**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında** Muhammed Fatih KÖSTEKCİ tarafından hazırlanan BİR BÖLGENİN RÜZGAR VERİLERİ KULLANILARAK RAYLEİGH YÖNTEMİ İLE RÜZGAR TÜRBİNİ EKONOMİKLİK ANALİZİ VE DENEYSEL UYGULAMASI adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylım.

Prof. Dr. Ediz POLAT  
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylım.

Doç. Dr. Ertuğrul ÇAM  
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Murat LÜY \_\_\_\_\_

Üye (Danışman) : Doç. Dr. Ertuğrul ÇAM \_\_\_\_\_

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa ÖZDEN \_\_\_\_\_

...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Doç. Dr. Erdem Kamil YILDIRIM  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ÖZET

### BİR BÖLGENİN RÜZGAR VERİLERİ KULLANILARAK RAYLEIGH YÖNTEMİ İLE RÜZGAR TÜRBİNİ EKONOMİKLİK ANALİZİ VE DENEYSEL UYGULAMASI

KÖSTEKÇİ, Muhammed Fatih

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek lisans tezi

Danışman: Doç. Dr. Ertuğrul ÇAM

Ocak 2014, 154 sayfa

Bu çalışmada, rüzgar enerjisi santrali kurulmak istenen bir bölge için Rayleigh istatistiksel yöntemi kullanılarak rüzgar enerjisi potansiyelini, kullanılmak istenen üç farklı türbinin kule yüksekliğindeki olasılık yoğunluk fonksiyonlarını, her bir türbin için yıllık enerji üretimi miktarını, kapasite faktörü ile ekonomiklik analizi hesaplamalarını yapan bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Teknik ve finansal veri girişlerinin görsel bir ekran aracılığıyla yapıldığı, hesaplama sonuçlarının da tablo ve grafik şeklinde alındığı bu program Profilab-Expert 4.0 yazılımı kullanılarak hazırlanmıştır. Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler biriminin 2012/111 numaralı proje kapsamında satın aldığı deney seti ile uygulama da yapılabilen bu program dört aşamalı olarak planlanmıştır. Hazırlanan program ile Muğla ili Datça ilçesi için rüzgar enerjisi potansiyeli, Enercon marka E-48 ve E-53 modeli türbinler için farklı kule yüksekliği ve farklı rotor çapının Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonlarına etkisi, türbinlerin yıllık enerji üretim miktarı, kapasite faktörü ve ekonomiklik analizi hesaplamaları yapılmıştır. Enercon marka türbinler için yapılan hesaplamalar mevcut deney setine ait rüzgar türbini için de yapılmıştır. Deney seti ve hazırlanan program ile farklı kule yüksekliğindeki rüzgar hızları simüle edilerek uygulama yapılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Rayleigh fonksiyonları, Rüzgar enerjisi potansiyeli,

Profilab-Expert 4.0, Kapasite faktörü, Ekonomiklik analizi

## ABSTRACT

### ECONOMIC ANALYSIS OF WIND TURBINE WITH RAYLEIGH METHOD USING WIND DATA OF A REGION AND EXPERIMENTAL APPLICATION

KÖSTEKÇİ, Muhammed Fatih

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Electronics Engineering, M. Sc. Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr.Ertuğrul ÇAM

January 2014, 154 pages

In this study, a computer program has been prepared which is doing calculations of the wind energy potential of a region, probability density functions of three different hub heights of turbines, annual energy production, and cost-effectiveness calculation with capacity factor for each of the turbines by using Rayleigh statistical methods. This program is prepared by using ProfiLab-Expert 4.0 software and it is designed as a program that technical and financial data entry is done through a visual display, also take out the results of calculations in the form of tables and graphs. This program is planned in four stages including a stage that an application can be done with the experiment set that was purchased under the project number of 2012/111 by Scientific Research Projects Unit of Kırıkkale University. The wind energy potential of Datça district of Muğla province, the effect of different hub heights and different rotor diameter of the turbines on Rayleigh probability density functions, annual energy production, capacity factor and cost-effectiveness calculations of Enercon E-48 and E-53 turbines are done by the prepared program. The calculations that was done for Enercon turbines is done for the turbine of the experiment set. A numbered sets of experiments are done by simulating the wind speeds via the prepared program for different turbine heights of the experiment set.

**Key Words:** Rayleigh functions, wind energy potential, Profilab-Expert 4.0,  
Capacity factor, Cost analysis

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam sırasında bilgisini ve desteğini esirgemeyen tez yöneticisi hocam Sayın Doç. Dr. Ertuğrul ÇAM'a teşekkür ederim. Yüksek lisans eğitimim boyunca manevi desteği ve sabrıyla hep yanımda olan sevgili eşim Serap KÖSTEKÇİ'ye, eğitim ve öğretim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen annem Hatice KÖSTEKÇİ, babam Yusuf Bahri KÖSTEKÇİ, kardeşim Nurullah KÖSTEKÇİ'ye ve tez çalışmam sırasındaki desteği ve yardımları için arkadaşım Volkan YILMAZ'a şükranlarımı sunarım.

Bu çalışmada, Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler birimi tarafından 2012/111 numaralı proje kapsamında satın alınan deney seti ile uygulama gerçekleştirilmiştir. Verilen bu destek nedeniyle Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler birimine teşekkürlerimizi sunarız.

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	iii
<b>İÇİNDEKİLER DİZİNİ</b> .....	iv
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	vi
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xii
<b>SİMGELER DİZİNİ</b> .....	xv
<b>KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xvii
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1. Enerji Kaynakları ve Dünyadaki Kullanım Durumuna Bakış.....	2
1.2. Kyoto Protokolü.....	7
1.3. Dünyada Rüzgar Enerjisi Kullanım Durumu.....	9
1.4. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Kullanım Durumu.....	16
1.5. Literatür Taraması.....	20
1.6. Tezin Amacı ve İçeriği.....	22
<b>2. METOT</b> .....	24
2.1. Rüzgar Enerjisi.....	24
2.1.1. Rüzgar Gücü Hesabı.....	25
2.1.2. Sıcaklık ve Yüksekliğin Hava Yoğunluğuna Etkisi.....	27
2.1.3. Yüksekliğin Rüzgar Gücüne Etkisi.....	30
2.1.4. Rüzgardan Elde Edilebilecek Maksimum Güç.....	31
2.2. Rüzgar Verisi Analiz Yöntemleri.....	35
2.2.1. Ortalama Rüzgar Hızı.....	35
2.2.2. Rüzgar Hızı Dağılım Eğrileri.....	37
2.2.2.1. Weibull Dağılımı ve Rayleigh Dağılımı İstatistiksel Modelleri.....	38
2.2.3. Güç ve Enerji Üretimi Hesaplama Yöntemleri.....	42
2.2.3.1. Weibull İstatistiksel Yöntemi.....	42
2.2.3.2. Rayleigh İstatistiksel Yöntemi.....	46

2.3. Rüzgar Rejimine Uygun Türbin Seçim Yöntemleri.....	49
2.3.1. Rüzgar Türbini Güç Eğrisi .....	49
2.3.2. Weibull ve Rayleigh İstatistiksel Yöntemi ile Türbin Güç Eğrilerinin Eşleştirilmesi .....	52
2.3.3. Kapasite Faktörü Yöntemi .....	54
2.4. Rüzgar Enerjisi Santrali Yatırım Maliyeti Analizi.....	56
2.4.1. Sermaye Yatırım Maliyeti .....	58
2.4.2. Değişken Maliyetler .....	60
2.4.3. Kapasite Faktörünün Maliyete Etkisi .....	62
2.4.4. Üretilen Elektrik Enerjisinin Yıllara Yayılmış Maliyeti .....	63
<b>3. UYGULAMA.....</b>	<b>66</b>
3.1. Profilab Expert 4.0 Yazılımı ve Rüzgar Türbini Deney Seti .....	67
3.2. Profilab Expert 4.0 Yazılımı ile Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Analiz ve Uygulama Programı Geliştirilmesi.....	71
3.3. Datça 2010 Yılı Rüzgar Hızı Verilerinin Geliştirilen Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Analiz Programı ile Simülasyonu.....	81
3.4. Datça 2010 Yılı Rüzgar Hızı Verilerinin Geliştirilen Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Uygulama Programı ve Deney Seti ile Simülasyonu .....	115
<b>4. SONUÇLAR .....</b>	<b>135</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>144</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>151</b>
EK 1.....	151
EK 2.....	153
EK 3.....	154

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. 1990 ile 2010 yılları arası dünya birincil enerji arzı ve 2035 yılı .....	4
1.2. Dünya ülkeleri enerji talebi payı [5] .....	6
1.3. 1997 ile 2012 yılları arası dünya rüzgar kümülatif kurulu gücü [13] .....	11
1.4. 1998 ile 2012 yılları arası dünya rüzgar kurulu gücüne eklenen yeni kapasite[13].....	12
1.5. 1998 ile 2012 yılları arası dünya rüzgar kurulu gücü büyüme oranı[13].....	12
1.6. 1980 yılından itibaren rüzgar türbini boyutundaki büyüme oranı [12].....	15
1.7. 2008 yılından itibaren Türkiye rüzgar kurulu gücü büyüme oranı [17].....	18
1.8. 2013 yılı Türkiye rüzgar kurulu gücünün bölgelere göre dağılımı [18] .....	19
2.1. Rüzgar hızı ile rüzgar gücü arasındaki ilişki.....	27
2.2. Yatay eksenli rüzgar türbini[44] .....	31
2.3. Yatay eksenli rüzgar türbini hareketli disk modeli [45].....	32
2.4. Hava basıncı ve hızı modeli [45] .....	34
2.5. Olasılık yoğunluk fonksiyonu [48] .....	37
2.6. Kümülatif olasılık yoğunluk fonksiyonu[48].....	38
2.7. Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonları [49].....	40
2.8. Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu [49].....	41
2.9. Rüzgar türbini rüzgar hızı - güç eğrisi [48].....	50
2.10. Bir rüzgar türbini güç eğrisinin lineer kısmına uydurulmuş eğri [49] .....	55
2.11. 2004 - 2012 yılları arasında rüzgar türbini fiyat değişimi [51].....	57
2.12. Bir rüzgar türbini için ortalama rüzgar hızı – kapasite faktörü [55] .....	62
3.1. Profilab-Expert 4.0 yazılımı ile geliştirilmiş örnek bir program[58].....	68
3.2. Farklı programlara ait ön panel örnekleri[58].....	68
3.3. Deney setine ait rüzgar türbini ve servo motor bağlantısı.....	70
3.4. Deney setine ait DA-AA evirici, AA yük, ölçüm cihazları ve servo motor sürücü bağlantısı .....	70
3.5. Veri girişi ve hava yoğunluğu hesaplaması program bölümü.....	71
3.6. Enerji yoğunluğu ve potansiyelinin hesaplandığı program bölümü .....	72
3.7. Programın ilk bölümüne ait ön panel görüntüsü .....	73



3.8. Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonunun hesaplandığı program bölümü .....	74
3.9. Türbin1 için enerji hesaplamalarının yapıldığı program bölümü .....	74
3.10. Türbin2 için enerji hesaplamalarının yapıldığı program bölümü .....	74
3.11. Türbin3 için enerji hesaplamalarının yapıldığı program bölümü .....	75
3.12. Tablo elemanları için veri girişi program bölümü .....	75
3.13. Programın ikinci bölümüne ait ön panel görüntüsü .....	76
3.14. Her bir rüzgar türbini için ekonomiklik analizi program bölümü.....	77
3.15. Programın üçüncü bölümüne ait ön panel görüntüsü.....	78
3.16. Deney seti ile uygulama yapmak için yazılan program bölümü .....	79
3.17. Programın dördüncü bölümüne ait ön panel görüntüsü .....	80
3.18. Datça ilçesi için aylık ortalama rüzgar hızları grafiği.....	82
3.19. Enercon marka E-48 modeli türbinin güç eğrisi[59].....	83
3.20. Enercon marka E-53 modeli türbinin güç eğrisi[59].....	84
3.21. Datça ilçesinin rüzgar enerjisi potansiyeli ön panel görüntüsü.....	86
3.22. Datça ilçesi rüzgar hızı $V_T(m/s)$ grafiği.....	87
3.23. Datça ilçesi enerji yoğunluğu $E_Y(kW/m^2)$ grafiği.....	87
3.24. Datça ilçesi toplam rüzgar enerjisi miktarı $E_T(kW/m^2/ay)$ grafiği.....	88
3.25. Datça ilçesi en sık görülen rüzgar hızı $V_{Fmaks}(m/s)$ grafiği .....	88
3.26. Datça ilçesi maksimum enerji üretimi sağlayan rüzgar hızı $V_{Emaks}(m/s)$ grafiği.....	89
3.27. Datça ilçesi Rayleigh $c$ ölçü parametresi grafiği .....	89
3.28. Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbini Rayleigh dağılımı fonksiyonları ve enerji üretimi hesaplamaları sonuçlarının ön panel ekranı .....	90
3.29. Ölçüm yüksekliğindeki $V_{ort}$ hızındaki esme süresi(saat) grafiği .....	92
3.30. Ölçüm yüksekliğindeki olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(V_{ort})$ grafiği.....	92
3.31. Ölçüm yüksekliğindeki kümülatif yoğunluk fonksiyonu $F(V_{ort})$ grafiği .....	93
3.32. 50 metre kule yüksekliğindeki $V_{t1}$ hızındaki esme süresi (saat) grafiği .....	93
3.33. Enercon E-48 modeli Türbin1 olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(V_{t1})$ grafiği .....	94
3.34. Enercon E-48 modeli Türbin1 kümülatif yoğunluk fonksiyonu $F(V_{t1})$ grafiği.....	94
3.35. 60 metre kule yüksekliğindeki $V_{t2}$ hızındaki esme süresi (saat) grafiği .....	95
3.36. Enercon E-48 modeli Türbin2 olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(V_{t2})$ grafiği .....	95

3.37. Enercon E-48 modeli Türbin2 kümülatif yoğunluk fonksiyonu $F(V_{t2})$ grafiği.....	96
3.38. 76 metre kule yüksekliğindeki $V_{t3}$ hızındaki esme süresi (saat) grafiği .....	96
3.39. Enercon E-48 modeli Türbin3 olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(V_{t3})$ grafiği .....	97
3.40. Enercon E-48 modeli Türbin3 kümülatif yoğunluk fonksiyonu $F(V_{t3})$ grafiği.....	97
3.41. Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbini kule yüksekliğindeki yıllık rüzgar enerjisi potansiyeli (MWh) grafiği .....	99
3.42. Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbinlerin üretilebileceği yıllık enerji miktarı (MWh) grafiği .....	99
3.43. Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbinleri ortalama türbin verimi (%) grafiği.....	100
3.44. Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbini ekonomiklik analizi sonuçlarının ön panel ekranı .....	100
3.45. Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbinleri yıllık enerji üretim miktarı (kWh) grafiği .....	102
3.46. Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbinleri türbin kapasite faktörleri grafiği.....	102
3.47. Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbinleri yıllık toplam borç ödeme miktarı (ABD doları/yıl) grafiği .....	103
3.48. Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbinleri yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı (ABD doları/kWh) grafiği .....	103
3.49. Enercon E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbini Rayleigh dağılımı fonksiyonları ve enerji üretimi analizi sonuçlarının ön panel ekranı .....	104
3.50. Enercon E-48 modeli rüzgar türbini $V_{t1}$ hızındaki esme süresi (saat) grafiği.	106
3.51. Enercon E-48 modeli rüzgar türbini Türbin1 olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(V_{t1})$ grafiği.....	106
3.52. Enercon E-48 modeli rüzgar türbini Türbin1 kümülatif yoğunluk fonksiyonu $F(V_{t1})$ grafiği.....	107
3.53. Enercon E-53 modeli rüzgar türbini $V_{t2}$ hızındaki esme süresi (saat) grafiği.	108
3.54. Enercon E-53 modeli rüzgar türbini Türbin2 olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(V_{t2})$ grafiği.....	108

3.55. Enercon E-53 modeli rüzgar türbini Türbin2 kümülatif yoğunluk fonksiyonu $F(V_{t2})$ grafiği.....	109
3.56. Enercon E-48 ve E-53 rüzgar türbinleri türbin yüksekliğindeki yıllık rüzgar enerjisi potansiyeli (MWh) grafiği .....	111
3.57. Enercon E-48 ve E-53 rüzgar türbinlerinin üretilbileceği yıllık enerji (MWh) grafiği.....	111
3.58. Enercon E-48 ve E-53 rüzgar türbinleri ortalama türbin verimi (%) grafiği ..	112
3.59. Enercon E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbini ekonomiklik analizi sonuçlarının ön panel ekranı .....	113
3.60. Enercon E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbini yıllık enerji üretim miktarı (kWh) grafiği .....	114
3.61. Enercon E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbini kapasite faktörleri grafiği .....	114
3.62. Enercon E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbini yıllık toplam borç ödeme miktarı (ABD doları/yıl) grafiği .....	115
3.63. Enercon E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbini yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı (ABD doları/kWh) grafiği .....	115
3.64. Deney setine ait rüzgar türbinin güç eğrisi .....	116
3.65. Deney setine ait rüzgar türbini Rayleigh dağılımı fonksiyonları ve enerji üretimi analizi sonuçları ön panel ekranı.....	117
3.66. Deney setine ait rüzgar türbini $V_{t1}$ hızındaki esme süresi (saat) grafiği .....	119
3.67. Deney setine ait rüzgar türbini Türbin1 olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(V_{t1})$ grafiği.....	119
3.68. Deney setine ait rüzgar türbini Türbin1 kümülatif yoğunluk fonksiyonu $F(V_{t1})$ grafiği.....	120
3.69. Deney setine ait rüzgar türbini $V_{t2}$ hızındaki esme süresi (saat) grafiği .....	120
3.70. Deney setine ait rüzgar türbini Türbin2 olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(V_{t2})$ grafiği.....	121
3.71. Deney setine ait rüzgar türbini Türbin2 kümülatif yoğunluk fonksiyonu $F(V_{t2})$ grafiği.....	121
3.72. Deney setine ait rüzgar türbini $V_{t3}$ hızındaki esme süresi (saat) grafiği .....	122
3.73. Deney setine ait rüzgar türbini Türbin3 olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(V_{t3})$ grafiği.....	122

3.74. Deney setine ait rüzgar türbini Türbin3 kümülatif yoğunluk fonksiyonu F(V <sub>13</sub> ) grafiği.....	123
3.75. Deney setine ait rüzgar türbini türbin yüksekliğindeki yıllık rüzgar enerjisi potansiyeli (MWh) grafiği.....	125
3.76. Deney setine ait rüzgar türbini kule yüksekliğinde üretilebileceği yıllık enerji (MWh) grafiği.....	125
3.77. Deney setine ait rüzgar türbini ortalama türbin verimi (%) grafiği .....	126
3.78. Deney setine ait rüzgar türbini ekonomiklik analizi sonuçlarının ön panel ekranı .....	126
3.79. Deney setine ait rüzgar türbini kule yüksekliğindeki yıllık enerji üretim miktarı (kWh) grafiği.....	128
3.80. Deney setine ait rüzgar türbini kule yüksekliğindeki türbin kapasite faktörleri grafiği.....	128
3.81. Deney setine ait rüzgar türbini yıllık toplam borç ödeme miktarı (ABD doları/yıl) grafiği.....	129
3.82. Deney setine ait rüzgar türbini yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı (ABD doları/kWh) grafiği.....	129
3.83. Deney setine ait rüzgar türbini için geliştirilen uygulama programının ön panel ekranı.....	130
3.84. Deney setine ait rüzgar türbini ile yapılan uygulamanın enerji üretim miktarı grafiği .....	134
4.1. Enercon E-48 rüzgar türbini 50, 60 ve 76 metre kule yüksekliklerindeki ve ölçüm yüksekliğindeki Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonları .....	135
4.2. Enercon E-48 rüzgar türbini 50, 60 ve 76 metre kule yüksekliklerinde üretebileceği yıllık enerji miktarı grafiği.....	136
4.3. Enercon E-48 ve E-53 rüzgar türbinleri 60 metre kule yüksekliğindeki Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonları.....	138
4.4. Enercon E-48 ve E-53 rüzgar türbinleri 60 metre kule yüksekliğindeki üretebileceği yıllık enerji miktarı grafiği.....	138
4.5. Deney setine ait rüzgar türbininin 14, 27 ve 37 metre kule yüksekliklerindeki ve ölçüm yüksekliğindeki Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonları .....	140
4.6. Deney setine ait rüzgar türbini 14, 27 ve 37 metre kule yüksekliklerinde üretebilecek yıllık enerji miktarı grafiği.....	141

4.7. Deney setine ait rüzgar türbini farklı kule yükseklikleri için deney sonuçları ve teorik hesaplamada üretebilecek yıllık enerji miktarı grafiği .....	142
---	-----

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. 2002 ile 2012 yılları arası Türkiye elektrik enerjisi talebi [16] .....	17
2.1. Rüzgar hızı ile rüzgar gücü arasındaki ilişki.....	26
2.2. Hava sıcaklığına bağlı düzeltme faktörü [42] .....	28
2.3. Yüksekliğe bağlı düzeltme faktörü [42].....	29
2.4. Yeryüzü yapısına göre $\alpha$ pürüzlülük katsayısı [42,43].....	30
2.5. Rüzgar hızı ve rüzgar gücü arasındaki ilişki .....	36
2.6. Rüzgar türbini rüzgar hızı - güç eğrisi bölgeleri [48] .....	50
2.7. 60 metre rotor kanat çapına sahip 1000kW anma gücündeki bir rüzgar türbinin güç değeri sınıflandırması ve enerji hesaplaması [49].....	53
2.8. 2006 yılında Avrupa’da kurulumu yapılan 2 MW rüzgar santralinin yatırım maliyeti kalemleri [54] .....	59
2.9. 2009 yılında Avrupa’da kurulan orta büyüklükte güce sahip bir rüzgar enerjisi santrali bileşenleri yatırım maliyeti oranları [55] .....	59
2.10. 60 MW gücündeki bir rüzgar enerjisi santraline ait yıllık değişken maliyetlerin rakamsal miktarı ve yüzdesel oranları [49] .....	61
3.1. Datça ilçesi için aylık ortalama rüzgar hızları.....	81
3.2. Enercon marka E-48 modeli türbininin teknik özelliklerinin bir kısmı[59] .....	83
3.3. Enercon marka E-53 modeli türbininin teknik özelliklerinin bir kısmı[59] .....	84
3.4. Datça ilçesinin aylık ve yıllık rüzgar enerjisi potansiyeli .....	86
3.5. Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbini Rayleigh dağılımı fonksiyonlarına ait sonuçlar.....	91
3.6. Enercon E-48 modeli rüzgar türbini enerji üretimi analizine ait sonuçlar .....	98
3.7. Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbini enerji üretimi analizine ait sonuçlar.....	101
3.8. Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbini ekonomiklik analizine ait sonuçlar.....	101
3.9. Enercon E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbini Rayleigh dağılımı fonksiyonlarına ait sonuçlar.....	105

3.10. Enercon marka E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbinleri enerji üretimi analizine ait sonuçlar .....	110
3.11. Enercon E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbini enerji üretimi analizine ait sonuçlar.....	113
3.12. Enercon E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbini ekonomiklik analizine ait sonuçlar.....	113
3.13. Deney setine ait rüzgar türbininin teknik özellikleri.....	116
3.14. Deney setine ait rüzgar türbini Rayleigh dağılımı fonksiyonlarına ait sonuçlar.....	118
3.15. Deney setine ait rüzgar türbini enerji üretimi analizine ait sonuçlar .....	124
3.16. Deney setine ait rüzgar türbini enerji üretimi analizine ait sonuçlar .....	127
3.17. Deney setine ait rüzgar türbini ekonomiklik analizine ait sonuçlar .....	127
3.18. Deney setine ait rüzgar türbini ile yapılan uygulamanın sonuçları (h=14 metre).....	131
3.19. Deney setine ait rüzgar türbini ile yapılan uygulamanın sonuçları (h=27 metre).....	131
3.20. Deney setine ait rüzgar türbini ile yapılan uygulamanın sonuçları (h=37 metre).....	132
3.21. Deney setine ait rüzgar türbini ile yapılan uygulamanın aylık enerji üretim miktarı sonuçları (h=14 metre).....	132
3.22. Deney setine ait rüzgar türbini ile yapılan uygulamanın aylık enerji üretim miktarı sonuçları (h=27 metre).....	133
3.23. Deney setine ait rüzgar türbini ile yapılan uygulamanın aylık enerji üretim miktarı sonuçları (h=37 metre).....	133
3.24. Deney setine ait rüzgar türbini ile yapılan uygulamanın yıllık enerji üretim miktarı sonuçları .....	134
4.1. Enercon E-48 rüzgar türbini 50, 60 ve 76 metre kule yüksekliklerindeki kapasite faktörü ve elektrik maliyet fiyatı sonuçları .....	137
4.2. Enercon E-48 ve E-53 rüzgar türbinleri 60 metre kule yüksekliğindeki kapasite faktörü ve yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı sonuçları.....	139

4.3. Deney setine ait rüzgar türbini 14, 27 ve 37 metre kule yüksekliklerindeki kapasite faktörü ve yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı sonuçları.....	141
--	-----



## SİMGELER DİZİNİ

A	Rüzgarın estiği yüzeyin kesit alanı
c	Ölçü parametresi
$C_p$	Rotor verimi
D	Rotor kanat çapı
$E_k$	Kinetik enerji
$E_{RT}$	Rüzgar türbinin bölgedeki rüzgar rejiminden ürettiği enerji
$E_T$	Toplam enerji miktarı
$E_Y$	Enerji yoğunluğu
$F(v)$	Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu
$f(v)$	Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu
$f_R(v)$	Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu
$F_R(v)$	Rayleigh kümülatif dağılım fonksiyonu
GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt saat
i	Faiz oranı
k	Boyutsuz şekil parametresi
kW	Kilowatt
$K_F$	Rüzgar türbini kapasite faktörü
$K_S$	Sıcaklık düzeltme faktörü
$K_Y$	Yükseklik düzeltme faktörü
kWh	Kilowatt saat
m	Hava kütlesi
MW	Megawatt
MWh	Megawatt saat
n	Borç ödeme süresi
$n_g$	Gaz kütlesi
P	Mutlak basınç
$P_{RG}$	Rüzgar gücü
$P_R$	Rüzgar türbini anma gücü
R	İdeal gaz sabiti

$T_M$	Mutlak Sıcaklık
$T$	Süre
$TWh$	Terawatt saat
$V_{Emaks}$	Maksimum enerji üretimini sağlayan rüzgar hızı
$V_{Fmaks}$	En sık görülen rüzgar hızı
$V_I$	Rüzgar türbininin güç üretmeye başladığı rüzgar hızı
$V_H$	Hacim
$V_m$	Ortalama rüzgar hızı
$V_O$	Rüzgar türbininin güç üretebileceği maksimum rüzgar hızı
$V_R$	Rüzgar türbininin anma güç değerinde güç üretmeye başladığı rüzgar hızı
$v$	Rüzgar hızı
$v_0$	$H_0$ yüksekliğindeki rüzgar hızı
$\propto$	Pürüzlülük katsayısı
$\pi$	Pi Sayısı
$\rho$	Hava yoğunluğu

## KISALTMALAR DİZİNİ

AA	Alternatif Akım
AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
BBM	Banka borç miktarı
BMİDÇS	Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
DA	Doğru Akım
GDY	Öz kaynak geri dönüş yüzdesi
GWEC	Küresel Rüzgar Enerjisi Konseyi
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
OECD	Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü
ÖKM	Öz kaynak miktarı
SGDF	Sermaye geri dönüş faktörü
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
TEP	Ton eşdeğer petrol
USB	Evensel seri veri yolu
WWEA	Dünya Rüzgar Enerjisi Birliği
YBBGM	Banka borcu yıllık geri ödeme miktarı
YBGÖM	Toplam borcun yıllık geri ödeme miktarı
YEK	Yenilenebilir Enerji Kaynakları
YEÜM	Yıllık enerji üretim miktarı
YİBM	Yıllık bakım ve işletme masrafları
YÖKGM	Öz kaynak yıllık geri ödeme miktarı
YYEMF	Yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı

## 1. GİRİŞ

1970’li yılların başında küresel ekonominin ana enerji kaynağı petrol olup, dünya petrol üretiminin %72’sini OECD’nin endüstrileşmiş 24 ülkesi tüketiyordu. O yıllarda enerji politikaları açısından en önemli konu petrolün arz güvenliğinin sağlanmasıydı. Günümüzde ise enerji arz güvenliği sadece petrol ile sınırlı kalmamaktadır. Enerji üretimi veya tüketiminden kaynaklanan sera gazı salınımları ise geçmişten günümüze artarak büyüyen bir sorun haline gelmiştir. Bu sorun enerji politikalarının sera gazı salınımlarını azaltmak şeklinde yeni bir görev edinmesine neden olmuştur. Türkiye’nin de üyesi olduğu uluslararası enerji ajansı sürdürülebilir enerji için enerji politikasını aşağıdaki üç ana başlıkta toplamıştır[1].

- Enerji güvenliği: Petrol, doğalgaz, kömür, nükleer enerji, elektrik ve yenilenebilir enerjileri içeren bütün enerji çeşitlerine güvenilir erişim sağlamak.
- Çevreyi koruma: İklim değişikliğine neden olan sera gazı salınımını(özellikle CO<sub>2</sub>) azaltmaya odaklanarak çevreyi korumak.
- Sürdürülebilir ekonomik kalkınma: Uzun vadeli enerji güvenliğine dayanan ve katkıda bulunan sürdürülebilir ekonomik kalkınmayı sağlamak.

İklim değişikliğine doğrudan etkisi olan karbon gazı salınımının %65’i enerji sektörü tarafından gerçekleştirilmektedir. Sera gazı salınımını azaltarak gelecekteki enerji talebini karşılamak ise enerji üretim yöntemlerinin uzun vadeli dönüşümünü gerektirmektedir. Enerji tüketimini azaltmak, temiz enerji kaynaklarını seçmek ve en uygun enerji teknolojilerini uygulamak bu dönüşümü sağlayacak etkili yöntemlerin başında gelmektedir. Öncelikle enerji verimliliğini artırmak, enerji tüketimini ve karbon salınımını azaltmanın yanı sıra düşük maliyetli, ulaşılabilir ve göreceli olarak uygulanması kolay bir yöntemdir[1].

Gelecekte üyesi olmayı planladığımız Avrupa Birliği, enerji politikalarını enerji arz güvenliğinin sağlanması, sürdürülebilir kalkınma ve çevrenin korunması olarak üç temele dayandırmış ve bu üç temel arasında bir denge kurmayı hedeflemiştir. Enerji

sektörü, Avrupa Birliğindeki sera gazı salınımının %80'ini gerçekleştirmektedir. Avrupa Birliği enerji politikasının önemli bir bileşeni iklim değişikliği ile mücadele olup, birlik 2020 yılına kadar gerçekleştirilmesi gereken üç önemli hedef belirlemiştir; sera gazı salınımlarının %20 azaltılması, enerji verimliliğinin %20 artırılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimindeki payının %20'ye çıkarılması. Avrupa Birliği, iklim değişikliği ile mücadele ve arz güvenliği alanındaki önemi nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları teknolojisi ve sanayisinin gelişmesini sağlamak için yenilenebilir enerji politikası oluşturmuştur[2].

Yenilenebilir enerji kaynakları açısından zengin olan Türkiye'de, yenilenebilir enerji sektörünün gelişmesi ve Avrupa Birliğine uyum için yapılan düzenlemelerle bu kaynakların kullanımı teşvik edilmektedir. Ayrıca 18 Mayıs 2009 tarihli Elektrik Enerjisi Piyasası ve Arz Güvenliği Strateji Belgesinde 2023 yılı için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile ilgili hedefler yer almaktadır. 2023 yılı hedefleri içerisinde yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminin toplam elektrik üretimindeki payının %30 ve rüzgar enerjisi kurulu gücünün 20.000 MW olması yer almaktadır[2].

### **1.1. Enerji Kaynakları ve Dünyadaki Kullanım Durumuna Bakış**

Enerji kaynakları fosil ve yenilenebilir enerji kaynakları olmak üzere iki başlıkta incelenebilir. Fosil enerji kaynakları, fiziksel veya kimyasal yapısında bir değişiklik oluştuğunda enerji açığa çıkaran yakıtlardır. Taş kömürü, petrol, doğalgaz, uranyum, linyit, turba, toryum, asfaltit fosil enerji kaynakları olarak sayılabilir. Fosil enerji kaynaklarının en önemli özelliklerinden bir tanesi depolanabilmeleri ve istenildiği anda enerji üretimi için kullanılabilmesidir. Fosil yakıtların ana maddesini organik karbon oluşturmakta olup, oksijen ile tepkimesi sonucunda enerji açığa çıkmaktadır. Fosil yakıtların yoğun kullanımı başta karbondioksit olmak üzere sera etkisine neden olan gazların salınımına neden olmaktadır. Fosil yakıtların kullanımının bu hızda devam etmesi durumunda gelecek 50 yıl zarfında dünyanın ortalama sıcaklığında 2°C artış olacağı ve bunun iklim değişikliklerine neden olacağı beklenmektedir[3].

Enerji üretim yöntemlerinde değişiklikler yaparak, sera gazı salınımını azaltmak ve küresel ısınmaya bağlı olarak oluşabilecek iklim değişikliklerini önlemek mümkündür. Yenilenebilir enerji kaynakları fosil enerji kaynaklarına kıyasla çevreye olumsuz etkileri daha az olan ve tükenmez enerji kaynakları olarak tanımlanabilir. Güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, hidrolik enerji, jeotermal enerji, dalga enerjisi, biokütle yenilenebilir enerji kaynakları çeşitlerindedir[3].

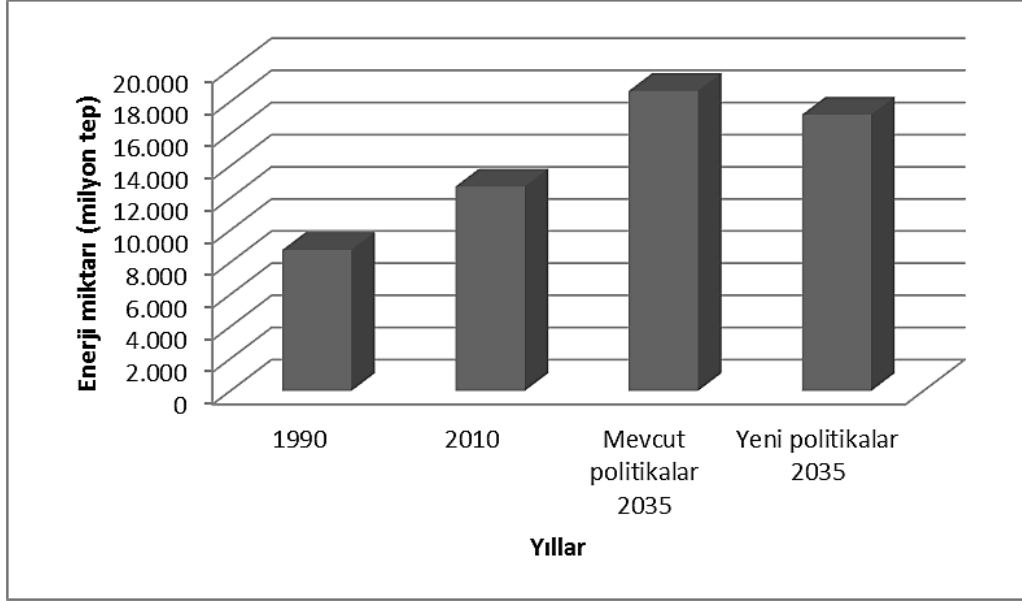
1990 yılında 8.779 milyon tep (ton eşdeğer petrol) olan dünya enerji arzı 2010 yılında 12.730 milyon tep olmuştur. 1990 yılından 2010 yılına kadar geçen 20 yıl süre zarfında enerjiye olan talep %45 artmıştır. Petrol %32, kömür %27, doğalgaz %22 ile 2010 yılındaki toplam enerji arzının %81'ini oluşturmuştur[4].

Enerji kaynaklarının 1990 yılı ile 2010 yılı arasındaki dünyadaki enerji arzı miktarı ve oranları şu şekilde gerçekleşmiştir[4];

- Kömür: Hem oran hem de miktar olarak artış olmuştur. Toplam enerji kaynakları içerisindeki payı %25'den %27'ye yükselmiş olup, miktar olarak 1.243 milyon tep artış gerçekleşmiştir.
- Petrol: Miktar olarak 883 milyon tep artış gerçekleşmiş olup, toplam enerji kaynakları içindeki oranı %37'den %32'ye gerilemiştir.
- Doğalgaz: Miktar olarak 1.072 milyon tep artış gerçekleşmiş olup, toplam enerji kaynakları içerisindeki oranı %19'dan %22'ye çıkmıştır.
- Nükleer: Toplam enerji kaynakları içerisindeki oranı 20 yıllık süreçte %6 olarak sabit kalmış, miktar olarak 193 milyon tep artmıştır.
- Hidrolik: Toplam enerji kaynakları içerisindeki oranı 20 yıllık süreçte %2 olarak sabit kalmış, miktar olarak 111 milyon tep artmıştır.
- Yenilenebilir: Toplam enerji kaynakları içerisindeki oranı %10'dan %11'e yükselmiş, miktar olarak 450 milyon tep artmıştır.

1990 yılından itibaren geçen 20 yıllık süre zarfında dünyadaki enerji kaynaklarının arzındaki değişiklikler dikkat çekicidir. Bu süre zarfındaki değişiklikler gelecekteki talepleri karşılamak için çeşitli senaryolar yapılmasını zorunlu hale getirmiştir. Mevcut kaynakların azalması, iklim değişikliği, enerji verimliliği ve teknolojideki

gelişmeler doğrultusunda gelecekteki enerji arzı güvenliğinin sağlanması için senaryolar geliştirilmektedir. Şekil 1.1’de görüldüğü üzere uluslararası enerji ajansının mevcut politikalar senaryosuna göre dünya enerji arzının 2035 yılında 2010 yılına göre %47 artarak 18.676 milyon tep, yeni politikalar senaryosuna göre ise %35 artarak 17.197 milyon tep olarak gerçekleşmesi beklenmektedir[4].



**Şekil 1.1.** 1990 ile 2010 yılları arası dünya birincil enerji arzı ve 2035 yılı için senaryolar [4]

Enerji kaynaklarının mevcut ve yeni politikalar senaryolarına göre 2035 yılında dünyadaki enerji arzı miktarı ve oranlarının şu şekilde gerçekleşmesi beklenmektedir[4];

- Kömür: Toplam enerji kaynakları içerisindeki oranının mevcut politikalar senaryosuna göre %30, yeni politikalar senaryosuna göre %25 olması beklenmektedir. Her iki senaryoda da miktar olarak artış olması tahmin edilmektedir.

- Petrol: Her iki senaryoya göre toplam enerji kaynakları içerisindeki oranının %27'ye gerilemesi beklenmekte olup, miktar olarak artış olacağı tahmin edilmektedir.
- Doğalgaz: Miktar ve oran olarak her iki senaryoya göre artış olması beklenmekte olup, toplam enerji kaynakları içerisindeki payının %24'ler civarında olacağı tahmin edilmektedir.
- Nükleer: Toplam enerji kaynakları içerisindeki oranının mevcut politikalar senaryosuna göre düşerek %5 olacağı, yeni politikalar senaryosuna göre artarak %7 olacağı tahmin edilmektedir.
- Hidrolik: Her iki senaryoya göre toplam enerji kaynakları içerisindeki oranın %3'ler seviyesinde olacağı beklenmektedir.
- Yenilenebilir: Toplam enerji kaynakları içerisindeki oranının mevcut politikalar senaryosuna göre artarak %12 olacağı, yeni politikalar senaryosuna göre de artarak %15 olacağı tahmin edilmektedir.

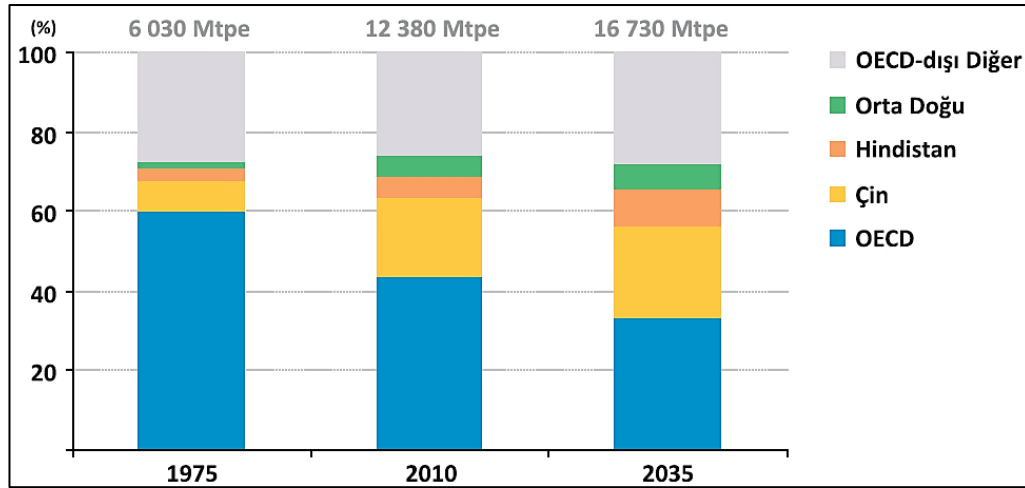
Enerji kaynaklarının 1990 yılı ile 2011 yılı arasındaki Türkiye'deki enerji arzı miktarı 53 milyon tep'den 114 milyon tep seviyesine çıkarak %115 oranında bir artış gerçekleşmiştir. Enerji kaynaklarının 1990 yılı ile 2011 yılı arasındaki Türkiye'deki enerji arzı miktarı ve oranları şu şekilde gerçekleşmiştir[4];

- Kömür: Toplam enerji kaynakları içerisindeki oranı %30'dan %29'a gerilemiş olsa da, miktar olarak 17.378 bin tep artış gerçekleşmiştir.
- Petrol: Toplam enerji kaynakları içerisindeki oranı %45'den %27'ye gerilemiş olsa da, miktar olarak 6.598 bin tep artış gerçekleşmiştir.
- Doğalgaz: Toplam enerji kaynakları içerisindeki oranı %6'dan %32'ye ve miktar olarak 33.799 bin tep artış gerçekleşmiştir.
- Hidrolik: Geçen 20 yıl süresince toplam enerji kaynakları içerisindeki oranı %4 olarak sabit kalmış olup, miktar olarak 2510 bin tep artmıştır.
- Odun, çöp, hayvan atığı vb: Toplam enerji kaynakları içerisindeki oranı %14'den %3'ye gerilemiş olup, miktar olarak 3.671 bin tep azalma gerçekleşmiştir.



- Yenilenebilir: Toplam enerji kaynakları içerisindeki oranı %1'den %3'e yükselmiş olup, miktar olarak 2.635 bin tep artmıştır. Ancak dünya ortalamasının gerisinde kalmıştır.

Yeni politikalar senaryosuna göre dünyadaki enerji talebi ve CO<sub>2</sub> salınımı 2035 yılında 2011 yılına göre daha da artmaktadır. Bu senaryoya göre 2035 yılında enerji talebinin üçte bir oranında, CO<sub>2</sub> salınımının ise %16 oranında artması beklenmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretimin hızla artmasına rağmen fosil yakıtlar ana enerji kaynağı olarak yerini korumaktadır. 2035 yılında petrol, doğalgaz ve kömür kullanımının miktar olarak artması beklenirken, toplam enerji kaynakları içerisindeki oranının %81'den %75'e gerilemesi beklenmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları teknolojisindeki gelişime paralel olarak ve teşviklerin devamı durumunda 2035 yılında toplam enerji kaynaklarındaki oranın %31 olacağı tahmin edilmektedir. 2035 yılındaki yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminin OECD ülkelerinde %47, OECD dışı ülkelerde %25 oranındaki kısmının rüzgar santrallerinden elde edileceği tahmin edilmektedir[5].



**Şekil 1.2.** Dünya ülkeleri enerji talebi payı [5]

Yenilenebilir enerji yatırımları için 2012 ile 2035 yılları arasında 6,4 trilyon ABD doları harcanacağı tahmin edilmektedir. Bu yatırım miktarından 2,1 trilyon ABD doları rüzgar için, 1,5 trilyon ABD doları hidrolik için, 1,3 trilyon ABD doları güneş

için, 1,5 trilyon ABD dolarının biyoyakıt için harcanacağı beklenmektedir. OECD ülkelerinde yatırım miktarının %48'ini rüzgar ve güneş enerjisi, OECD dışı ülkelerde ise yatırım miktarının büyük bir kısmının hidrolik ve rüzgar enerjisi yatırımları için harcanması beklenmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının gelişiminde özellikle enerji sektöründe devlet politikalarının önemi büyüktür. Yenilenebilir enerji alanında devlet teşvikleri 2010-2011 yılında %24 artarak 88 milyar ABD doları olarak gerçekleşmiştir. Yeni politikalar senaryosundaki 2035 hedeflerine ulaşabilmek için devlet teşviklerinin her yıl 240 milyar ABD doları artması gerekmektedir[6].

2010 ile 2020 yılları arasında yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminin her yıl %5,2 oranında artacağı beklenmektedir. Yeni politikalar senaryosuna göre 2010 ile 2035 arasında yenilenebilir enerji kaynaklarından küresel elektrik üretiminin 2,7 kat artacağı tahmin edilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminin 2011 yılındaki 1.465 GW olan dünya çapındaki kurulu kapasitesinin 2035 yılında 3.770 GW olacağı tahmin edilmektedir. Elektrik üretiminde maliyet açısından en çok rekabetçi olan rüzgar enerjisinin büyümesini hızla sürdüreceği beklenmektedir. 2035 yılında dünya çapındaki rüzgar gücünün yaklaşık 1.100 GW olacağı tahmin edilmektedir. Bu gücün %80'inin karadaki rüzgar santrallerinden, %20'sinin denizdeki rüzgar santrallerinden sağlanacağı öngörülmektedir. Küresel çapta rüzgar enerjisinden elektrik üretiminin 2010 yılındaki 342 TWh değerinden 2035 yılında 2.680 TWh değerine yükseleceği tahmin edilmektedir[6].

## **1.2. Kyoto Protokolü**

Kyoto Protokolü, iklim değişikliğinin önlenmesi amacıyla 1997 yılında Japonya'da yapılan konferansta Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) kapsamında kabul edilmiş ve bağlayıcı bir belge olarak ülkelerin imzasına açılmıştır. Kyoto Protokolünün amacı sanayileşmiş ülkelerin sera gazı salınım değerlerini 2012 yılına kadar 1990 yılındaki seviyeye düşürmelerini sağlamaktır. Dünyadaki sera gazı salınımının %55'inden sorumlu ve protokolde Ek-1 ülkeleri olarak tanımlanan sanayileşmiş ülkeler dahil toplam 55 ülkenin bu protokolü imzalaması ile protokol yürürlüğe girmiştir. Rusya Federasyonu 2004 yılında

protokolü imzalayan 55. ülke olmuş ve 16 Şubat 2005 yılında Kyoto Protokolü resmen devreye girmiştir. Protokolde ülkelerin sorumlulukları şu şekilde belirlenmiştir[7];

Ek-1 ülkeleri: OECD, Avrupa Birliği (AB) ve AB Pazar ekonomisine geçiş sürecindeki ülkelerdir. Bu ülkeler protokol kapsamında sera gazı salınımlarını azaltmakla sorumludurlar. Türkiye Ek-1 ülkeleri kapsamında yer almış olup, özel şartlı ülke statüsündedir[7].

ABD	Çek Cumhuriyeti	İrlanda	Litvanya	Slovenya
Almanya	Danimarka	İspanya	Lüksemburg	Slovakya
Avrupa Birliği	Estonya	İsveç	Kanada	Ukrayna
Avustralya	Finlandiya	İsviçre	Norveç	Y.Zelanda
Avusturya	Fransa	İtalya	Polonya	Yunanistan
Belçika	Hollanda	İzlanda	Portekiz	Türkiye
Beyaz Rusya	Hırvatistan	Japonya	Romanya	Liechtenstein
Bulgaristan	İngiltere	Letonya	Rusya Fed.	Monako

Ek-2 ülkeleri: Sera gazı salınımı azaltılması için gerekli olan teknolojiyi ve mali desteği sağlamak ile sorumludurlar[7].

ABD	Belçika	İngiltere	İtalya	Norveç
Almanya	Danimarka	İrlanda	İzlanda	Portekiz
Avrupa Birliği	Finlandiya	İspanya	Japonya	Y.Zelanda
Avustralya	Fransa	İsveç	Lüksemburg	Yunanistan
Avusturya	Hollanda	İsviçre	Kanada	

Ek-1 dışı ülkeler: Bu ülkelerin sera gazı salınımlarının azaltılması ile ilgili herhangi bir sorumlulukları bulunmamaktadır. Bu ülkeler Çin, Hindistan, Meksika ve Brezilya'dır. Kyoto Protokolü kapsamında salınımı kontrol altında tutulması ve azaltılması gereken sera gazları şunlardır[7];

- Diazot Monoksit (N<sub>2</sub>O)
- Hidroflorokarbonlar (HFCs)
- Karbon dioksit (CO<sub>2</sub>)
- Kükürt hekzaflorid (SF<sub>6</sub>)
- Metan (CH<sub>4</sub>)
- Perflorokarbonlar (PFCs)

Türkiye, 2009 yılında özel şartlı Ek-1 üyesi olarak Kyoto Protokolü'ne taraf olmuştur. Sera gazı salınımının azaltılması ve sınırlanması kapsamında 2008 ile 2012 yılları arasında Türkiye'nin herhangi bir sorumluluğu bulunmamaktadır[8].

### 1.3. Dünyada Rüzgar Enerjisi Kullanım Durumu

İkinci dünya savaşından sonra 1970'li yıllardaki petrol fiyatlarındaki artış rüzgar türbinlerinden enerji üretiminin dünya çapında ilgi görmesini sağlamıştır. İklim değişikliği, hava kalitesi sorunları ve enerji arz güvenliği ile endişeler karbon salınımı yapmayan ve daha sürdürülebilir olan yenilenebilir enerji kaynaklarını tekrar ön plana çıkartmıştır. Bunun bir sonucu olarak geçtiğimiz on yıl içerisinde dünyadaki rüzgar enerjisi kurulu gücü hızla artmıştır. 2009 ve 2010 yıllarında rüzgar enerjisi kurulu gücü bu zamana kadar olan artış miktarının en büyük değerini görmüştür. Rüzgar türbinleri, yatırım maliyetlerinin daha ekonomik hale gelmesi, her yere ve hızlı bir şekilde kurulabilmeleri nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde ön plana çıkmıştır[9].

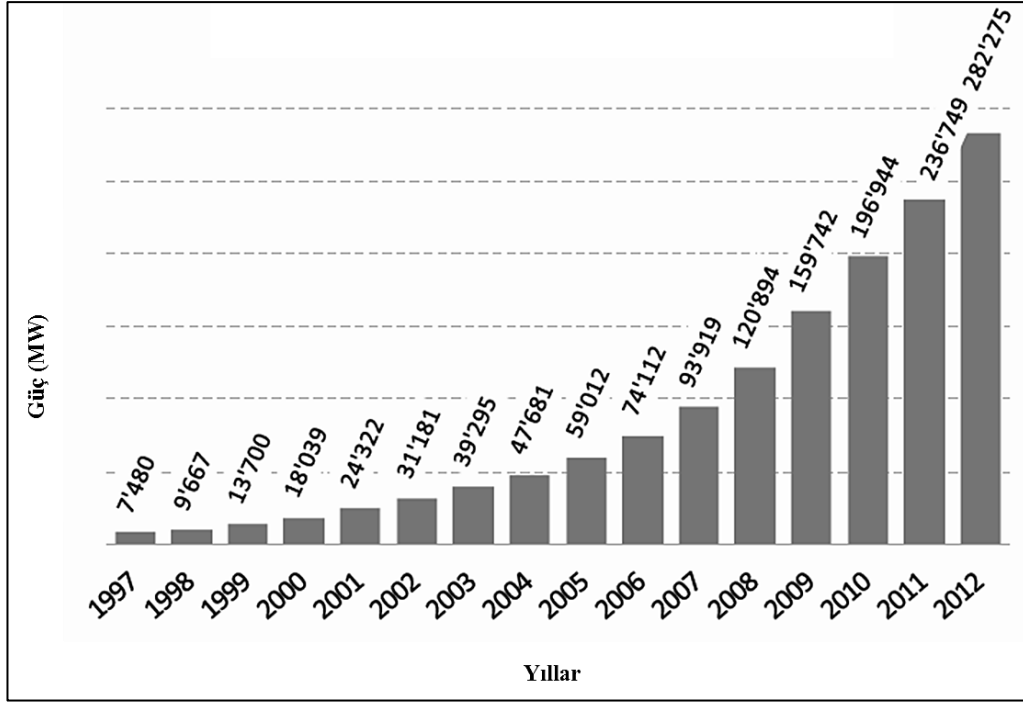
2001 yılında dünyadaki rüzgar kurulu gücü 24 GW iken on yıl içerisindeki yatırımların hızla artmasıyla 2010 yılında bu değer 197 GW olmuştur. 2007 yılına kadar rüzgar kurulu gücünde en büyük büyümeyi gerçekleştiren Avrupa dünya rüzgar kurulu gücünün yaklaşık %45'ine sahiptir. Asya 2010 yılında rüzgar kurulu gücüne eklediği kapasitelerle Avrupa'yı geçmiştir. 2009 yılında Avrupa Birliği ülkeleri toplam elektrik üretiminin %4,5'luk kısmını rüzgar enerjisinden elde ederek, bu konuda dünyanın öncü ülkeleri olmuştur. Aynı yıl ABD'nin rüzgar enerjisinden elektrik üretimi toplam elektrik üretimi içerisinde %1,9, Çin'de ise %0,7 seviyesindeydi[9]. Günümüzde dünya çapında 70'den fazla ülkede 140.000'den fazla rüzgar türbini ile elektrik enerjisi üretilmektedir. Avrupa, Asya, Amerika, Avustralya

ve Afrika'daki rüzgar çiftliklerinde değişik hava koşullarında, çölde, en yüksek rakımda ve denizde elektrik üretimi yapılmaktadır[10].

Rüzgar enerjisi sera gazı salınımına neden olmamakla beraber enerji dengesini sağlama konusunda çok iyi bir kaynaktır. Uluslararası Enerji Ajansının tahminlerine göre karbondioksit salınımını azaltması bakımından rüzgar enerjisinden elektrik üretimi ortalama 600g/kWh'a denk gelmektedir. Kyoto protokolüne göre endüstrileşmiş ülkeler sera gazı salınımını azaltmak konusunda anlaşmışlardır. 2008 yılında dünya çapındaki rüzgar enerjisinden elektrik üretimi sayesinde 157 milyon ton daha az CO<sub>2</sub> salınımı yapılmıştır. 2012 yılında ise rüzgar enerjisinden elektrik üretiminin 580 TWh olmuş ve böylece 408 milyon ton daha az CO<sub>2</sub> salınımı yapılmıştır[10]. Küresel Rüzgar Enerjisi Konseyinin (GWEC) geliştirilmiş senaryosuna göre 2020 yılında dünyadaki rüzgar kurulu gücünün 1.000 GW seviyesine ulaşması ile yıllık 1,6 milyon ton daha az CO<sub>2</sub> salınımının yapılacağı tahmin edilmektedir. İlimli senaryosuna göre ise 2020 yılında dünyadaki rüzgar kurulu gücünün 750 GW seviyesine ulaşması ile yıllık 1 milyon ton daha az CO<sub>2</sub> salınımının yapılacağı ön görülmektedir[11].

Dünyada rüzgar enerjisi kurulu gücü 2000 yılından beri her yıl kümülatif olarak %24 büyümektedir. Küresel olarak dağınık yapıya bağlı olarak değişen kapasite ve üretim miktarı ile 2012 yılında rüzgar enerjisinden elektrik üretimi dünya genel elektrik üretiminin %2,6'sı olarak gerçekleşmiştir[12].

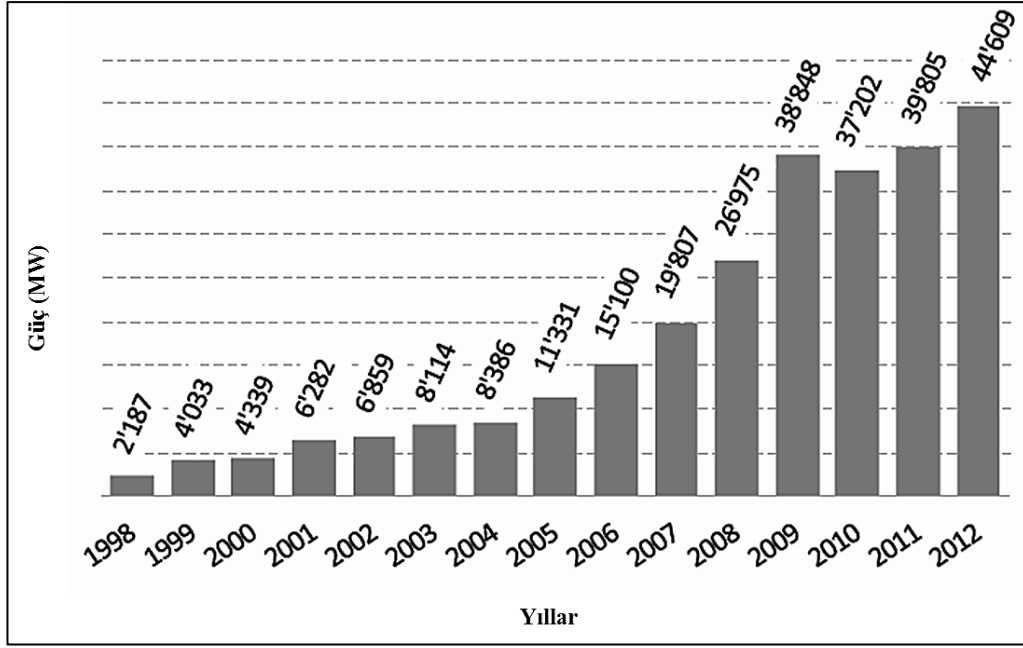
2011 ile 2012 yılları arasında dünyadaki rüzgar kurulu gücü 44.609 MW artmıştır. Böylece 2012 yılı sonu itibariyle dünyadaki rüzgar kurulu gücü 282.275 MW olarak gerçekleşmiş ve büyüme oranı %19,2 olmuştur. Dünya genelindeki rüzgar türbinleri yıllık olarak küresel elektrik ihtiyacının 580 TWh'lik kısmını sağlamaktadır. Rüzgar türbini sektörü 2011 yılında 50 milyar Euro ve 2012 yılında 60 milyar Euro seviyesinde bir ciroya sahip bir pazar haline gelmiştir. İzlanda rüzgar enerjisinden elektrik üreten yüzüncü ülke olmuştur. Çin ve ABD 2012 yılında toplam 13.000 MW güce sahip yeni rüzgar santralini devreye almıştır[13].



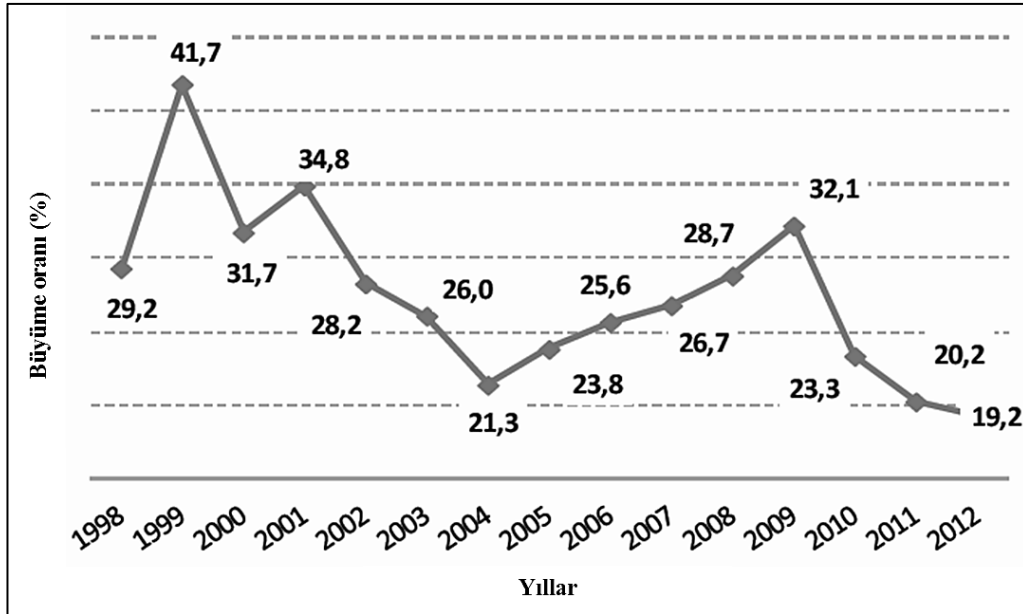
**Şekil 1.3.** 1997 ile 2012 yılları arası dünya rüzgar kümülatif kurulu gücü [13]

Rüzgar enerjisi güvenilir ve uygun fiyatlı olması nedeniyle birçok ülkede tartışmasız olarak ana enerji kaynağı haline gelmeye başlamıştır. Dünyadaki rüzgar kurulu gücü her yıl artarak 2009 yılında 159.749 MW, 2010 yılında 196.944 MW, 2011 yılında 236.749 MW ve 2012 yılında 282.275 MW olmuştur. 2011 yılı ile 2012 yılı arasındaki rüzgar kurulu gücü yatırımındaki 44.609 MW'lık artış tüm zamanların en yüksek değeri olarak kaydedilmiştir[13].

Dünyadaki rüzgar kurulu gücü yatırımındaki 2012 yılı miktarı tüm zamanların rekor seviyesine ulaşmış olsa da yatırım miktarındaki yavaşlama göze çarpmaktadır. Pazarın gelişmesindeki canlılığın iyi bir göstergesi ortalama büyüme oranıdır. 1998 ile 2008 arasındaki 10 yıllık süreçte rüzgar kurulu gücündeki ortalama büyüme oranı %30 olmuştur. Rüzgar kurulu gücündeki büyüme oranı son üç yıldır her yıl gerileyerek 2010 yılında %23,3, 2011 yılında %20,2, 2012 yılında %19,2 olmuştur[13].



Şekil 1.4. 1998 ile 2012 yılları arası dünya rüzgar kurulu gücüne eklenen yeni kapasite[13]



Şekil 1.5. 1998 ile 2012 yılları arası dünya rüzgar kurulu gücü büyüme oranı[13]

Doğu Avrupa ve Latin Amerika, son üç yıldır rüzgar kurulu gücü büyüme oranı açısından en hızlı gelişen bölgelerdir. 2012 yılında rüzgar kurulu gücü büyüme oranı olarak Doğu Avrupa ülkelerinden Estonya ve Finlandiya %46, Polonya %54, Ukrayna %82, ve Romanya %131 ile dünya rüzgar kurulu gücü ortalama büyüme oranının üzerinde bir büyüme gerçekleştirmiştir. 2012 yılında rüzgar kurulu gücü büyüme oranı olarak Latin Amerika ülkelerinden Meksika %45, Nikaragua %62, Brezilya %75, Arjantin %75 büyüyerek ortalama %56 büyüme gerçekleştirmiştir. Geçmişteki büyüme oranları ile karşılaştırıldığında 2012 yılındaki büyüme oranları düşük kalmaktadır. 2012 yılında dünyada rüzgar kurulu gücü en düşük büyüme oranına %7 ile Afrika ülkeleri sahiptir. 2012 yılında sadece Tunus ve Etiyopya yeni rüzgar türbini kurmuştur[13].

Rüzgar endüstrisi yıllardır Çin, ABD, Almanya, İspanya ve Hindistan'ın oluşturduğu öncü beş büyük ülke tarafından yönetilmiştir. Bu ülkeler son yirmi yıldır dünya rüzgar kurulu gücünün %73'lük payına sahip olmuştur. Bununla birlikte on büyük ülke dünya rüzgar kurulu gücünün 2011 yılında %87, 2012 yılında %86 payına sahiptir. Bu ülkeler arasındaki Çin ve ABD her biri 2012 yılı dünya rüzgar kurulu gücünün %29'lük payına sahiptir[13].

İspanya'nın rüzgar kurulu gücü 2012 yılında 1.100 MW artarken, Hindistan ve Almanya 2.400 MW'lık artış miktarı ile güçlü bir gelişme göstermiştir. Türkiye, Fransa, İsveç, Polonya, Romanya, Kanada, Brezilya, İspanya, İtalya, Birleşik Krallık, Almanya ve Hindistan'ın da aralarında bulunduğu 12 ülke 2012 yılında 0,5 MW ile 2,5 MW türbin kullanılan ülkelerdir. Pakistan, Yunanistan, Hollanda, Porto Rico, Ukrayna, İrlanda, Portekiz, Norveç, Bulgaristan, Danimarka, Avusturya, Belçika, Avustralya ve Meksika'dan oluşan 14 ülke 2012 yılında 0,1 MW ile 0,5 MW arasında orta büyüklükteki türbin kullanılan ülkelerdir[13].

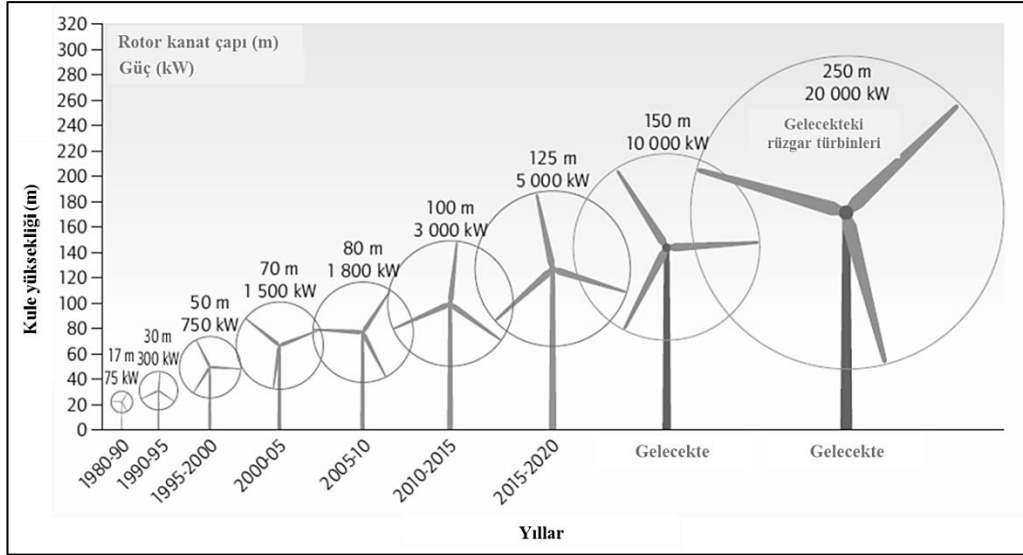
Geçmiş yıllardaki kararsız büyüme oranına sahip deniz tipi rüzgar türbini kurulu gücü 2011 yılında %14, 2012 yılında ise %54'lük büyüme oranları ile hız kazanmaya başlamıştır. 2010 yılında 1.162 MW, 2011 yılında 397 MW, 2012 yılında 1.903 MW yeni kapasite eklenmesi ile 2012 yılı sonunda deniz tipi rüzgar kurulu gücü 5.416 MW'a ulaşmıştır. 2012 yılı itibariyle dünyada deniz tipi rüzgar türbinine sahip 13 ülke bulunmaktadır[13].



Orta vadede dünyadaki deniz tipi rüzgar kurulu gücünün 2017 yılında 26.000 MW'a ulaşması beklenmektedir. Bu sürede toplam kümülatif büyüme kapasitesinin üçte ikisini Avrupa'nın gerçekleştirmesi beklenmektedir. Geriye kalan kümülatif büyüme kapasitesinin yaklaşık %27'sini Çin, diğer kapasiteyi ise Kore, Japonya ve ABD tarafından kurulacağı tahmin edilmektedir. Birleşik Krallık 2017 yılında 7.400 MW deniz tipi rüzgar kurulu gücüne ulaşmayı hedeflemektedir. Çin ise 2017 yılında 7.000 MW deniz tipi rüzgar kurulu gücüne ulaşarak dünyada ikinci büyük oyuncu olmayı planlamaktadır[14].

Rüzgar türbin teknolojisinin gelişimindeki trend kule yüksekliğini ve kanat çapını artırarak güç kapasitesini artırmak yönünde olmuştur. Kontrol teknolojilerindeki, kanat malzemesi ve tasarımındaki gelişmeler rüzgar türbinlerinin mevcut veya eski teknoloji türbinlere göre kapasitelerinin artmasını sağlamıştır. 2008 yılından beri redüktörsüz türbinlerin kullanım oranı %12'den %20'ye çıkmıştır. 2012 yılı itibariyle 127 metre rotor kanat çapına sahip 7,5 MW gücünde rüzgar türbinleri mevcuttur. Ancak halen en çok kullanılan rüzgar türbinleri 1,5 MW ile 2,5 MW arasındaki güce sahip türbinlerdir. Mevcut rüzgar türbinleri 3 m/s veya 4 m/s rüzgar hızında elektrik üretmeye başlayıp, 25 m/s rüzgar hızına kadar elektrik üretebilmektedir[12].

Geniş süpürme alanına sahip ve kule yüksekliği artırılmış gelişmiş türbinler daha fazla ve düşük maliyetli enerji üretimi sağlamaktadır. Araştırma ve geliştirme bölümlerinin gelecekteki hedefi 10 MW ile 20 MW arasında güce sahip rüzgar türbinleri üretmek olup, bu yeni teknolojiler üretilen enerjinin maliyetinin düşmesine yardımcı olacaktır. Türbin, temeller, şebeke bağlantısı, altyapı ve kurulumu içeren rüzgar türbini yatırım maliyeti 1,45 ABD doları/W ile 2,60 ABD doları/W aralığında değişmektedir. Bu yatırım maliyetleri Çin'de 1,10 ABD doları/W seviyesine düştüğü gibi, ABD'de 1,60 ABD doları/W ve Batı Avrupa'da 1,70 ABD doları/W seviyesinde de olabilmektedir. Deniz tipi rüzgar türbinleri içinse yatırım maliyetleri 2012 yılı için 3,60 ABD doları/W ile 5,60 ABD doları/W arasında değişmektedir. Planlı ve plansız bakım, yedek parça, sigorta, yönetim, arazi kirası gibi bileşenlerden oluşan işletme ve bakım maliyetleri rüzgar türbini maliyetinin %15 ile %25 arasındaki önemli bir kısmını oluşturmaktadır[12].



**Şekil 1.6.** 1980 yılından itibaren rüzgar türbini boyutundaki büyüme oranı [12]

2013'ün ilk altı aylık döneminde dünyadaki rüzgar kurulu gücüne 13.980 MW eklenerek küresel rüzgar kurulu gücü Haziran 2013 sonu itibariyle 296.255 MW olmuştur. 2011 ve 2012 yılının ilk altı ayındaki artışla kıyaslandığında 2013 yılının ilk yarısındaki rüzgar gücündeki artış miktarı düşük kalmıştır. Bununla birlikte 2013 yılının ilk yarısı itibariyle dünyada kurulu rüzgar gücünden üretilen elektrik enerjisi dünya toplam elektrik talebinin %3,5'ünü karşılamaktadır. 2013 yılı sonunda küresel rüzgar kurulu gücünün 2012'ye oranla %12 artarak 318.000 MW seviyesine ulaşacağı tahmin edilmektedir. Çin, ABD, Hindistan, Almanya ve İspanya küresel rüzgar kurulu gücündeki toplam %73'lük payıyla halen lider konumdadır. 2013 yılının ilk yarısında rüzgar kurulu gücüne Çin 5.500 MW, Büyük Krallık 1.300 MW, Hindistan 1.200 MW, Almanya 1.100 MW eklemiştir. 2013 yılının ilk altı ayında rüzgar kurulu gücü oranında en büyük büyümeyi %34,4 ile bir Afrika ülkesi olan Fas gerçekleştirmiştir. Fas'ı %21,6 ile Romanya, %18,4 ile Avustralya ve %16,2 ile Birleşik Krallık takip etmektedir[15].

Küresel rüzgar kurulu gücünü artırmak için ulusal ve uluslararası alanda politikaların artmasına ihtiyaç duyulmakla beraber gerçekleştirilmek için arzu duyulan birçok yatırımın olduğu gözlenmektedir. Gelecekte rüzgar kurulu gücünü sürdürülebilir bir

büyüme ile gerçekleştirebilecek olan ülkelerin başta Çin ve Hindistan ile beraber Avrupa ve Kuzey Amerika ülkeleri olması beklenmektedir. Rüzgar kurulu gücünü yüksek büyüme oranları ile artırması beklenen ülkelerin Latin Amerika, Asya ve Doğu Avrupa olacağı tahmin edilmektedir. Dünya Rüzgar Enerjisi Birliği(WWEA) küresel rüzgar kurulu gücünün 2016 yılında 500.000 MW, 2020 yılında ise 1.000.000 MW olacağını tahmin etmektedir[13]. Uluslararası Enerji Ajansı(IEA) ikinci derece senaryosuna göre dünya rüzgar kurulu gücünün 2030 yılında 1.400.000 MW, 2050 yılında ise 2.300.000 MW olmasını beklemektedir. 2050 yılındaki küresel rüzgar kurulu gücünün toplam elektrik talebinin %15'ini karşılaması beklenmektedir. 2020 yılında rüzgar kurulu gücünde Çin'in OECD'ye üye Avrupa ülkelerinin toplam üretimini geçerek lider olacağı, ABD'nin ise üçüncü büyük üretici olacağı tahmin edilmektedir[12].

Uluslararası Enerji Ajansı(IEA) senaryolarına göre 2050 yılında rüzgardan elektrik enerjisi üretiminde Çin 1.600 TWh ile 2.300 TWh arasındaki üretim ile lider olacaktır. OECD'ye üye Avrupa ülkeleri 1.300 TWh ile 1.400 TWh arasındaki üretim ile ikinci sırada yer alacaktır. ABD ise 1.000 TWh ile 1.200 TWh arasındaki üretim ile üçüncü sırada yer alacaktır. Dünyada rüzgar enerjisi ile elektrik üretiminin artması ile beraber 2050 yılındaki CO<sub>2</sub> gazı salınımindaki azalma 3.000 Mt/yıl ile 4.000 Mt/yıl arasında olacağı tahmin edilmektedir. 2050 yılındaki CO<sub>2</sub> gazı salınımdaki azalmaya 1.000 Mt/yıl ile en çok Çin'in katkıda bulunacağı, 472 Mt/yıl ile ABD ve 342 Mt/yıl ile gelişmekte olan Asya ve Doğu Avrupa ülkelerinin ABD'yi takip edeceği tahmin edilmektedir[12].

#### **1.4. Türkiye'de Rüzgar Enerjisi Kullanım Durumu**

Türkiye'nin elektrik enerjisi talebi 2002 yılında 132,5 milyar kWh iken 2010 yılına geldiğimizde bu talep %162 oranında artarak 210,4 milyar kWh olmuştur. 2011 yılındaki talep 2010 yılına göre %9,4 artarak 230,3 milyar kWh olmuştur. Çizelge 1.1'de görüleceği üzere Türkiye'nin 2002-2012 yılları arasındaki 11 yıllık dönemde enerji talebi sürekli artmış ve yıllık ortalama enerji ihtiyacı %5,4 olarak gerçekleşmiştir[16].

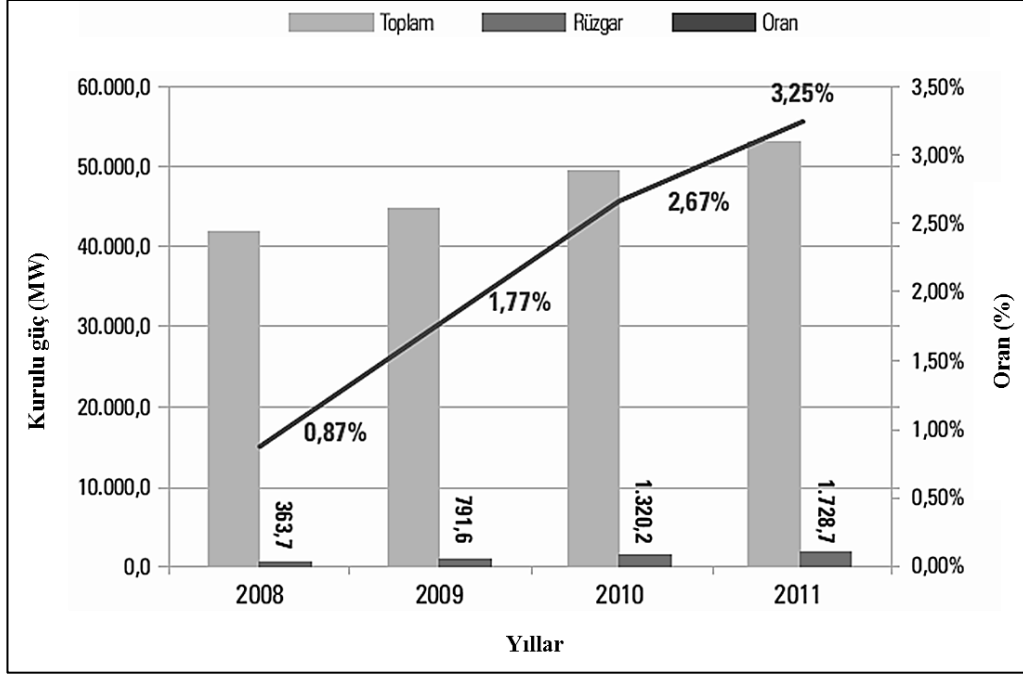
**Çizelge 1.1.** 2002 ile 2012 yılları arası Türkiye elektrik enerjisi talebi [16]

Yıl	Puant Güç Talebi (MW)	Artış (%)	Enerji Talebi (GWh)	Artış (%)
2002	21.006	7,1	132.553	4,5
2003	21.729	3,4	141.151	6,5
2004	23.485	8,1	150.018	6,3
2005	25.174	7,2	160.794	7,2
2006	27.594	9,6	174.637	8,6
2007	29.249	6,0	190.000	8,8
2008	30.517	4,3	198.085	4,3
2009	29.870	-2,1	194.079	-2,0
2010	33.392	11,8	210.434	8,4
2011	36.122	8,2	230.306	9,4
2012	38.000	5,2	244.026	6,0

TEİAŞ'ın 2012 ile 2021 yılları arasındaki Üretim Kapasite Projeksiyon çalışması kapsamında enerji talebi artışı için iki senaryo belirlenmiştir. Yıllık ortalama %6,5 enerji artış oranı ile düşük enerji talebi senaryosu ve yıllık ortalama %7,5 enerji artış oranı ile yüksek enerji talebi senaryosu şeklinde tahmin çalışması yapılmıştır. Bu çalışmaya göre Türkiye'nin 2021 yılındaki enerji talebinin, yüksek enerji talebi senaryosuna göre 467,2 milyar kWh, düşük enerji talebi senaryosuna göre 424,7 milyar kWh olarak gerçekleşmesi beklenmektedir. Her iki senaryoya göre, 2021 yılındaki enerji talebinin 2011 yılına göre %184 ile %202 arasında artması beklenmektedir[16].

Türkiye'nin 2008 yılında toplam enerji arzındaki yenilenebilir enerji kaynaklarının payı %9,5 iken, 2009 yılında toplam elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının oranı %19,6 olarak gerçekleşmiştir. 2011 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarından 57,6 TWh elektrik üretimi yapılmış olup, bu enerjinin %90,5'i hidroelektrik %8,3'ü ise rüzgar enerjisi kaynaklarından yapılmıştır. Türkiye'nin 2002

yılında yok denilebilecek düzeyde olan rüzgar kurulu gücü yapılan yatırımlar ile 2012 yılı sonunda 2.140 MW'a ulaşmıştır[17].

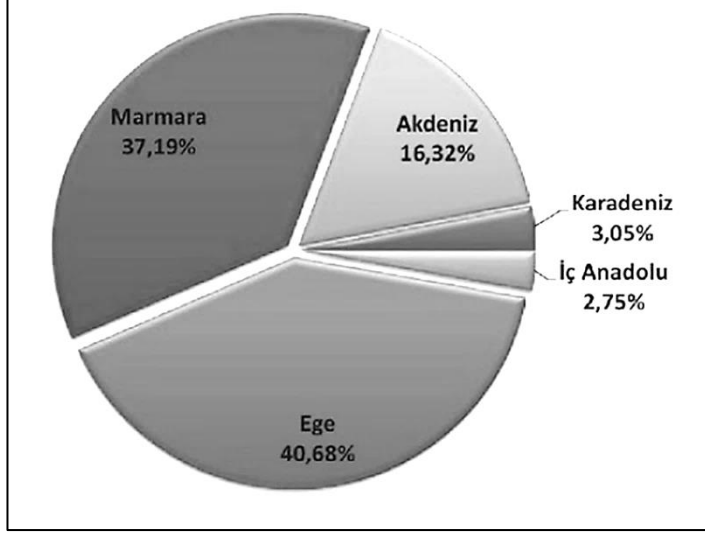


**Şekil 1.7.** 2008 yılından itibaren Türkiye rüzgar kurulu gücü büyüme oranı [17]

2013 yılı ilk yarısı itibariyle Türkiye'nin rüzgar kurulu gücü 2.619 MW'a ulaşmıştır. Bu kurulu güce ulaşılmasında yer alan en büyük beş firmadan Demirer Enerji 304 MW rüzgar kurulu gücü ile ilk sırada yer alan yatırımcıdır. Demirer Enerji'yi 295 MW rüzgar kurulu gücü ile Bilgin Enerji, 237 MW ile Polat Enerji, 211 MW ile Enerjisa, 187 MW ile Aksa Enerji takip etmektedir.

Türkiye rüzgar kurulu gücünün en büyük kısmı Şekil 1.8'de görüldüğü gibi %40,68'lik oranla Ege Bölgesinde yer almaktadır. Ege Bölgesini %37,19 ile Marmara Bölgesi, %16,32 ile Akdeniz Bölgesi, %3,05 ile Karadeniz Bölgesi, %2,75 ile İç Anadolu Bölgesi takip etmektedir. 2013 ilk yarısında Türkiye'nin rüzgar kurulu gücü Ege Bölgesinde 1065 MW, Marmara Bölgesinde 974 MW, Akdeniz Bölgesinde

427 MW, Karadeniz Bölgesinde 80 MW, İç Anadolu Bölgesinde 72 MW olarak gerçekleşmiştir[18].



**Şekil 1.8.** 2013 yılı Türkiye rüzgar kurulu gücünün bölgelere göre dağılımı [18]

Türkiye, 18 Mayıs 2009 tarihli Elektrik Enerjisi Piyasası ve Arz Güvenliği Strateji Belgesinde 2023 yılı için yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminin toplam elektrik üretimindeki payının %30 ve rüzgar enerjisi kurulu gücünün 20.000 MW olmasını hedeflemiştir[2].

2005 yılında çıkarılan 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun ile yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin desteklenmesi amacıyla üretilen elektrik enerjisinin tarifelendirilmesi ABD doları cent/kWh olarak belirlenmiş ve kanun ile güvence altına alınmıştır. 31 Aralık 2020 tarihine kadar işletmeye girecek santraller üretime başladıkları tarihten itibaren 10 yıl süreyle bu kanun kapsamındaki destek sisteminden faydalanabilecektir. 2013 yılı itibariyle rüzgar enerjisinden üretilen elektrik enerjisi tarife ücreti 7,3 ABD doları cent/kWh olup, santral aşamasında kullanılan malzemelerin yerli olması durumunda bu tarifiye ek destekler verilmektedir[17].

## 1.5. Literatür Taraması

Lun ve Lam açık denizde, şehir içinde ve şehir içinde açık bir alanda olmak üzere 3 farklı bölge için 1968 ile 1997 yılları arasındaki ortalama rüzgar hızlarını kullanarak Weibull yoğunluk fonksiyonunu hesaplamıştır. Elde ettikleri sonuçları karşılaştırmış ve açık alanlardaki Weibull dağılımının daha iyi olduğu sonucuna ulaşmışlardır[19]. Çelik küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin enerji üretim tahminini hesaplamak için dünyanın 5 farklı noktasından alınmış 96 aylık rüzgar verilerini Weibull yöntemini kullanarak hesaplamış ve gerçek veriler ile tahmini arasında %2,79 hata oranı olduğunu görmüştür[20]. Akdağ ve Güler Çanakkale bölgesinin rüzgar enerjisi potansiyelinin analizini 2001 ile 2006 yılları arasındaki rüzgar verileri ve Weibull dağılımı kullanılarak yapmıştır. Weibull parametrelerinin hesaplanmasında grafik, moment ve maksimum olasılık yöntemlerini kullanmış, moment yönteminin daha iyi sonuçlar verdiğini belirlemiştir[21]. Hindistan'ın Karnata bölgesindeki üç farklı rüzgar çiftliği istasyonundan alınan rüzgar verileri ile Weibull dağılımı kullanılarak yapılan simülasyonda enerji üretimi için en iyi rüzgar enerjisi potansiyeline sahip bölge belirlenmiştir[22].

Akdağ ve Dinler çalışmalarında Weibull dağılım parametrelerinin tahmin edilmesi için güç yoğunluğu adlı yeni bir yöntem kullanmış ve ortalama rüzgar hızı verisinin bilinmesi durumunda Weibull parametrelerinin tahmin edilmesini bu yöntemin kolaylaştırdığını saptamışlardır[23]. Chang moment, ampirik, grafik, maksimum olasılık, modifiye maksimum olasılık ve enerji desen faktörü yöntemi olmak üzere altı farklı sayısal yöntem kullanarak Weibull parametrelerinin tahmini yapmış ve bu yöntemlerin performansını Monte-Carlo simülasyonu ile analiz etmiştir[24]. Bagiorgas ve arkadaşları Suudi Arabistan da 20, 30 ve 40 metre yükseklikteki 7 farklı rüzgar istasyonundan aldıkları rüzgar verileri ile beş farklı yöntem kullanarak Weibull parametrelerini hesaplamışlar ve k şekil parametresinin yükseklikten bağımsız, c ölçü parametresinin ise yüksekliğe bağlı olarak değiştiğini bulmuşlardır[25]. Akdağ ve Güler 335kW ile 1.000kW arasında değişen 6 farklı rüzgar türbininin üreteceği enerji miktarını belirlemek için Weibull dağılım modeli ile 7 farklı güç eğrisi modeli kullanmış ve sadece bir modelin her durum için en yüksek enerji miktarını vereceği sonucuna ulaşmıştır[26].

Akpınar ve Akpınar Elazığ'da dört farklı bölgedeki rüzgar enerjisi karakteristiği belirlemek için 1998 ile 2003 yılları arasındaki rüzgar verilerini Weibull ve Rayleigh dağılımlarını kullanarak karşılaştırma yapmışlardır. Farklı güçteki 6 rüzgar türbini için kapasite faktörü ve enerji üretimi tahminini Weibull yoğunluk fonksiyonunu kullanarak hesaplamışlar ve en iyi bölgenin Maden olduğuna karar vermişlerdir[27]. Manisa ilinin rüzgar karakteristiği ve rüzgar enerjisi potansiyelinin bulunması için 2000 ile 2006 yılları arasındaki rüzgar verileri Weibull ve Rayleigh olasılık fonksiyonları kullanılarak rüzgar hızı dağılım eğrilerinin bulunması için kullanılmıştır. Altı farklı türbin tipi için kapasite faktörü ve yıllık enerji üretim miktarı hesaplanmış ve bölgenin kapasite faktörünün 25 ile 34 arasında olduğu bulunmuştur[28].

Wang ve Yeh rüzgar türbinlerinin beş farklı kule yüksekliğindeki ve rüzgar hızındaki kapasite faktörü, ortalama güç ve elektrik enerjisi maliyetini bulmak için Weibull dağılımını kullanmışlardır. Doğru rüzgar türbini ve yer seçimi için Weibull şekil ve ölçü parametresinin önemli olduğu ve ölçü parametresinin elektrik enerjisi maliyetini etkilediği sonucuna ulaşmışlardır[29]. Çanakkale bölgesinin belirlenen Weibull parametreleri kullanılarak 4 farklı türbin ve 6 farklı kule yüksekliği için kapasite faktörü ve ekonomik analiz hesaplaması yapılmıştır[30]. Genç çalışmasında Pınarbaşı ve Sinop bölgesi için rüzgar enerjisi potansiyeli ve karakteristiği ile yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyeti yöntemi ile farklı türbinler için elektrik enerjisi birim maliyetini hesaplamış ve her iki bölgenin de rüzgar enerjisi santral yatırımı için uygun olduğu sonucuna ulaşmıştır[31]. Çelik ve Kolhe Weibull fonksiyon parametrelerini giriş olarak kullanıp yıllık rüzgar hızı yoğunluk dağılımını yapay sinir ağları yöntemini kullanarak hesaplamışlar ve enerji üretimi miktarını yapay sinir ağları yönteminin daha doğru tahmin ettiği sonucuna ulaşmışlardır[32]. Ohunakin ve arkadaşları küçük, orta ve büyük güçteki altı adet rüzgar türbini için elektrik üretimi ve ekonomiklik analizini Nijerya'da altı farklı bölgede yapmışlardır. Yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyetini ve bugünkü net değer yöntemini kullanarak üretilen elektrik enerjisi maliyetini hesaplamışlar ve ayrıca seçicilik analizini yapmışlardır[33].



Danimarka'daki yarı pürüzlü yüzey şekline sahip bir rüzgar çiftliği sahasının doğru ve hassas güç tahmini ve en uygun yer seçimi hesaplamaları için Navier-Stokes denklemlerini kullanan bir bilgisayar simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon kullanılarak rüzgar çiftliği sahasının yerleşiminin tekrar tasarlanması sonucunda güç üretiminde %10 artış olacağı hesaplanmıştır[34]. Benbouzid ve arkadaşları öğrencilerin yenilenebilir enerji kaynakları alanına ilgisini artırmak için Matlab/Simulink programında rüzgar türbini prototip geliştirme yazılımı hazırlamışlar ve sonrasında bu programı kullanarak rüzgar enerjisi sistem modelini gerçekleştirmişlerdir[35]. Bayındır ve arkadaşları rüzgar türbininin değişik analizlerini yapmak için Matlab/GUI ile ara yüz programı hazırlamıştır. Rüzgar türbini analizi yapacak kullanıcıların parametreleri bu ara yüz ile daha kolay girmelerini ve sonuçlara daha hızlı ulaşılmasını hedeflemişlerdir[36]. Kennedy büyük ölçekli rüzgar gücünden elektrik üretiminin sosyal faydalarını tahmin etmek için yeni bir yöntem kullanmış ve sonuçları gaz kombine çevrim santrali ile karşılaştırarak rüzgar enerjisine gelecekte yatırım yapmanın sosyal faydasını göstererek planlayıcıların dikkatini çekmek istemiştir[37].

## **1.6. Tezin Amacı ve İçeriği**

Türkiye'nin her geçen gün büyüyen ekonomisi ve artan enerji ihtiyacına paralel olarak enerji üretimi de artmaktadır. Kyoto protokolüne taraf olan ülkelerden birisi olan Türkiye sera gazı salınımlarını azaltmak için, 2005 yılında 5346 sayılı "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun" ile teşvik sistemini yürürlüğe koymuştur. 31 Aralık 2020 tarihine kadar işletmeye girecek olan yenilenebilir enerji kaynaklarından üretim yapacak tesislerin Yenilenebilir Enerji Kaynakları (YEK) Destekleme Mekanizmasından yararlanabileceğini açıklamıştır. Ayrıca 2009 yılında kabul edilen Elektrik Piyasası ve Arz Güvenliği Strateji Belgesi ile Türkiye 2023 yılında 20.000 MW rüzgar enerjisi kurulu gücüne ulaşmayı hedef olarak koymuştur. Türkiye'nin Temmuz 2013 tarihi itibarıyla rüzgar enerjisi santralleri toplam kurulu gücünün 2.619 MW olduğu göz önünde bulundurulduğunda rüzgar enerjisinden elektrik üretiminin güncelliğini önümüzdeki yıllarda da korumaya devam edeceği görülmektedir.

Bu çalışmada, rüzgar enerjisi santrali kurulmak istenen bir bölgenin Rayleigh istatistiksel yöntemi kullanılarak rüzgar enerjisi potansiyeli, kullanılmak istenen üç farklı türbin ve/veya kule yüksekliğindeki olasılık yoğunluk fonksiyonları, her bir türbin için yıllık enerji üretimi miktarı ve kapasite faktörü ile ekonomiklik analizi hesaplamalarını yapan bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Bu program dört aşamalı olarak planlanmış ve Profilab-Expert 4.0 yazılımı kullanılarak hazırlanmıştır. Geliştirilen bu program ile rüzgar enerjisi analizi için teknik ve finansal giriş parametrelerinin görsel bir ekran aracılığıyla kolay bir şekilde programa girilebilmesi, hesaplama sonuçlarının tablo ve grafik olarak alınabilmesi ve mevcut deney seti ile de uygulama yapılabilmesi amaçlanmıştır.

Profilab-Expert 4.0 yazılımında geliştirilen program ile önce Muğla ili Datça ilçesi için rüzgar enerjisi potansiyeli, Enercon marka türbinler için farklı kule yüksekliği ve farklı rotor çapının Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonlarına etkisi, türbinlerin yıllık enerji üretim miktarı, kapasite faktörü ve ekonomiklik hesaplamaları yapılmıştır. Teorik analiz sonrasında Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler biriminin 2012/111 numaralı proje kapsamında satın aldığı deney seti ve hazırlanan program ile farklı kule yüksekliğindeki rüzgar hızları simüle edilerek uygulama yapılmıştır.

Hazırlanan program ile yapılan analiz çalışmalarında Enercon marka E-48 ve E-53 modeli türbinin teknik verileri, deney setine ait türbinin teknik verileri ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) Muğla ili Datça ilçesi 2010 yılı günlük ortalama rüzgar hızı verileri kullanılmıştır. Hazırlanan bu rüzgar enerjisi analiz programı kullanıcıların teorikte öğrendiği bilgilerin simülasyonunu yaparak pekiştirebileceği eğitim amaçlı bir araç olarak da kullanılabilir.

## 2. METOT

### 2.1. Rüzgar Enerjisi

Dünyayı yeryüzü seviyesinden itibaren 11 km kalınlıkta saran hava tabakası troposfer olarak adlandırılır. Rüzgar, troposfer olarak adlandırılan hava tabakasının ısınması ve soğuması nedeniyle oluşan sıcaklık ve basınç farkından dolayı yer değiştirmesiyle oluşur. Diğer bir deyişle rüzgar, yüksek basınç bölgesinden alçak basınç bölgesine doğru hareket eden hava akımıdır[38]. Dünyanın enerji kaynağı güneş olup, saatte 100 milyar MW enerji dünyaya ulaşmaktadır. Bu enerjinin yaklaşık %2'si rüzgar enerjisine dönüşmektedir. Dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesi kuzey ve güney yarımkürede farklı kuvvetlerin oluşmasına neden olmaktadır. Güney ve kuzey yarımkürede oluşan ve farklı yönlerdeki bükme kuvvetine ise Coriolis Kuvveti adı verilmiştir. Coriolis kuvvetlerinin en etkili olduğu yer dünyanın 30° enlem kuşağıdır. Dünyanın ekvator kuşağı sıcak havanın en çok bulunduğu yer olup, sıcak hava ekvator kuşağından troposferin yüksek katmanlarına doğru hareket eder. Coriolis kuvvetleri yüksek katmanlara doğru hareket eden havayı yüzeye doğru bastırarak yüksek basınç oluşmasına neden olur. Böylece güney ve kuzey yarımkürelerden ekvatora doğru bir hava akımı oluşur. Basınç farkları havanın hızını belirlerken, Coriolis kuvvetleri ise hava hareketlerinin yönünü belirler[39].

Yeryüzünden 100 metre yüksekliğe kadar olan hava katmanı troposfere göre farklı kuvvetlerin etkisi altında olup, bu katmanda oluşan rüzgarlara yüzey rüzgarları adı verilir. Yüzey rüzgarlarının yönü troposfer rüzgar yönüne göre ters olup, rüzgar enerjisinin kaynağını oluşturur[39]. Gündüz karalar denizlere göre daha hızlı ısınır ve denizden karalara doğru meltem rüzgarı eser. Geceleri ise karalar denizlere göre daha hızlı soğur ve karadan denize doğru meltem rüzgarı eser. Karadan ve denizden esen meltem rüzgarlarının etkisi sahilden 40 km uzaktaki karasal alan üzerinde etkili olur. Rüzgarları sürekli ve süreksiz şeklinde sınıflandırmak mümkündür. Bir yıl boyunca esen rüzgarlar sürekli rüzgarlar olarak tanımlanabilir. Hortum, tornado, fırtına, tayfun gibi belli zamanlarda esen rüzgarlar ise süreksiz rüzgarlar olarak tanımlanabilir[40].

Rüzgar, gemilerin yözdürülmesinden yel değirmenleri aracılığıyla tahılların öğütülmesi, suyun pompalanması gibi amaçlar için 3000 yıldır kullanılmakta olan başlıca enerji kaynaklarından birisidir. Yatay eksenli yel değirmenleri ilk olarak 13. yüzyılda kullanılmaya başlanmıştır. Elektrik üretimi için rüzgar türbinlerin ilk kullanımı 19. yüzyıl sonlarına doğru ABD’de Brush tarafından üretilen 12 kW güce sahip doğru akım elektrik üreten rüzgar türbinleri ile başlamıştır. 1941 yılında ise 1250 kW gücünde 53 metre rotor kanat çapına sahip Smith-Putnam rüzgar türbini ABD’de yapılmıştır. 1973 yılındaki petrol krizi ile beraber rüzgar türbini araştırmaları hükümetlerce desteklenmeye başlamış ve bunun sonucunda 1987 yılında 2,5 MW gücünde 97,5 metre rotor kanat çapına sahip prototip rüzgar türbinleri üretilmiştir[41]. Sera gazı salınımlarının azaltılması yönündeki kararlar rüzgar türbinlerine olan talebi ve araştırma çalışmalarını artırarak günümüz modern rüzgar türbinlerinin gelişmesi sağlanmıştır[41].

### 2.1.1. Rüzgar Gücü Hesabı

Rüzgar enerjisi,  $m$  kütlesine sahip bir hava akımının  $v$  hızı ile hareket etmesi sonucu oluşan kinetik enerji olarak tanımlanır. Bu kinetik enerji şu şekilde ifade edilir[42,43];

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \text{ [joule]} \quad (2.1)$$

$m$  kütlesine sahip hava akımının oluşturduğu güç birim zamandaki kinetik enerji akışı olacaktır. Bu durumda  $A$  alanından  $v$  hızı ile geçen hava akımının kütlesi[42,43];

$$m = \rho Av \quad (2.2)$$

olarak tanımlanır. Burada  $\rho$  hava yoğunluğudur.  $m$  hava kütlesi değerinin kinetik enerji formülünde kullanılması ile birim zamanda hareket eden hava kütlesinin güç ifadesi ‘watt’ cinsinden şu şekilde elde edilir[42,43];

$$P_{RG} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.3)$$

Burada;

$P_{RG}$ : Rüzgar gücü (watt)

$\rho$ : Hava yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ )

$A$ : Rüzgarın estiği yüzeyin kesit alanı ( $\text{m}^2$ )

$v$ : Rüzgar hızı (m/s)

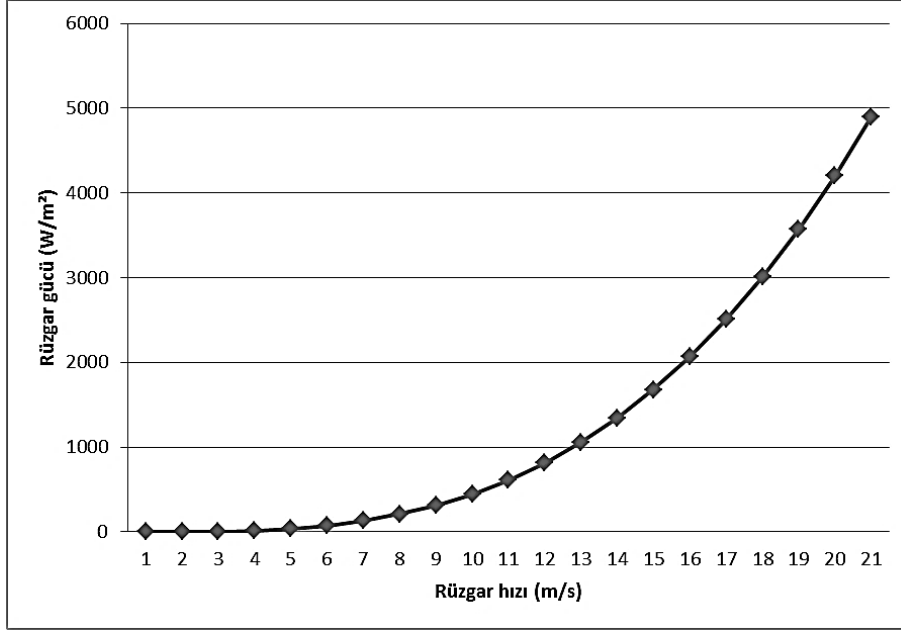
Yatay eksenli bir rüzgar türbini için kesit alanı,  $D$  rotor kanat çapı olmak üzere;

$$A = (\pi/4)D^2 \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilir. Çizelge 2.1’de ve Şekil 2.1’ de rüzgar hızı ile kesit alan arasındaki güç ilişkisi görülmektedir. Buradaki kesit alan başına güç değeri güç yoğunluğu olarak adlandırılır ve birimi  $\text{watt/m}^2$  dir[43].

**Çizelge 2.1.** Rüzgar hızı ile rüzgar gücü arasındaki ilişki

Rüzgar Hızı (m/s)	Rüzgar Gücü (W/m <sup>2</sup> )		Rüzgar Hızı (m/s)	Rüzgar Gücü (W/m <sup>2</sup> )
0	0		11	815
1	1		12	1058
2	5		13	1346
3	17		14	1681
4	39		15	2067
5	77		16	2509
6	132		17	3009
7	210		18	3572
8	314		19	4201
9	447		20	4900
10	613			



**Şekil 2.1.** Rüzgar hızı ile rüzgar gücü arasındaki ilişki

### 2.1.2. Sıcaklık ve Yüksekliğin Hava Yoğunluğuna Etkisi

Rüzgar verileri belirtilirken hava yoğunluğunun  $1,225 \text{ kg/m}^3$  olduğu varsayılır. Bu varsayım havanın sıcaklığının  $15^\circ\text{C}$  ve 1 atm basınç altında olduğuna dayanır. Diğer hava koşulları için hava yoğunluğu ideal gaz kanunu kullanarak belirlenir[42,43].

$$PV_H = n_g RT_M \quad (2.5)$$

Burada;

$P$ : Mutlak basınç (atm)

$V_H$ : Hacim ( $\text{m}^3$ )

$n_g$ : Gaz kütlesi (mol)

$R$ : İdeal gaz sabiti ( $8,2056 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{atm} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ )

$T_M$ : Mutlak Sıcaklık (K)

Eğer gazın moleküler ağırlığına  $MA$  denilirse hava yoğunluğunu şöyle yazılır;

$$\rho \left( \frac{kg}{m^3} \right) = \frac{n_g(mol).MA \left( \frac{g}{mol} \right).10^{-3} \left( \frac{kg}{g} \right)}{V_H(m^3)} \quad (2.6)$$

$n$  değerini yukarıdaki 2.5 denkleminde çekip, 2.6 denkleminde yerine konulursa;

$$\rho = \frac{P.MA.10^{-3}}{RT_M} \quad (2.7)$$

hava yoğunluğu denklemi elde edilir. Çizelge 2.2 de farklı hava sıcaklıkları için hava yoğunluğu ve sıcaklık değişim oranı değerleri görülmektedir[42].

**Çizelge 2.2.** Hava sıcaklığına bağlı düzeltme faktörü [42]

Sıcaklık (°C)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Sıcaklık Düzeltme Faktörü (K <sub>S</sub> )
-15	1,368	1,12
-10	1,342	1,10
-5	1,317	1,07
0	1,293	1,05
5	1,269	1,04
10	1,247	1,02
15	1,225	1,00
20	1,204	0,98
25	1,184	0,97
30	1,165	0,95
35	1,146	0,94
40	1,127	0,92

Hava yoğunluğunu sıcaklık değişimi kadar etkileyen bir başka etken de atmosferik basıncıdır. Hava basıncı yüksekliğin bir fonksiyonu olması nedeniyle deniz seviyesinden yukarı çıktıkça hava yoğunluğu için bir düzeltme faktörü kullanmak gerekir[42,43];

$$P = P_0 e^{-1,185 \times 10^{-4} H} = 1 \text{ (atm)}. e^{-1,185 \times 10^{-4} H} \quad (2.8)$$

1 atm'nin referans basıncı  $P_0$  ve  $H$  metre biriminden olmak üzere 2.8 denklemi elde edilir. Çizelge 2.3 de 15°C hava sıcaklığı için hava basıncı ve basınç değişim oranı değerleri görülmektedir[42].

**Çizelge 2.3.** Yüksekliğe bağlı düzeltme faktörü [42]

Yükseklik (m)	Basınç (atm)	Yükseklik Düzeltme Faktörü ( $K_Y$ )
0	1	1
200	0,977	0,977
400	0,954	0,954
600	0,931	0,931
800	0,910	0,910
1000	0,888	0,888
1200	0,868	0,868
1400	0,847	0,847
1600	0,827	0,827
1800	0,808	0,808
2000	0,789	0,789
2200	0,771	0,771

Sıcaklık ve basınç değişim oranı çizelgeleri kullanılarak farklı hava sıcaklığı ve farklı yüksekliklerdeki hava yoğunluğu değeri aşağıdaki şekilde basit bir yöntem ile hesaplanabilir[42,43];

$$\rho = 1,225 K_S K_Y \quad (2.9)$$

2.9 denklemindeki  $K_S$  Çizelge 2.2 de yer alan sıcaklık düzeltme faktörü ve  $K_Y$  Çizelge 2.3 de belirtilen yükseklik düzeltme faktörüdür.



### 2.1.3. Yüksekliğin Rüzgar Gücüne Etkisi

Troposferin yeryüzünden 100 metre yüksekliğe kadar olan ilk katmanındaki rüzgar hızı yeryüzü şekillerinden etkilenir. Yükseklik arttıkça rüzgar hızları da artmakta ve rüzgar gücü de yüksekliğe ve yeryüzü şekillerine bağlı olarak değişmektedir. Yükseklik ve yeryüzü şekillerinin rüzgar hızına etkisi aşağıdaki denklem ile ifade edilir[42,43];

$$\left(\frac{v}{v_0}\right) = \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha \quad (2.10)$$

Burada;

$v$ :  $H$  yüksekliğindeki rüzgar hızı

$v_0$ :  $H_0$  yüksekliğindeki rüzgar hızı

$\alpha$ : pürüzlülük katsayısı

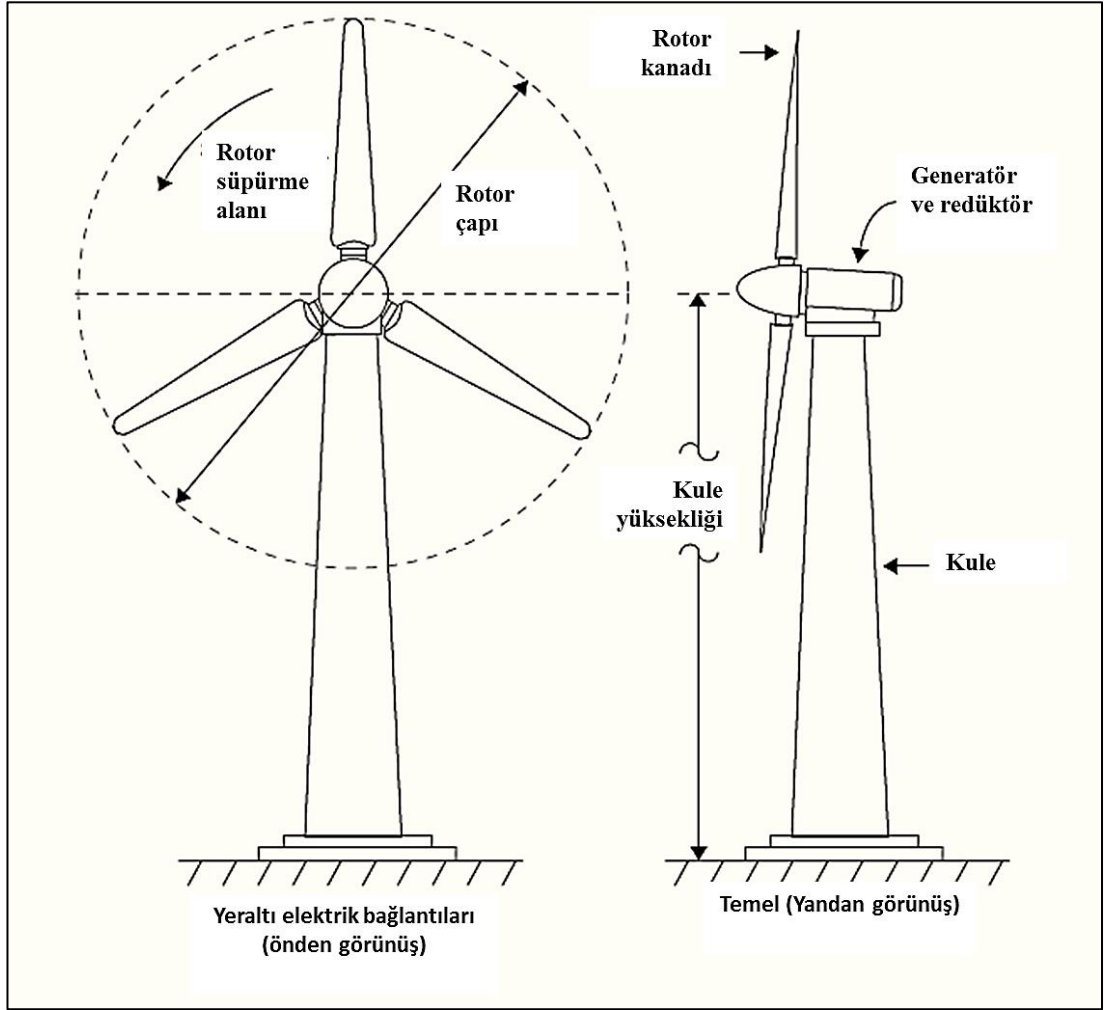
$\alpha$  pürüzlülük katsayısı rüzgarın estiği yerdeki yeryüzü yapısının sınıflandırılmış bir fonksiyonudur. Çizelge 2.4'de yeryüzü yapısına göre  $\alpha$  pürüzlülük katsayısı görülmektedir[42,43].

**Çizelge 2.4.** Yeryüzü yapısına göre  $\alpha$  pürüzlülük katsayısı [42,43]

Yeryüzü Yapısı	Pürüzlülük katsayısı ( $\alpha$ )
Pürüzsüz sert toprak, durgun su	0,10
Toprak seviyesinde uzun çimli bölge	0,15
Toprak seviyesinin üzerinde uzun mahsul	0,20
Kırsal orman alanları, birçok ağaç	0,25
Ağaçlıklı kasabalar	0,30
Uzun binalarla dolu büyük şehirler	0,40

#### 2.1.4. Rüzgardan Elde Edilebilecek Maksimum Güç

Günümüzde rüzgar türbinleri kontrol teknolojisine bağlı olarak otomatik çalışır hale gelmiştir. Türbin üzerindeki bir anemometre ile okunan rüzgar hızı kontrol sistemi tarafından takip edilir. Rüzgar hızı türbinin devreye alma hızına ulaştığında kontrol sistemi mekanik kilitleri kaldırarak rotor kanadının dönmesine ve enerji üretmesine izin verir. Şekil 2.2’de yatay eksenli bir rüzgar türbinin şematik gösterimi yer almaktadır[44].

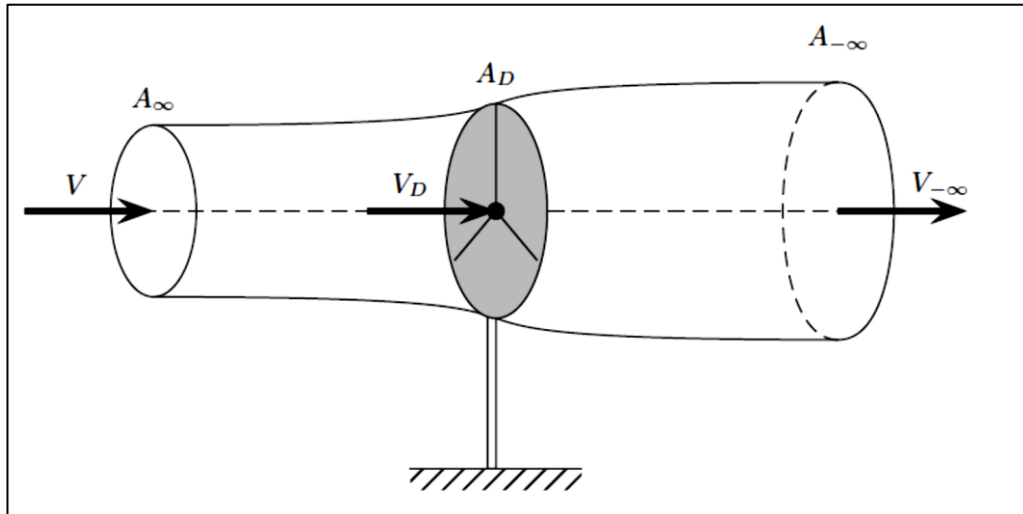


Şekil 2.2. Yatay eksenli rüzgar türbini[44]

Yatay eksenli rüzgar türbinini oluşturan bölümler şu şekilde sınıflandırılabilir[44];

- Rotor kanadı: Rüzgar enerjisini mekanik enerjiye çevirerek şafta iletir. Türbin tipine göre genelde 2 veya 3 kanatlıdır.
- Redüktör: Rotor kanadından şaft vasıtasıyla gelen mekanik enerjiyi oransal dönüşüm yaparak elektrik generatörü şaftına iletir.
- Elektrik generatörü: Redüktör şaftı vasıtasıyla iletilen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirir.
- Kule ve kule temeli: Rüzgar türbini mekanik ve elektrik aksamının yerden yüksekte yüksek rüzgar hızlarını yakalamasını sağlayan ve türbinin yere sabitlendiği yapı.
- Kontrol sistemi: Rüzgar türbinin ne zaman enerji üretmeye başlayıp ne zaman enerji üretimini durduracağına karar veren ve rüzgar türbini sisteminin tüm bölümlerinin çalışmasını izleyen ve kontrol eden sistem.

Hava akımının rüzgar türbininde oluşturduğu kuvvetlerin etkisi türbin aerodinamiği ile açıklanmaktadır. Hareketli disk teorisi ve kanat elemanı teorisi türbin aerodinamiğinin açıklamasında kullanılan iki önemli modeldir. Yatay eksenli rüzgar türbini hareketli disk modeli Şekil 2.3'de görülmektedir[41,45].



Şekil 2.3. Yatay eksenli rüzgar türbini hareketli disk modeli [45]

Hareketli disk teorisi temel olarak momentum teorisine dayanır ve türbin rüzgardan enerji çeken bir hareketli disk olarak düşünülür.  $V$  hızındaki giriş hava akımına maruz kalan hareketli disk, rüzgarın kinetik enerjisinin bir kısmını alacağı için  $V_{-\infty}$  rüzgar çıkış hızından daha büyük olacaktır. Giriş ve çıkıştaki kinetik enerjinin aynı olabilmesi için giriş rüzgar hızındaki  $A_{\infty}$  disk kesit alanı rüzgar türbini  $A_D$  disk kesit alanından küçük olmalı, çıkış rüzgar hızı  $A_{-\infty}$  kesit alanı ise diğer kesit alanlarından büyük olmalıdır[41,45].

$$\rho A_{\infty} V = \rho A_D V_D = \rho A_{-\infty} V_{-\infty} \quad (2.11)$$

Hareketli disk üzerinden geçen rüzgar hızı  $(V - V_{-\infty})$ , olup disk üzerinde oluşan kuvvet[41,45];

$$F_D = (V - V_{-\infty}) \rho A_D V_D \quad (2.12)$$

olur. Disk üzerindeki hız şu şekilde yazılır;

$$V_D = (1 - a)V \quad (2.13)$$

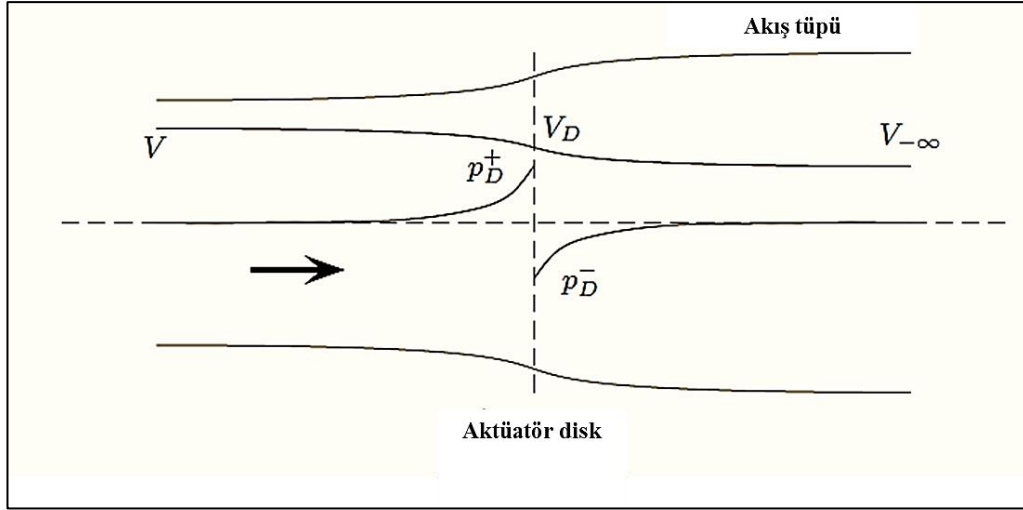
$a$  aksenal akış girişim faktörü olarak adlandırılır. Bu durumda hareketli disk tarafından azalan basınç nedeniyle oluşan  $F_D$  kuvveti;

$$F_D = (P_D^+ - P_D^-) A_D = (V - V_{-\infty}) \rho A_D V (1 - a) \quad (2.14)$$

olur.  $P_D^+$  ve  $P_D^-$  disk sonrası ve öncesindeki hava basıncıdır. Şekil 2.4 de akış tüpündeki havanın hız ve basınç değişimini görülmektedir. Hareketli disk üzerindeki basınç düşüşünü bulmak için Bernoulli denkleminde faydalanılır[41,45];

$$\frac{1}{2} \rho V_D^2 + P_D^+ + \rho g z = \frac{1}{2} \rho V^2 + P_0 + \rho g z \quad (2.15)$$

$$\frac{1}{2} \rho V_D^2 + P_D^- + \rho g z = \frac{1}{2} \rho V_{-\infty}^2 + P_0 + \rho g z \quad (2.16)$$



**Şekil 2.4.** Hava basıncı ve hızı modeli [45]

$g$  yerçekimi,  $P_0$  atmosferik basınç ve akışın yatay olduğu kabul edilerek iki denklem birbirinden çıkarılır;

$$(P_D^+ - P_D^-) = \frac{1}{2} \rho (V^2 - V_{-\infty}^2) \quad (2.17)$$

elde edilir. 2.17 denkleminin 2.14 denklemiyle yer değiştirilmesiyle;

$$V_{-\infty} = (1 - 2a)V \quad (2.18)$$

bulunur.  $a$ 'nın büyük değerleri için  $V_{-\infty}$  negatif olacağı için  $a = 0,5$  değerine kadar momentum teorisi uygulanabilir. Bu durumda hava akımındaki hareketli diskteki kuvvet;

$$F_D = 2\rho A_D V^2 a (1 - a) \quad (2.19)$$

olur. Hareketli disk tarafından çekilen güç ise;

$$P_D = F_D V_D = 2\rho A_D V^3 (1 - a)^2 \quad (2.20)$$

olur. Rüzgar türbininin rüzgardan yakalayabileceği enerji  $C_P$  güç bileşeni olarak adlandırılır ve türbin gücünün rüzgar gücüne oranı olarak tanımlanır[41,45];

$$C_P = \frac{P_D}{P_R} \quad (2.21)$$

$$C_P = \frac{2 \rho A_D V^3 a (1-a)^2}{0.5 \rho A_D V^3} = 4a (1-a)^2 \quad (2.22)$$

Rüzgardan elde edilebilecek maksimum güç bileşeni Betz verimi veya rotor verimi olarak bilinir ve  $a=1/3$  değerinde  $C_{Pmaks} = \frac{16}{27} = 0,593$  değerini alır.  $C_P$  rotor verimi bütün rüzgar türbini tipleri için geçerli olan bir değer olup, bir rüzgar türbininin rotor verimi maksimum 0,593 olabilir. Günümüzde modern rüzgar türbinlerinin rotor verimi yaklaşık 0,45 değerine kadar ulaşmıştır[41,45].

## 2.2. Rüzgar Verisi Analiz Yöntemleri

Bir bölgenin rüzgar enerjisi potansiyeli açısından verimli olup olmadığını anlamak için en az bir yıl süre ile ölçüm yapılması gerekmektedir. Bu bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelini doğru tahmin edebilmek için ise sahadan toplanan rüzgar ölçüm verileri doğru analiz edilmeli ve yorumlanmalıdır.

### 2.2.1. Ortalama Rüzgar Hızı

Bir bölgeden toplam olan rüzgar verileri içerisinde en önemli verilerden birisi ortalama rüzgar hızı verisidir. Toplanmış olan verilerden ortalama rüzgar hızı  $V$  rüzgar hızı,  $n$  rüzgar verisi sayısı olmak üzere[46];

$$V_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (2.23)$$

denklemleri ile hesaplanır.

Ancak 2.23 denklemini kullanılarak bulunan ortalama rüzgar hızı değeri potansiyel rüzgar enerjisi hesaplamada yanıltıcı olabilir. Çizelge 2.5’de örnek rüzgar hızı verileri yer almaktadır. Bu rüzgar hızı verilerinin 2.23 denklemini ile hesaplanmış ortalama rüzgar hızı değeri 6,47 m/s’dir. Hava yoğunluğu 1,225 kg/m<sup>3</sup> kabul edilirse, ortalama rüzgar gücü yoğunluğu 165,63 W/m<sup>2</sup> olarak hesaplanır. Her bir rüzgar verisi ile rüzgar gücü yoğunluğu tek tek hesaplanır ve ortalaması alınırsa sonuç 198,24 W/m<sup>2</sup> olarak bulunur. Bu durumda 2.23 denklemini kullanarak hesaplanan ortalama rüzgar gücü yoğunluğu bölgenin potansiyelini %17 daha az tahmin edilmesine yol açmaktadır[46,48].

Rüzgar enerjisi potansiyeli analizlerinde kübik hız ve güç ilişkisinden dolayı;

$$V_m = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i^3 \right)^{1/3} \quad (2.24)$$

denklemini ile tanımlanan ağırlıklı ortalama yöntemi ile ortalama rüzgar hızı hesaplanmalıdır[46,48].

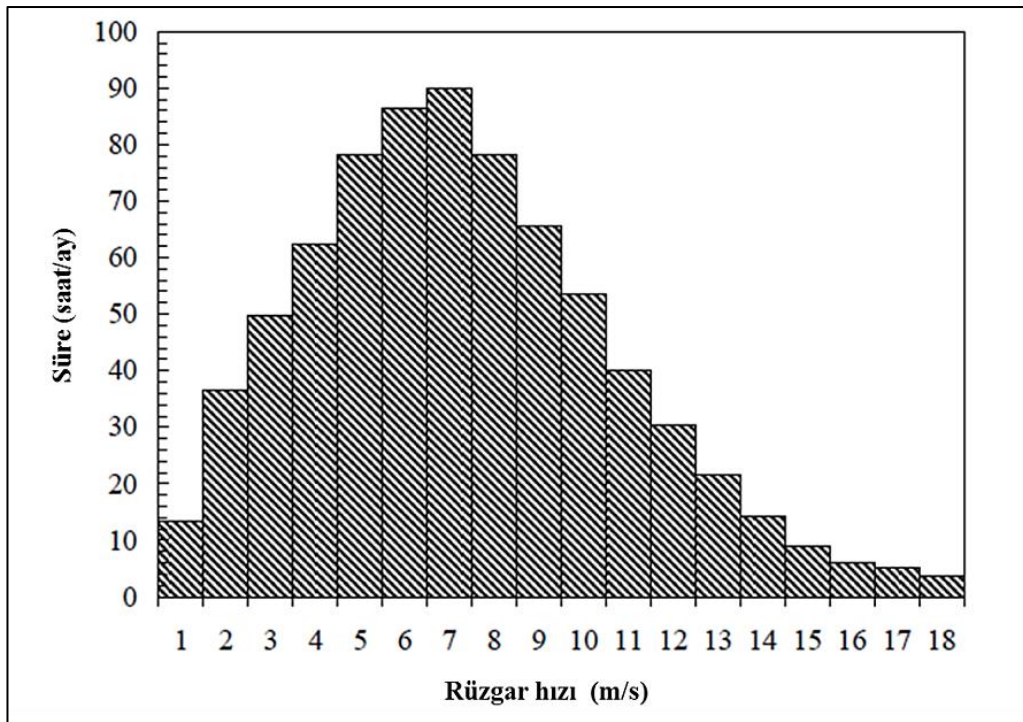
**Çizelge 2.5.** Rüzgar hızı ve rüzgar gücü arasındaki ilişki

Rüzgar hızı (m/s)	Rüzgar hızının küpü	Rüzgar gücü (W/m <sup>2</sup> )
4,40	85,18	52,18
5,30	148,88	91,19
7,50	421,88	258,40
6,30	250,05	153,15
5,90	205,38	125,79
9,40	830,58	508,73

## 2.2.2. Rüzgar Hızı Dağılım Eğrileri

Rüzgar hızı; yeryüzü şekilleri, havanın durumu, yerden yükseklik gibi değişken faktörler nedeniyle hiçbir bölgede kararlı değildir. Bir bölgenin rüzgar gücü potansiyeli hesaplamada ise rüzgar hızı en önemli parametredir. Enerji potansiyeli hesaplamasının hassas bir şekilde yapılabilmesi için ortalama rüzgar hızı verisi yeterli değildir. Her bir rüzgar hızının hangi sıklıkla bulunduğu analiz edilebileceği yöntemler bir bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelini hesaplamak için kullanılmalıdır[47-49].

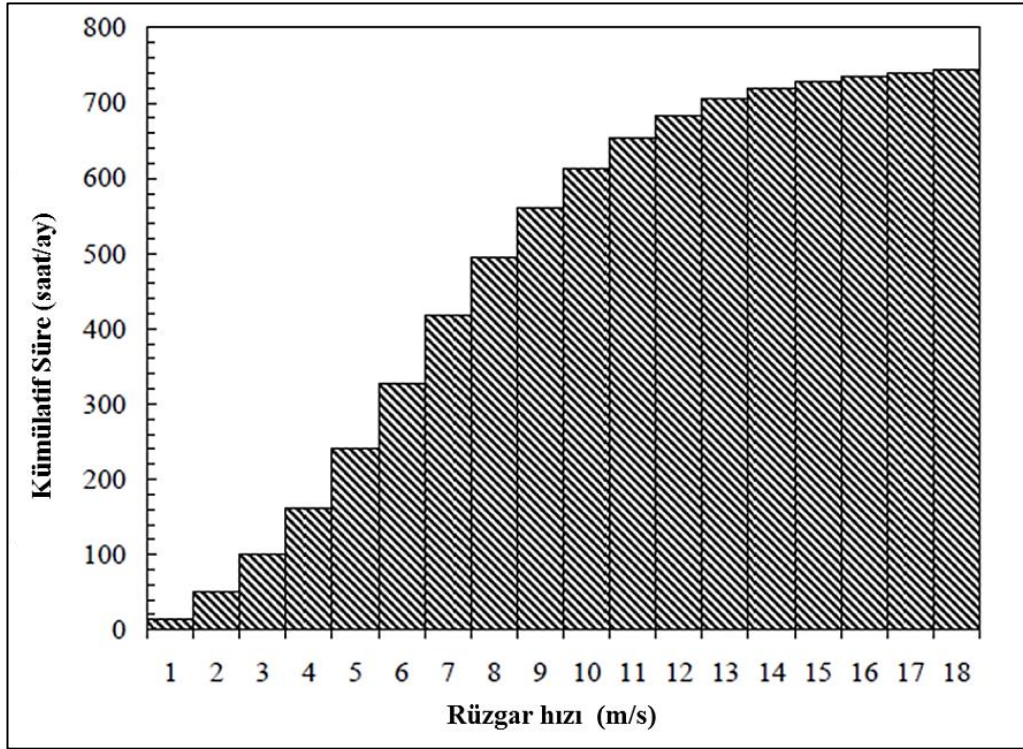
Bir bölgedeki rüzgar hızı değişkenliğini anlayabilmek için rüzgar hızı verileri rüzgar hızı dağılımları şeklinde gruplandırılır. Rüzgar hızı dağılımı genellikle olasılık yoğunluk dağılım fonksiyonu veya kümülatif dağılım fonksiyonu ile ifade edilir. Her bir rüzgar hızı verisinin süresi eşit aralıklara ayrılmış hız gruplarında gruplandırılarak olasılık yoğunluk fonksiyonu oluşturulur. Olasılık yoğunluk fonksiyonu Şekil 2.5'te görüleceği üzere en sık rüzgar hızlarının belirlenmesinde kullanılır[47-49].



Şekil 2.5. Olasılık yoğunluk fonksiyonu [48]



Her bir rüzgar hızı verisinin süresinin eşit rüzgar hızı gruplarında kümülatif olarak toplanması ile kümülatif dağılım fonksiyonu elde edilir. Kümülatif dağılım fonksiyonu Şekil 2.6'da görüldüğü gibi ortalama rüzgar hızının geometrik olarak bulunmasını sağlar[47-49].



Şekil 2.6. Kümülatif olasılık yoğunluk fonksiyonu[48]

### 2.2.2.1. Weibull Dağılımı ve Rayleigh Dağılımı İstatistiksel Modelleri

Bir bölgede bir yıl boyunca yapılmış ölçümler ve ortalama rüzgar hızı verisi rüzgar gücü potansiyeli hesaplaması için yeterli değildir. Bir bölgedeki rüzgar gücü potansiyelinin sağlıklı hesaplanabilmesi için en az on yıllık bir süre içerisindeki verilere ihtiyaç vardır. Ancak hiçbir yatırım bu kadar uzun bir süreyi beklemez. Bu nedenle bir bölgenin rüzgar gücü potansiyeli analizi için bir yıllık rüzgar verileri o

bölgeye yakın uzun dönem veriye sahip bir bölgenin verileri ile karşılaştırılarak uzun dönemli analiz yapılır. Bu yöntemle ölç-karşılaştır-tahmin et tekniği denir[46-49].

1930 yılında İsveç’li bir fizikçi olan W. Weibull malzemelerin gerilim altındaki dayanımını ve yorgunluğunu araştırırken bir olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanmıştır. Daha sonraları İsveç’li fizikçi Weibull’un adıyla anılacak olan bu olasılık yoğunluk fonksiyonu, birçok doğal olayın olasılık hesaplamalarında gerçek değerlere en yakın tahmini vermektedir. Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu sağladığı basitlik ve esneklik nedeniyle rüzgar enerjisi hesaplamaları için benimsenen ve birçok uygulama için tercih edilen bir yöntemdir. Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu iki parametrelidir olup şu şekilde ifade edilmektedir[19,27];

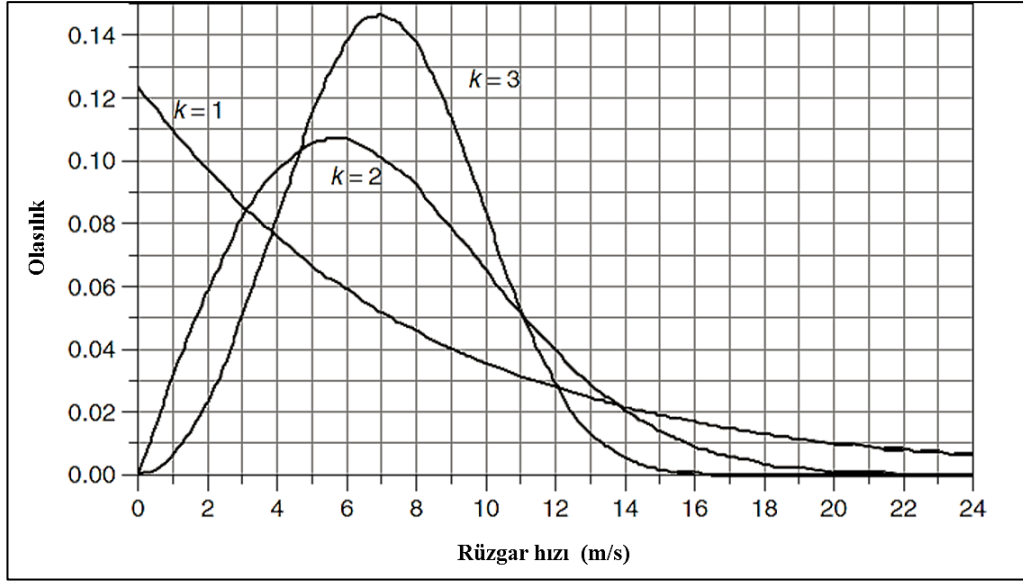
$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2.25)$$

$f(v)$  gözlemlenen rüzgar hızı olasılığı,  $k$  boyutsuz şekil parametresi,  $c$  ise ölçü parametresidir.  $k$  değeri fonksiyonun görünümünü etkiler ve birçok rüzgar rejimi için 1,5 ile 3,0 arasında değişiklik gösterir[19,27]. Kümülatif dağılım fonksiyonu ise;

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2.26)$$

şeklinde ifade edilir[19,27].

Şekil 2.7’deki Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonları ölçü parametresi  $c = 8$  için şekil parametresi  $k$ ’nin değişimini göstermektedir.  $k = 1$  iken fonksiyon üstel azalan bir yapıda olup, büyük bir ihtimalle birçok gün rüzgar düşük hıza sahiptir veya hiç rüzgar yoktur.  $k = 3$  iken fonksiyon Gauss dağılımı veya çan eğrisine benzeyen bir yapıya sahip olup, yüksek ve düşük hızlı rüzgarlı gün sayısı birbirine yakındır.  $k = 2$  iken fonksiyonun görünümü birçok bölgenin tipik rüzgar dağılımına benzemektedir. Bu fonksiyon dağılımında ortalama rüzgar hızından düşük hıza sahip gün sayısı daha fazla olmakla beraber birkaç gün ortalama rüzgar hızından yüksek hıza sahiptir[49].



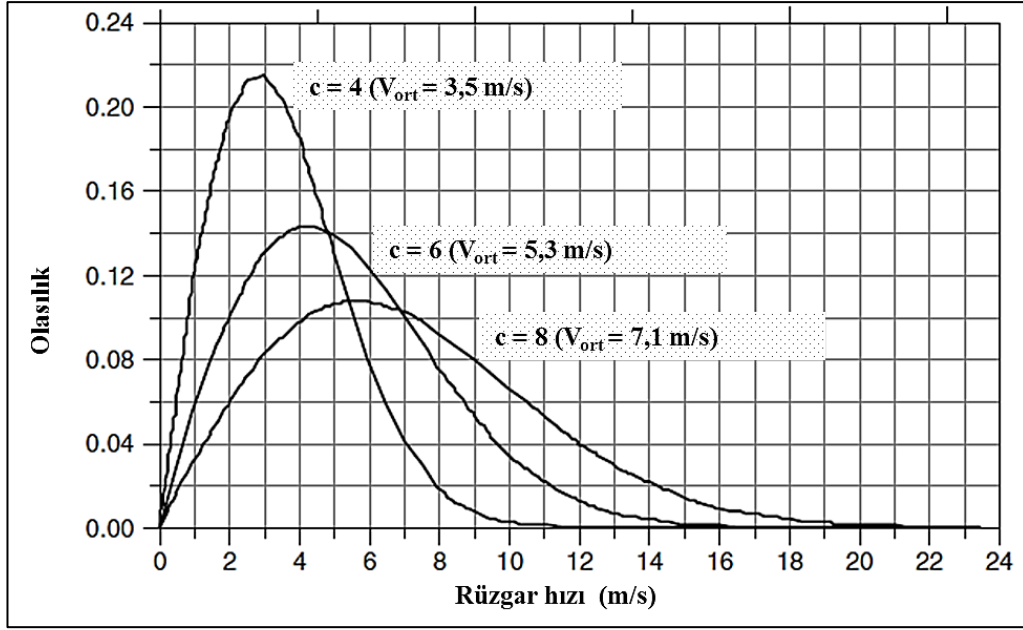
**Şekil 2.7.** Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonları [49]

Şekil 2.7'deki Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonları içerisinde  $k = 2$  değerine sahip olan fonksiyon daha gerçekçi bir yapıya sahip olup, birçok bölgedeki rüzgar karakteristiği ile örtüşmektedir.  $k = 2$  değerine sahip Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu olarak adlandırılır ve şu şekilde ifade edilir[28,49];

$$f(v) = \frac{2v}{c^2} \exp \left[ -\left(\frac{v}{c}\right)^2 \right] \quad (2.27)$$

Bir bölgenin rüzgar durumu ile ilgili az bilgiye sahip olduğunda  $k = 2$  değerini kullanarak hesap yapmak daha kolay ve birçok bölge için daha iyi karşılaştırma yapma imkanı vermektedir. Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu sadece  $c$  ölçü parametresi ile rüzgar hızının karakteristiğini belirlemek için yeterli ve hassas bir yöntemdir[28,49].

Şekil 2.8'de görüleceği gibi Rayleigh olasılık dağılımı fonksiyonunda  $c$  ölçü parametresinin büyümesi fonksiyon eğrisini daha yüksek rüzgar hızına doğru kaydırmaktadır[49].



**Şekil 2.8.** Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu [49]

Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu  $c$  şekil parametresi ile ortalama rüzgar hızı arasındaki ilişki[28,49];

$$v_m = \int_0^{\infty} v \cdot f(v) dv = \int_0^{\infty} \frac{2v^2}{c^2} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right] = \frac{\sqrt{\pi}}{2} c \cong 0.886c \quad (2.28)$$

veya

$$c = \frac{2}{\sqrt{\pi}} v_m \cong 1.128 v_m \quad (2.29)$$

denklemleri ile gösterilir. 2.29 denklemindeki sonucu 2.27 denkleminde yerine koyarak ortalama rüzgar hızı ile Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonunu 2.30 denklemi ile belirlemek daha kolay bir yöntemdir[28,49].

$$f_R(v) = \frac{\pi v}{2v_m^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{v_m}\right)^2\right] \quad (2.30)$$

Kümülatif dağılım fonksiyonu ise;

$$F_R(v) = 1 - \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{v_m}\right)^2\right] \quad (2.31)$$

şeklinde ifade edilir. 2.30 denklemi kullanılarak herhangi bir rüzgar hızının olasılık değeri ortalama rüzgar hızı kullanılarak hesaplanır ve olasılık yoğunluk fonksiyonu oluşturulur[28,49].

### 2.2.3. Güç ve Enerji Üretimi Hesaplama Yöntemleri

Bir rüzgar enerjisi santrali projesini gerçekleştirmek için öncelikle yapılması gereken bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelinin doğru bir şekilde belirlenmesidir. Bölgedeki rüzgar yapısında görülen en sık rüzgar hızı değeri ve maksimum enerji üretimini sağlayacak rüzgar hızı verilerinin iyi irdelenmesi gerekmektedir. Bölgeden elde edilebilecek maksimum enerji ve enerjiyi sağlayacak rüzgar hızı değerleri türbin seçimini de etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Bir bölgenin rüzgar enerjisi potansiyeli analizinde genellikle Weibull ve Rayleigh istatistiksel yöntemi kullanılmaktadır[48].

#### 2.2.3.1. Weibull İstatistiksel Yöntemi

Rüzgar enerjisi yoğunluğu  $E_V$ , bir rüzgar rejiminde birim rotor süpürme alanı ve birim zaman için mevcut olan enerjiyi ifade eder.  $E_V$ , bir rüzgar rejiminde rüzgar hızı ve dağılımının bir fonksiyonudur. Toplam mevcut olan enerji ise rüzgar enerjisi yoğunluğunun zaman faktörü ile çarpılması sonucu bulunabilir. Bir türbin rotor kesit alanına gelen  $v$  hızındaki rüzgardan elde edilebilecek güç şu şekildedir[48];

$$P_V = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.32)$$

Bu güç ifadesi  $f(V)$  birim zaman aralığı için, birim zamanda birim rotor kesit alanından üretilebilecek enerji şeklinde yazılırsa;

$$E_Y = \int_0^{\infty} P_V f(V) dV \quad (2.33)$$

olur.  $P_V$  ve  $f(V)$  fonksiyonları 2.33 denkleminde yerine konulup sadeleştirildiğinde;

$$E_Y = \frac{\rho_a k}{2 c^k} \int_0^{\infty} V^{(k+2)} e^{-(V/c)^k} dV \quad (2.34)$$

elde edilir. Bu eşitliği sadeleştirmek için;

$$x = \left(\frac{V}{c}\right)^k \quad (2.35)$$

alınırsa enerji yoğunluğu ifadesi;

$$E_Y = \frac{\rho_a c^3}{2} \int_0^{\infty} x^{3/k} e^{-x} dx \quad (2.36)$$

olur. 2.36 denklemindeki ifade standart gama integral ifadesi ile yazılırsa;

$$E_Y = \frac{\rho_a c^3}{2} \Gamma\left(\frac{3}{k} + 1\right) \quad (2.37)$$

denklemini elde edilir. Standart indirgeme denklemini olan;

$$\Gamma(n) = (n - 1)\Gamma(n - 1) \quad (2.38)$$

denklemini, 2.37 denklemini için uygulanırsa;

$$E_Y = \frac{\rho_a c^3}{2} \frac{3}{k} \Gamma\left(\frac{3}{k}\right) \quad (2.39)$$

enerji yoğunluğu denklemini elde edilir. 2.39 denklemini kullanılarak bir  $T$  zaman dilimi için  $E_T$  toplam enerji miktarı;

$$E_T = E_Y T = \frac{\rho_a c^3 T}{2} \left(\frac{3}{k}\right) \Gamma\left(\frac{3}{k}\right) \quad (2.40)$$

olarak bulunur. Yoğunluk fonksiyonu eğrisinin tepe noktası  $V_{Fmaks}$  en sık görülen rüzgar hızı değerini verir. Olasılık yoğunluk fonksiyonu;

$$f(V) = \frac{k}{c^k} V^{k-1} e^{-(V/c)^k} \quad (2.41)$$

şeklinde yazılırsa en sık görülen rüzgar hızını bulmak için;

$$f'(V) = 0 \quad (2.42)$$

dolayısıyla;

$$\frac{k}{c^k} e^{-(V/c)^k} \left[ -\frac{k}{c^k} V^{2(k-1)} + (k-1)V^{(k-2)} \right] = 0 \quad (2.43)$$

olmalıdır. 2.43 denklemi  $V$  için çözülürse;

$$V = c \left(\frac{k-1}{k}\right)^{1/k} \quad (2.44)$$

olarak bulunur. 2.44 denklemi  $V$  değerinde  $f(V)$ 'nin maksimum olduğunu gösterir. Dolayısıyla en sık görülen rüzgar hızı  $V_{Fmaks}$ ;

$$V_{Fmaks} = c \left(\frac{k-1}{k}\right)^{1/k} \quad (2.45)$$

denklemleri ile ifade edilir.

Kübik hız-güç ilişkisi nedeniyle maksimum enerji üretimini sağlayan rüzgar hızı,  $V_{Emaks}$ , genellikle  $V_{Fmaks}$ , en sık rastlanan rüzgar hızı, değerinden yüksektir. Maksimum güç üretimini sağlayacak rüzgar hızını bulmak için  $V$  rüzgar hızında birim rotor alanı ve birim zaman için enerji ifadesi[48];

$$E_V = P_V f(V) \quad (2.46)$$

$P_V$  ve  $f(V)$  fonksiyonları 2.46 denkleminde yerine konulup sadeleştirilirse;

$$E_V = \frac{\rho a V^3}{2} \frac{k}{c} \left( \frac{V}{c} \right)^{k-1} e^{-(V/c)^k} \quad (2.47)$$

şeklinde yazılır. 2.47 denklemini sadeleştirmek için;

$$B = \frac{\rho}{2} \frac{k}{c^k} \quad (2.48)$$

ifadesi kullanılırsa enerji denklemi;

$$E_V = B V^{(k+2)} e^{-(V/c)^k} \quad (2.49)$$

olur.  $E_V$  değerinin maksimum olabilmesi için;

$$E'_V = 0 \quad (2.50)$$

dolayısıyla;

$$B \left( -e^{-(V/c)^k} V^{k+2} \frac{k}{c^k} V^{(k-1)} + e^{-(V/c)^k} (k+2) V^{(k+1)} \right) = 0 \quad (2.51)$$

olmalıdır. 2.51 denkleminin çözülmesi sonucu;

$$V = \frac{c(k+2)^{1/k}}{k^{1/k}} \quad (2.52)$$

olarak bulunur. 2.52 ifadesindeki  $V$  hızı, maksimum enerji üretimini sağlayan;

$$V_{Emaks} = \frac{c(k+2)^{1/k}}{k^{1/k}} \quad (2.53)$$



rüzgar hızı değerini verir. Bir rüzgar türbini en verimli şekilde tasarlandığı anma rüzgar hızında çalışır. Türbinin anma rüzgar hızı değeri genelde  $V_{Emaks}$  değerine yakındır. Bir rüzgar rejiminde türbin seçimi yaparken türbin anma rüzgar hızı değeri  $V_{Emaks}$  değerine ne kadar yakın seçilirse o bölgeden maksimum güç elde edilmesi kolaylaşacaktır[48].

### 2.2.3.2. Rayleigh İstatistiksel Yöntemi

Rayleigh istatistiksel yöntemi ile  $f(V)$  birim zaman aralığı için, birim zamanda birim rotor kesit alanından üretilebilecek enerji[48];

$$E_Y = \int_0^{\infty} P_V f(V) dV = \int_0^{\infty} \frac{\pi \rho_a}{4V_m^2} V^4 e^{-\left[\pi/4 (V/V_m)^2\right]} dV \quad (2.54)$$

şeklinde yazılır. 2.54 denklemini sadeleştirmek için;

$$K = \frac{\pi}{4V_m^2} \quad (2.55)$$

alınırsa enerji yoğunluğu ifadesi;

$$E_Y = K \rho_a \int_0^{\infty} V^4 e^{-KV^2} dV \quad (2.56)$$

olur. İfadeyi tekrar sadeleştirmek için;

$$x = KV^2 \quad (2.57)$$

$$dV = \frac{dx}{2\sqrt{Kx}} \quad (2.58)$$

işlemi 2.56 denkleminde yerine konursa;

$$E_Y = \frac{\rho_a}{2K^{3/2}} \int_0^{\infty} x^{3/2} e^{-x} dx \quad (2.59)$$

elde edilir ve bu ifade gama fonksiyonu ile indirgenirse;

$$E_Y = \frac{\rho_a}{2K^{5/2}} \Gamma\left(\frac{5}{2}\right) \quad (2.60)$$

$$E_Y = \frac{3}{8} \frac{\rho_a \sqrt{\pi}}{K^{1.5}} \quad (2.61)$$

denklemini elde edilir ve  $K$  değeri 2.61 denkleminde yerine konursa;

$$E_Y = \frac{3}{\pi} \rho_a V_m^3 \quad (2.62)$$

$E_Y$  enerji yoğunluğu denklemini elde edilir. 2.62 denklemini kullanılarak bir  $T$  zaman dilimi için  $E_T$  toplam enerji miktarı;

$$E_T = T E_Y = \frac{3}{\pi} T \rho_a V_m^3 \quad (2.63)$$

şeklinde bulunur. En sık görülen rüzgar hızını belirlemek için Rayleigh dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu  $K$  cinsinden yazılırsa;

$$f(V) = 2KV e^{-(KV^2)} \quad (2.64)$$

elde edilir ve 2.64 denkleminin maksimum değeri için;

$$f'(V) = 0 \quad (2.65)$$

$$2K e^{-(KV^2)} (1 - 2KV^2) = 0 \quad (2.66)$$

olmalıdır. 2.66 denkleminin çözülmesiyle;

$$V = \frac{1}{\sqrt{2K}} \quad (2.67)$$

bulunur. 2.67 denkleminin  $V$  değerinde  $f(V)$ 'nin maksimum olduğunu gösterir. Dolayısıyla en sık görülen rüzgar hızı  $V_{Fmaks}$ ;

$$V_{Fmaks} = \frac{1}{\sqrt{2K}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} V_m \quad (2.68)$$

şeklinde tanımlanır.

Maksimum güç üretimini sağlayacak rüzgar hızını bulmak için  $V$  rüzgar hızında birim rotor alanı ve birim zaman için enerji ifadesi Rayleigh dağılımı yöntemiyle;

$$E_V = P_V f(V) = K \rho_a V^4 e^{-KV^2} \quad (2.69)$$

şeklinde yazılır.  $E_V$ 'nin maksimum değeri alması için;

$$E'_V = 0 \quad (2.70)$$

$$K \rho_a e^{-KV^2} (4V^3 + V^4(-2KV)) = 0 \quad (2.71)$$

olmalıdır. 2.71 denkleminin çözülmesiyle;

$$V = \sqrt{\frac{2}{K}} \quad (2.72)$$

bulunur. 2.72 denklemindeki  $V$  değerinde  $E_V$  maksimum olacağından maksimum enerji üretimini sağlayan  $V_{Emaks}$  rüzgar hızı;

$$V_{Emaks} = \sqrt{\frac{2}{K}} = 2 \sqrt{\frac{2}{\pi}} V_m \quad (2.73)$$

şeklinde tanımlanır. Rayleigh istatistiksel yöntemi ile yapılan hesaplamalar Weibull istatistiksel yöntemine göre daha analitik ve basittir[48].

### 2.3. Rüzgar Rejimine Uygun Türbin Seçim Yöntemleri

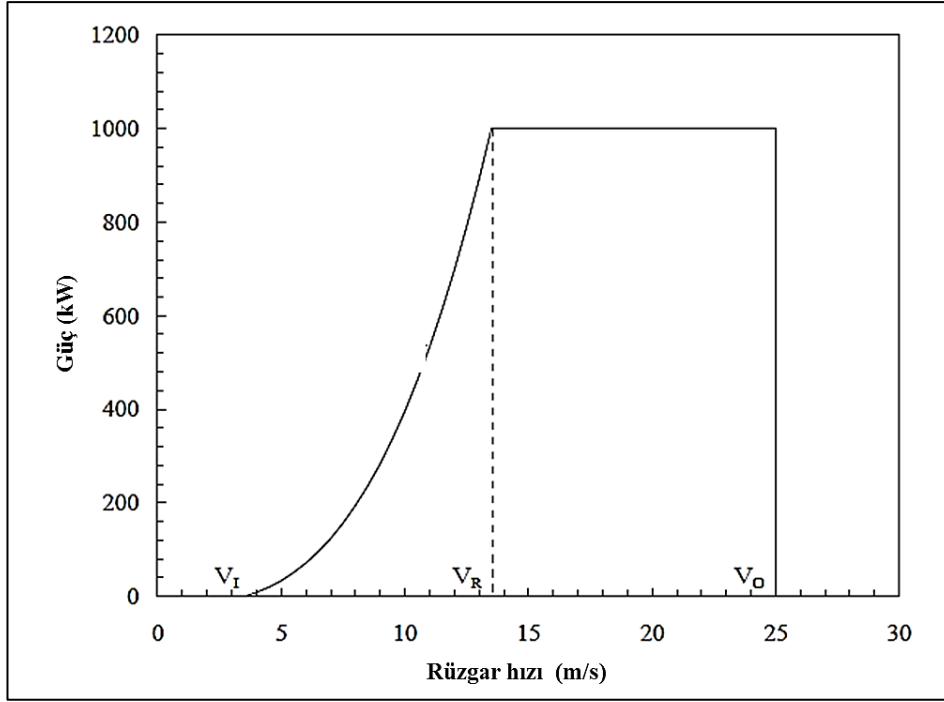
Bir rüzgar santrali projesinin rüzgar gücü potansiyel analizi yapıldıktan sonra o bölgenin rüzgar rejimine uygun türbin seçiminin yapılması gerekmektedir. Farklı üreticilerin farklı özelliklere sahip türbinlerinin hangisinin o bölgenin rüzgar rejimine uygun olduğu ve maksimum güç üretimi sağlayacağını belirlemek için çeşitli yöntemler kullanılır.

#### 2.3.1. Rüzgar Türbini Güç Eğrisi

Rüzgar türbinlerinin performansını belirleyen önemli özelliklerden birisi farklı rüzgar hızlarında türbinin ürettiği güç değeridir. Bir rüzgar türbini için rüzgar hızı ile generatörün ürettiği elektrik miktarını gösteren güç eğrisi en önemli teknik bilgidir. Güç eğrisi bir rüzgar türbininin aerodinamik, mekanik tasarım ve generatör verimliliklerini bir bütün olarak yansıtan göstergedir. Güç eğrisi rüzgar türbini üreticileri tarafından garanti edilen performans sertifikasıdır[47-49]. Şekil 2.9’da bir rüzgar türbininin rüzgar hızı – güç eğrisi görülmektedir.

Bir rüzgar türbini güç eğrisini belirleyen üç ana unsur vardır[48];

- Başlama rüzgar hızı:  $V_I$  rüzgar türbininin güç üretmeye başladığı rüzgar hızı değeridir.
- Anma rüzgar hızı:  $V_R$  rüzgar türbininin anma güç değerinde güç üretmeye başladığı ve maksimum güç üretiminin sağlandığı rüzgar hızıdır.
- Durma rüzgar hızı:  $V_O$  rüzgar türbininin güç üretebileceği maksimum rüzgar hızı değeri olup, bu değerin üzerinde türbin güç üretimini durdurur.



Şekil 2.9. Rüzgar türbini rüzgar hızı - güç eğrisi [48]

Çizelge 2.6. Rüzgar türbini rüzgar hızı - güç eğrisi bölgeleri [48]

Hız aralığı	Güç
0 ile $V_I$	Güç yok
$V_I$ ile $V_R$	Güç $V$ hızı ile artar
$V_R$ ile $V_O$	Sabit Güç, $P_R$
$V_O$ dan büyük	Güç yok

Güç eğrisinde belirtilen elektrik çıkış güçleri bütün kayıplar karşılandıktan sonra kalan net güçtür. Çizelge 2.6'da görüldüğü üzere rüzgar türbini güç eğrisi dört bölgeye ayrılabilir. Bu bölgeler içerisinde güç üretimi  $V_I - V_R$  ve  $V_R - V_O$  arası iki bölgede gerçekleşmektedir[48].

Şekil 2.9'da görülen  $V_I - V_R$  arasındaki rüzgar hızı güç üretimi eğrisi;

$$P_{VIR} = aV^n + b \quad (2.74)$$

$a$  ve  $b$  sabit,  $n$  hız-güç oranı olmak üzere 2.74 denklemi ile ifade edilir.  $V_I$  noktasında üretilen güç sıfırdır[48]. Bu durumda;

$$aV_I^n + b = 0 \quad (2.75)$$

olur.  $V_R$  noktasında üretilen güç ise  $P_R$  dir. Bu durumda 5.1 denklemi;

$$aV_R^n + b = P_R \quad (2.76)$$

olur. 2.75 ve 2.76 denklemlerinin  $a$  ve  $b$  için çözülüp, 2.74 denkleminde yerine konulmasıyla;

$$P_{VIR} = P_R \left( \frac{V^n - V_I^n}{V_R^n - V_I^n} \right) \quad (2.77)$$

elde edilir. 2.77 denklemi  $V_I - V_R$  arasındaki rüzgar hızları için rüzgar türbini güç üretimini eğrisini vermektedir.  $V_R - V_O$  arasındaki bölgede ise türbin çıkış gücü anma çıkış gücü  $P_R$ 'ye eşittir[48].

Pratikte rüzgar türbini güç eğrisi Şekil 2.9'daki gibi mükemmel bir eğri şeklinde değildir. Rüzgar türbini aynı rüzgar hızı değerlerinde her seferinde farklı güç değerleri üretir. Çünkü rüzgar hızını etkileyen farklı faktörler ve rüzgar türbininden geçen rüzgarın kuvveti tam olarak ölçülememektedir. 2.77 denklemi kullanılarak bir rüzgar türbinin güç eğrisinin oluşturulması pratikteki değerlerle karşılaştırıldığında farklı olduğu görülecektir. Bu nedenle bir kural olarak bütün rüzgar türbinlerinin güç eğrisi bağımsız denetçi kuruluşlar tarafından yapılan testler sonucunda oluşturulur ve sertifikalandırılır[47-49].

### 2.3.2. Weibull ve Rayleigh İstatistiksel Yöntemi ile Türbin Güç Eğrilerinin Eşleştirilmesi

Rüzgar türbinlerinin güç eğrileri, herhangi bir rüzgar hızı değerinde üretilecek gücün bilinmesini sağlamaktadır. Rüzgar ölçümlerinde elde edilen rüzgar hızı değerleri ve ortalama rüzgar hızı verisi ile bir bölgedeki belirli bir zaman aralığında esen rüzgar hızlarının her birinin süresini bulmak mümkündür. Rüzgar türbini güç eğrisi ile rüzgar hızlarının esme süresi gruplandırılıp bir araya getirilirse toplam elektrik enerjisi üretim miktarı bulunabilir. Hesaplama için rüzgar verileri yeterli değilse, alternatif bir hesaplama yöntemi olarak Weibull istatistiksel yöntemi  $k$  şekil parametresi ve  $c$  ölçü parametresi ile kullanılabilir. Sadece ortalama rüzgar hızı verisi biliniyorsa uygulaması daha basit olan  $k = 2$  ve  $c = \frac{2}{\sqrt{\pi}}v_m$  denklemleri kullanılarak Rayleigh istatistiksel yöntemi ile hesaplama yapılabilir[49].

Öncelikle rüzgar türbini güç eğrisi ve ölçüm sonuçları kullanılarak türbinin ne kadar güç ve enerji üreteceği hesaplanır. Rüzgar hızı verilerini Rayleigh yöntemi kullanarak sürekli fonksiyon halinden ayırık fonksiyon haline getirmek gerekir. Bunun için rüzgar hızı verilerinden elde edilen ortalama rüzgar hızı ve 2.30 Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu denklemi ile olasılık hesaplaması yapılır. Böylece ölçülmüş rüzgar hızları gruplandırılarak rüzgar türbini güç eğrisi ile birlikte kullanılabilir hale gelir. Gruplandırılmış rüzgar hızları hesaplamasının yapılacağı zaman değeri ile çarpılarak, o zaman diliminde hangi rüzgar hızının ne kadar süre ile estiği bulunur. Bulunan bu süre rüzgar türbini güç eğrisinde rüzgar hızına karşılık gelen güç değeri ile çarpılır ve her bir rüzgar hızında türbinin ürettiği enerji miktarı bulunur. Her bir rüzgar hızında üretilen enerji miktarı toplanarak belirlenen zaman diliminde rüzgar türbininin ne kadar enerji üreteceği bulunmuş olur[49].

Çizelge 2.7’de 60 metre rotor kanat çapına sahip 1000 kW anma gücündeki bir rüzgar türbinin güç eğrisinden elde edilen güç değeri sınıflandırması ve ölçümler sonucu elde edilmiş 7 m/s ortalama rüzgar hızı Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu denkleminde kullanılarak 8760 saatlik süre için yapılan enerji hesaplaması görülmektedir[49].

**Çizelge 2.7.** 60 metre rotor kanat çapına sahip 1000 kW anma gücündeki bir rüzgar türbinin güç değeri sınıflandırması ve enerji hesaplaması [49]

Rüzgar hızı (m/s)	Türbin Gücü (kW)	Olasılık f(v)	V rüzgar hızındaki toplam süre (saat/yıl)	Enerji (kWh/yıl)
0	0	0,000	0	0
1	0	0,032	276	0
2	0	0,060	527	0
3	0	0,083	729	0
4	33	0,099	869	28.683
5	86	0,107	941	80.885
6	150	0,108	946	141.929
7	248	0,102	896	222.271
8	385	0,092	805	310.076
9	535	0,079	690	369.126
10	670	0,065	565	378.785
11	780	0,051	444	346.435
12	864	0,038	335	289.550
13	924	0,028	243	224.707
14	964	0,019	170	163.778
15	989	0,013	114	113.101
16	1000	0,008	74	74.217
17	998	0,005	46	46.371
18	987	0,003	28	27.709
19	968	0,002	16	15.853
20	944	0,001	9	8.709
21	917	0,001	5	4.604
22	889	0,000	3	2.347
23	863	0,000	1	1.158
24	840	0,000	1	554
25	822	0,000	0	257
26	0	0,000	0	0
			<b>Toplam</b>	<b>2.851.107</b>



Rüzgar türbininin kullanılacağı bölgedeki rüzgar enerjisi potansiyeli Rayleigh istatistiksel yöntemi kullanılarak hesaplanır. Ortalama rüzgar hızı ve türbin rotor kanat çapı bilindiği için 2.62 Rayleigh enerji yoğunluğu denklemi kullanılarak enerji yoğunluğu hesaplaması yapılır. Çizelge 2.7'deki örnek için hava yoğunluğunun  $1,225\text{kg/m}^3$  olduğu varsayımıyla yapılan hesaplama sonucunda 1134 kW rüzgar gücü ve bunun 8760 saat süre ile çarpımı sonucunda  $9.938 \times 10^6$  kWh rüzgar enerjisi potansiyeli bulunmuştur[49]. İlk hesaplama sonucunda rüzgar türbininin üreteceği güç ve enerji, ikinci hesaplama sonucunda da bölgenin rüzgar gücü ve enerji potansiyeli bulunur. Rüzgar türbinin üreteceği enerji değerinin bölgenin rüzgar enerjisi potansiyeli değerine bölünmesiyle de türbin verimi bulunur. Çizelge 2.7'deki örnek için türbin verimi %29 olarak bulunmuştur.

### 2.3.3. Kapasite Faktörü Yöntemi

Bir rüzgar türbininin kurulacağı bölgedeki performansını gösteren önemli bir işaret kapasite faktörüdür. Kapasite faktörü türbininin kurulacağı bölgede rüzgar hızına bağlı olarak enerji üretiminin verimliliğini göstermektedir. Bir rüzgar türbininin kapasite faktörü, rüzgar rejimine bağlı olarak türbinin üreteceği enerji ile türbinin anma gücünde üreteceği enerji arasındaki orandır. Genellikle kapasite faktörü yıllık bazdaki enerji üretimine göre belirtilir[44,50].

$$K_F = \frac{E_{RT}}{TP_R} \quad (2.78)$$

$$K_F = \frac{\text{Üretilen toplam enerji}}{P_R \times 8760} \quad (2.79)$$

Burada;

$K_F$ : Rüzgar türbini kapasite faktörü

$E_{RT}$ : Rüzgar türbinin bulunduğu bölgedeki rüzgar rejiminden ürettiği enerji (kWh)

$P_R$ : Rüzgar türbini anma gücü (kW)

$T$ : Süre (saat)

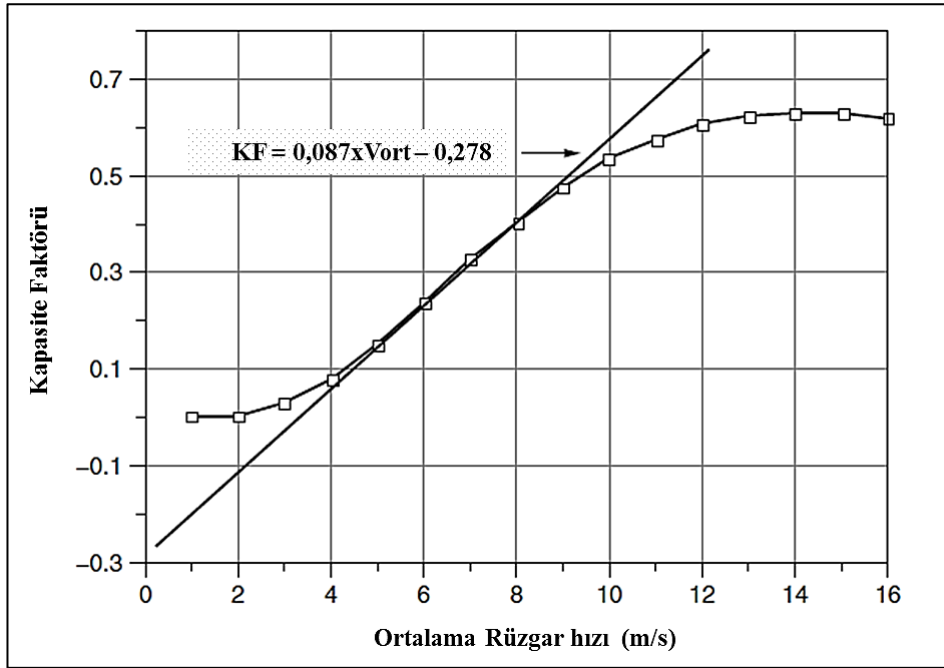
Genellikle rüzgar türbinlerinin kapasite faktörleri bölgeden bölgeye değişmekle beraber 0,25 ile 0,40 arasındadır. Eğer kapasite faktörü 0,4 ve üzeri bir değere sahipse türbinin kurulacağı bölgenin çok verimli olduğunu gösterir[48,49].

Çizelge 2.7'deki rüzgar türbini için yapılan hesaplama sonucunda kapasite faktörü 0,325 olarak çıkmaktadır.

$$K_F = \frac{\text{Üretilen toplam enerji}}{P_R \times 8760} = \frac{2,851 \times 10^6 \text{ kWh/yıl}}{1000 \text{ kW} \times 8760 \text{ h /yıl}} = 0,325$$

Rayleigh istatistiksel yöntemi ve ortalama rüzgar hızı değeri kullanılarak farklı rüzgar hızlarındaki kapasite faktörleri hesaplandığında Şekil 2.10'daki gibi bir eğri elde edilmektedir. Farklı rüzgar türbinleri için de kapasite faktörü hesaplamaları Şekil 2.10'daki gibi bir eğriyi vermektedir. Bu durumda, eğrinin doğrusal bölgesinde kapasite faktörünün modellenmesi şu şekilde olur[49];

$$K_F = mV_m + b \quad (2.80)$$



Şekil 2.10. Bir rüzgar türbini güç eğrisinin doğrusal kısmına uydurulmuş eğri [49]

Çeşitli tipteki rüzgar türbini için yapılan hesaplamalarda  $b$  değerinin  $P/D^2$ 'ye eşit olduğu belirlenmiş ve kapasite faktörü;

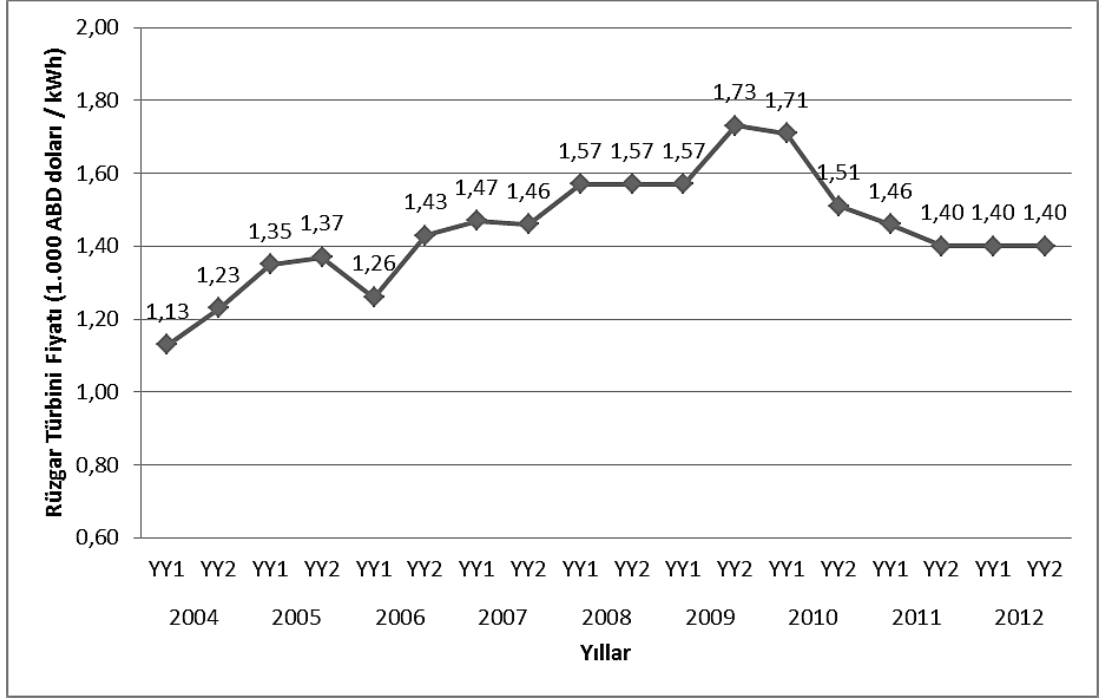
$$K_F = 0.087 V_m - \frac{P_R}{D^2} \quad (2.81)$$

şeklinde elde edilmiştir. 2.81 denkleminin ifade edilen kapasite faktörü hesaplama yöntemi türbin anma gücü, rotor kanat çapı ve ortalama rüzgar hızı verisi ile hesaplanabildiği için kullanışlı ve sadedir[48,49].

#### **2.4. Rüzgar Enerjisi Santrali Yatırım Maliyeti Analizi**

Rüzgar türbininden üretilen elektrik enerjisinin birim maliyeti, ülkeden ülkeye değişen birçok faktörden etkilenir. Yenilenebilir bir enerji kaynağı olan rüzgardan elektrik üretimi için yatırım maliyeti diğer enerji kaynaklarıyla kıyaslandığında yüksektir. Rüzgar türbini teknolojisi geliştikçe daha yüksek güçlerde üretim yapma kapasitesi artmakta, bu durum ise üretilen kWh başına elektrik enerjisi için gerekli olan yatırım maliyetini düşürmektedir[51].

Rüzgar santrali yatırımında rakamsal olarak en büyük kalemi rüzgar türbinleri oluşturur. Dünyadaki teknolojik ve finansal gelişmelere bağlı olarak rüzgar türbini fiyatları değişmektedir. 2000 ile 2002 yılları arasında türbin fiyatları 700 ABD doları/kW iken 2009 yılında ABD'de 1.500 ABD doları/kW, Avrupa da ise 1.800 ABD doları/kW olmuştur. 2011 yılında ise türbin fiyatlarının gerileyerek ortalama 1.470 ABD doları/kW olarak gerçekleşmiştir. Son yıllarda rüzgar türbini fiyatlarının düştüğü gözlenmektedir. 2004 – 2012 yılları arasında dünyadaki rüzgar türbini fiyat değişimi Şekil 2.11'de görülmektedir[51].



**Şekil 2.11.** 2004 - 2012 yılları arasında rüzgar türbini fiyat değişimi [51]

Rüzgar enerjisi santrali yatırımlarının yatırım öncesinde yatırım maliyetleri ufak sapmalarla net olarak belirlenebilir. Rüzgar enerjisi santrali yatırımları teknik ve finansal inceleme şeklinde iki aşamalı olarak analiz edilir. Teknik analiz, sahada en az bir yıl süreyle yapılan rüzgar ölçümleri sonucunda maksimum güç elde edilebilmesi için gerekli türbin modelleri belirlenerek saha yerleşimlerinin yapıp kapasite faktörlerinin belirlenmesi ve ilgili mühendislik raporlarının hazırlanması sürecidir. Finansal analiz, teknik analiz sonrasında gelirler, giderler, amortisman, işletme giderleri gibi kalemler ile finansal projeksiyonların yapılarak nakit akışının belirlenerek yatırımın ekonomik uygunluğunun incelendiği süreçtir[52].

Teknik ve finansal analiz sonucunda yatırımın öz kaynak ile mi yoksa dış finansman ile mi yapılacağı kararı verilir. Hiçbir projeye detaylı teknik ve finansal analizi yapılmadan hesaplanan belli başlı ekonomik hesaplamalarla yatırım yapmak gerçekçi değildir. Doğru bir yatırım kararı vermek için mevcut enerji potansiyeli üzerinden yatırımın karlılığı ve net geri dönüşü finansal hesaplamaları iyi yapılmalıdır[52].

### 2.4.1. Sermaye Yatırım Maliyeti

Rüzgar türbininden elektrik üretimi için bir çok bileşenin bir arada olması gerekir. Kule, generatör, redüktör, rotor kanadı, kontrol üniteleri, sensörler, yıldırımdan koruma ilk aşamada akla gelen bileşenlerdir. Üretilen elektrik enerjisini şebekeye iletebilmek için kablolar, transformatörler, kesiciler, koruma röleleri, enerji iletim hatları, arazi, ulaşım yolları ve montaj diğer aşamadaki bileşenlerdir. Bütün bu bileşenlerin sermaye yatırımlarının iyi bir mühendislik çalışmasının yanında finansal çalışmasının da yapılması gerekir[53].

Bir rüzgar enerjisi santrali yatırım maliyetleri şu şekilde sınıflandırılabilir[54];

- Danışmanlık ve proje hazırlama maliyetleri: Sahada gerekli rüzgar ölçümlerinin yapılması, gerekli izinlerin alınması, projelendirme ve mühendislik hesaplamalarının yapılması ile ilgili maliyetlerdir.
- İnşaat işleri maliyetleri: Rüzgar türbini temellerinin yapılması, yolların yapılması, binaların yapılması gibi sahadaki inşaat işleri ile ilgili maliyetlerdir.
- Türbin ve montaj maliyetleri: Türbin kanadı, generatör, kule gibi türbini oluşturan parçaların üretimi, sahaya nakli ve saha montajı ile ilgili maliyetlerdir.
- Elektrik şebekesine bağlantı maliyetleri: Rüzgar enerjisi santralinin elektrik şebekesine bağlantısı için gerekli olan transformatör, trafo merkezi, kablo, enerji nakil hattı gibi malzemelerin temini ve saha montajı ile ilgili maliyetlerdir.
- Diğer yatırım maliyetleri: SCADA(Denetleme, Kontrol ve Veri Toplama) sistemi gibi kontrol ve izleme sistemlerinin kurulması ve diğer maliyet kalemleridir.

Çizelge 2.8'de 2006 yılında Avrupa'da kurulumu yapılan 2 MW gücündeki bir rüzgar enerjisi santrali sermaye yatırım maliyetini içeren kalemlerin rakamsal olarak maliyetleri ve toplam maliyet içerisindeki yüzdesel oranları yer almaktadır[54].

Çizelge 2.9’da orta büyüklükte güce sahip bir rüzgar enerjisi santrali yatırım maliyetini oluşturan kalemlerin toplam maliyet içerisindeki yüzdesel oranları görülmektedir[55].

**Çizelge 2.8.** 2006 yılında Avrupa’da kurulumu yapılan 2 MW rüzgar santralinin yatırım maliyeti kalemleri [54]

	Yatırım (1000 €/MW)	Toplam maliyet içerisindeki payı (%)
Türbin	928	75,6
Şebeke bağlantısı	109	8,9
Temeller	80	6,5
Arazi kirası	48	3,9
Elektrik bağlantıları	18	1,5
Danışmanlık	15	1,2
Finansal maliyetler	15	1,2
Yol yapımı	11	0,9
Kontrol sistemleri	4	0,3
TOPLAM	1.227	100

**Çizelge 2.9.** 2009 yılında Avrupa’da kurulan orta büyüklükte güce sahip bir rüzgar enerjisi santrali bileşenleri yatırım maliyeti oranları [55]

	Toplam maliyet içerisindeki payı (%)
Türbin	68 – 84
Şebeke bağlantısı	2 – 10
Temeller	1 – 9
Elektrik bağlantıları	1 – 9
Arazi	1 – 5
Finansal maliyetler	1 – 5
Yol yapımı	1 – 5
Danışmanlık	1 – 3

Rüzgar enerjisi santrali yatırım maliyetleri ülkeden ülkeye, bölgeden bölgeye ve yatırım projesinin büyüklüğüne göre farklılık gösterebilir. 2011 yılına ait verilere göre kurulan bir rüzgar enerjisi santrali ortalama yatırım maliyetleri şu şekilde gerçekleşmiştir: Çin'de 1.114 ile 1.273 ABD doları/kW, Danimarka'da 1.600 ile 1.700 ABD doları/kW, Japonya'da 3.900 ABD doları/kW, Norveç'te 1.900 ile 2.000 ABD doları/kW, Amerika Birleşik Devletleri'nde 2.100 ABD doları/kW'dır. Amerika Birleşik Devletlerinde kurulan 0 ile 5 MW aralığında güce sahip bir santral için yatırım maliyeti 2500 ABD doları/kW, 5 ile 20 MW aralığında güce sahip bir santral için yatırım maliyeti 2300 ABD doları/kW, 20 MW ve üzeri güce sahip bir santral için yatırım maliyeti 2100 ABD doları/kW'dır[56].

#### **2.4.2. Değişken Maliyetler**

Rüzgar türbinlerinin de diğer endüstriyel cihazlar gibi belli periyotlarda bakımlarının yapılması gerekir. Rüzgar türbinlerinin işletme ve bakım maliyetleri konvansiyonel tip elektrik üretim tesisleri ile kıyaslandığında daha düşüktür. Bir rüzgar enerjisi santrali yatırımındaki en önemli değişken maliyet kalemleri şu şekilde sınıflandırılabilir[54];

- İşletme ve bakım maliyeti: Rüzgar enerjisi santralinin işletilmesi, elektrik ve mekanik aksamın düzenli olarak bakımının yapılması, gerektiğinde onarılması ve değiştirilmesi için yapılması gereken faaliyetlere ait maliyetlerdir.
- Arazi ve trafo merkezi maliyetleri: Rüzgar santralinin kurulu olduğu arazinin kiralık olması durumundaki yıllık kira ve elektrik şebekesine bağlanmak için ilgili idareye ödenen bağlantı ücretlerine ait maliyetlerdir.
- Sigorta ve vergi maliyetleri: Rüzgar enerjisi santralinin sigortalanması ve üretilen elektrik enerjiden sağlanan kazancın vergilerine ait maliyetlerdir.
- Yönetim ve denetim maliyetleri: Rüzgar enerjisi santralinin yönetilmesi için gerekli olan idari faaliyetler, tahmin hizmetleri ve uzaktan kontrol ölçüm hizmetleri gibi maliyetlerdir.

Değişken maliyetler sabit maliyetler gibi tahmin edilmesi kolay olmayan maliyetlerdir. Değişken maliyetler ülkeden ülkeye değiştiği gibi rüzgar santrali sahalarının yerlerine göre de değişiklik göstermektedir[54]. Değişken maliyetlerle ilgili olarak genelleme yapacak kadar yeterli veri henüz bulunmamaktadır. Ancak mevcut veriler ışığında 1980 yılından günümüze işletme ve bakım maliyetlerinin azaldığını söylemek mümkündür[56]. Çizelge 2.10'da 60 MW gücündeki bir rüzgar enerjisi santraline ait yıllık değişken maliyetlerin rakamsal ve yüzdesel oranları yer almaktadır.

**Çizelge 2.10.** 60 MW gücündeki bir rüzgar enerjisi santraline ait yıllık değişken maliyetlerin rakamsal miktarı ve yüzdesel oranları [49]

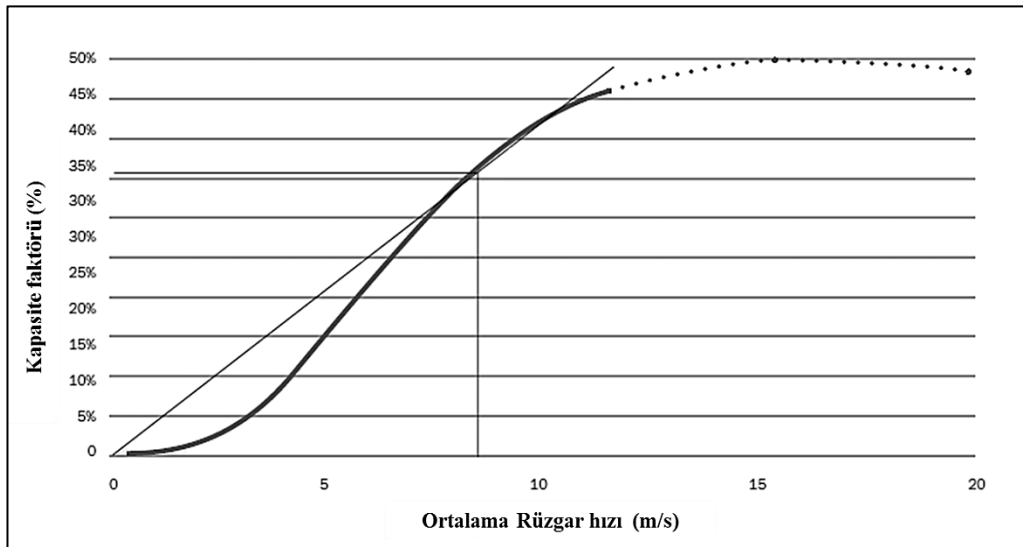
Değişken Maliyetler	Miktar (\$/yıl)	Toplam maliyet içerisindeki payı (%)
Parça ve işçilik	1.381.000	70,3
Sigorta	135.000	6,9
Beklenmedik durumlar	100.000	5,1
Arazi kirası	90.000	4,6
Vergiler	68.000	3,5
İletim hattının bakımı	80000	4,1
Diğer	111.000	5,6
<b>TOPLAM</b>	<b>1.965.000</b>	<b>100</b>

Çizelge 2.8'de verilen sermaye yatırım maliyetleri projeden projeye ve ülkeden ülkeye farklılık gösterebilir. Çizelge 2.10'da verilen yıllık işletme ve bakım maliyetleri ise değişkenliğin en fazla olduğu kalemdir. Projedeki türbin sayısından, ulaşım yollarına, arazinin kime ait olduğundan, sahanın bulunduğu bölgenin coğrafi yapısına kadar birçok faktör yıllık işletme ve bakım maliyetlerini etkilemektedir. Genel olarak ilk yatırım esnasında yıllık işletme ve bakım maliyeti hesaplanırken ilk yatırım maliyetinin %3'ü oranında bir tutar varsayım olarak alınır[49].



### 2.4.3. Kapasite Faktörünün Maliyete Etkisi

Bir rüzgar enerjisi santralının üreteceği elektrik enerjisi miktarı santralin bulunduğu bölgedeki rüzgar rejimine bağlıdır. Bazı yıllar rüzgar rejimi sabit olabileceği gibi azalabilir veya artabilir. Rüzgar hızı iki katına çıktığında rüzgardan elde edilebilecek güç üç kat artar. Pratikte her rüzgar türbini modeli her rüzgar rejimi için uygun değildir. Rüzgar türbinlerinin güç eğrileri de yıllık enerji üretim miktarını hesaplamak için yeterli değildir. Yıllık enerji üretimini hesaplayabilmek için rüzgar hızı verileri ve bu rüzgar hızı verilerine göre hangi türbinin ne kadar enerji ürettiği bulunmalıdır[55]. Şekil 2.12'deki grafikte bir rüzgar türbininin yıllık enerji üretimi hesaplamasında kullanılan ortalama rüzgar hızı dağılımı ve kapasite faktörü grafiği yer almaktadır. Maliyet hesaplamalarının hızlı ve kolay olması açısından kapasite faktörü hesaplamasında 2.81 denklemi kullanılır[56].



Şekil 2.12. Bir rüzgar türbini için ortalama rüzgar hızı – kapasite faktörü[55]

Kapasite faktörünün artmasında kule yüksekliğinin veya rotor kanat çapının artmasının etkisi büyüktür. 2002 ile 2003 yıllarındaki rüzgar türbini teknolojisi ile 6 m/s rüzgar hızına sahip bir bölgede %22 kapasite faktörü elde edilmekteydi. Kapasite faktörü ülkeden ülkeye değişmekle beraber Çin'de %25 ve Latin Amerika'da %42

civarındadır. Amerika Birleşik Devletlerindeki yeni teknoloji ile kurulan santrallerde kapasite faktörü %18 ile %53 arasında değişmekle beraber ortalama kapasite faktörü %33'tür[56].

Bir rüzgar santrali yatırımının karlılığını hesaplamak için sadece kapasite faktörleri ile karşılaştırma yapmak doğru bir çözüm değildir. Bölgenin rüzgar dağılımının da iyi irdelenmesi gerekir. Bir rüzgar enerjisi santrali yatırımı yaparken bölgenin rüzgar rejimine uygun rotor kanat çapına ve generatöre sahip rüzgar türbinin seçilmesi ekonomik açıdan en uygun yöntemdir. Bir başka deyişle kapasite faktörü ve bölgenin rüzgar rejimi birlikte değerlendirilmelidir. Küçük güçte bir türbin seçerek yatırım maliyeti azalacakmış gibi görünse de, daha büyük güçte türbin kullanılarak elde edilen elektrik enerjisi satışından gelecek gelir daha fazladır ve yatırımın karlılığını etkiler[55].

#### **2.4.4. Üretilen Elektrik Enerjisinin Yıllara Yayılmış Maliyeti**

Rüzgar türbininden üretilen elektrik enerjisinin maliyeti yatırım öncesinde akla gelen ilk sorudur. Bunun için öncelikle ortalama rüzgar hızı, rüzgar türbini güç eğrisine göre karakteristikleri, yatırım maliyetleri, ihtiyaç duyulan verimlilikteki türbinin tedarigi, işletme ve bakım maliyetlerinin bilinmesi gerekir. Bu bilgiler temel finansal hesaplamalara başlamak için yeterlidir. Birçok durumda temel hesaplamaların yanı sıra üretilen enerjiden elde edilecek gelir ile yatırımın geri dönüş süresi veya amortisman süresi de hesaplanmalıdır[47].

Yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyeti bir rüzgar enerjisi santral yatırımının ekonomikliğinin tanımlandığı ana parametredir. Bir başka deyişle, nakit akışlarının ortak bir yıla indirgenmiş bir rüzgar enerjisi santrali yatırımının ömrü boyunca tüm maliyetlerin toplamıdır. Yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyeti ana bileşenleri sermaye maliyeti, işletme ve bakım maliyetleri ve tahmin edilen yıllık enerji miktarıdır[51].

Rüzgar türbinden üretilen elektrik enerjisinin maliyet analizini yapmak için yıllık yatırım maliyetini yıllık enerji üretimi miktarına bölmek gerekir. Yıllık yatırım maliyetini bulmak için uygun bir katsayı kullanarak sermaye yatırımı öngörülen yatırım süresince hesap dışında tutulmalı ve sonra tahmin edilen yıllık işletme ve bakım maliyetleri eklenmelidir. Borç ile finanse edilen bir rüzgar yatırımı için, sermaye maliyeti uygun bir sermaye geri dönüş (SGDF) faktörü kullanarak yıllara yayılmış olarak hesaplanır. Sermaye geri dönüş faktörü  $i$  faiz oranı ve  $n$  borçlanma süresine bağlıdır. Böyle bir borcun sermaye geri dönüş faktörü ve yıllık borç geri ödeme miktarı[49];

$$SGDF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2.82)$$

$$YBBGM = BBM.SGDF = BBM. \left[ \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (2.83)$$

şeklinde ifade edilir. Burada;

$YBBGM$ : Banka borcu yıllık geri ödeme miktarı (TL/yıl)

$BBM$ : Banka borç miktarı (TL)

$i$ : Faiz oranı (ondalıklı olarak %10 için 0,10 gibi)

$n$ : Borç ödeme süresi(yıl)

Finansal hesaplamaların hassasiyeti istenirse daha da artırılabilir. Büyük rüzgar santrali yatırımlarında sermaye maliyetleri öz kaynak oranında bölünür ve yatırımcı uygun bir oranda yıllık geri dönüş miktarını almak ister. Bu durumda elektrik enerjisi maliyet fiyatı hesaplanırken alınan borç ve öz kaynak oranı da göz önünde bulundurulur. Ayrıca gelir vergisi, diğer vergiler, enflasyon, amortisman gibi diğer faktörlerde finansal hesaplamaların içine katılır. Yatırımın tümü borçla yapılmayacak, bir kısmı öz kaynak ile karşılanacaksa ayrıca öz kaynak için istenilen yıllık geri ödeme miktarı da hesaplanır[49]. Bu durumda;

$$YÖKGM = GDY \times ÖKM \quad (2.84)$$

olur. Burada;

*YÖKGM*: Öz kaynak yıllık geri ödeme miktarı (TL/yıl)

*GDY*: Öz kaynak geri dönüş yüzdesi (ondalıklı olarak %10 için 0,10 gibi)

*ÖKM*: Öz kaynak miktarı (TL)'dir.

Yıllık işletme ve bakım masraflarının da hesaplama katılması durumunda toplam borcun yıllık geri ödeme miktarı (*YBGÖM*);

$$YBGÖM = YBBGM + YÖKGM + YİBM \quad (2.85)$$

şeklinde hesaplanır. Burada *YİBM* yıllık bakım ve işletme masraflarıdır. 2.81 denklemi ile hesaplanan türbin kapasite faktörü ile yıllık üretim süresi çarpılarak rüzgar türbininin bir yıl boyunca üreteceği enerji miktarı bulunur. Yıllık borç geri ödeme miktarının rüzgar türbini yıllık enerji üretimi miktarına bölünmesiyle de üretilen elektrik enerjisinin yıllara yayılmış maliyeti bulunur[49].

$$YEÜM = K_F \times 8760 \quad (2.86)$$

$$YYEMF = \frac{YBGÖM}{YEÜM} \quad (2.87)$$

Burada *YEÜM* yıllık enerji üretim miktarı (kWh), *YYEMF* yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı(TL/kWh) dır.

Rüzgar enerjisinden en ekonomik şekilde elektrik enerjisi üretmek için rüzgar rejimine uygun doğru türbin seçiminin yanında fizibilite analizi gibi birçok hesaplamanın da doğru bir şekilde yapılması gerekir. Yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet hesaplaması, değişik miktarda öz kaynak ve değişik geri dönüş süreleri dahil edilerek yatırım alternatiflerinin karşılaştırılmasının yapıldığı bir tekniktir. Farklı finansal teknikler de yatırımın ekonomiklik karşılaştırması için kullanılabilir[57].

### 3. UYGULAMA

Bu çalışmada, Rayleigh istatistiksel yöntemi kullanılarak bir bölgenin rüzgar enerjisi potansiyeli, kullanılmak istenen üç farklı türbin ve/veya kule yüksekliğindeki olasılık yoğunluk fonksiyonları, her bir türbin için enerji üretimi miktarı ve kapasite faktörü ile maliyet hesaplamalarını yapan bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Bu program dört aşamalı olarak planlanmış ve Profilab-Expert 4.0 yazılımı kullanılarak hazırlanmıştır. Profilab-Expert 4.0 yazılımı program geliştirmenin yanı sıra çeşitli donanım aygıtlarını kontrol etmeye imkan vermektedir. Bu nedenle Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler biriminin 2012/111 numaralı proje kapsamında satın aldığı deney seti ile uygulama yapılabilmesi geliştirilen programın bir parçası olarak düşünülmüştür. Hazırlanan program ile yapılan analiz çalışmalarında Meteoroloji Genel Müdürlüğü Muğla ili Datça ilçesi 2010 yılı günlük ortalama rüzgar hızı verileri kullanılmıştır.

Rüzgar enerjisi analiz programı hazırlanmaya başlamadan önce Profilab-Expert 4.0 yazılımı çeşitli kaynaklardan araştırılmıştır. Yazılımın yardım dosyası kullanılarak program yazma yöntemleri, araç kutusunun ve programlama elemanlarının özellikleri ve nasıl kullanılacağı, analog giriş çıkışların nasıl kullanılacağı, programlama sonrasında derlemenin nasıl yapılacağı, deney seti ile haberleşmenin ve programda gerekli olan düzenlemelerin nasıl yapılacağı öğrenilmiştir. Daha sonra uygulama için kullanılacak mevcut deney setinin çalışma şekli incelenmiştir. Deney setinde kullanılan elemanların özellikleri araştırılmıştır. Deney setinin yapısal özelliklerinin sınırlayıcı olması nedeniyle Profilab-Expert 4.0 yazılımında hazırlanan programın dördüncü aşaması deney seti ile yapılabilecek uygulama yapma imkanına göre düzenlenmiştir.

Profilab-Expert 4.0 yazılımında hazırlanan rüzgar enerjisi analiz programının yazımı bittikten sonra Muğla ili Datça ilçesi 2010 yılı ortalama günlük rüzgar hızı verileri kullanılarak çalışma yapılmıştır. Hazırlanan programın birinci bölümünde Muğla ili Datça ilçesi için rüzgar enerjisi potansiyeli hesaplanmıştır. Geliştirilen programın ikinci bölümünde Enercon marka E-48 ve E-53 modeli türbinler için farklı kule

yüksekliği ve farklı rotor çapının Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonlarına etkisi ve türbinlerin yıllık enerji üretim miktarı hesaplanmıştır. Programın üçüncü bölümünde Enercon marka türbinler için kapasite faktörü ve ekonomiklik hesaplamaları yapılmıştır. Geliştirilen program ile Enercon marka türbinler için yapılan ikinci ve üçüncü aşama teorik hesaplamalar deney setine ait rüzgar türbini için de yapılmıştır. Geliştirilen programın dördüncü aşamasında deney setine ait rüzgar türbininin giriş verisi olan rüzgar hızlarının farklı türbin yükseklikleri için program aracılığıyla simüle edilmesi yöntemiyle deney seti ile uygulama yapılmıştır.

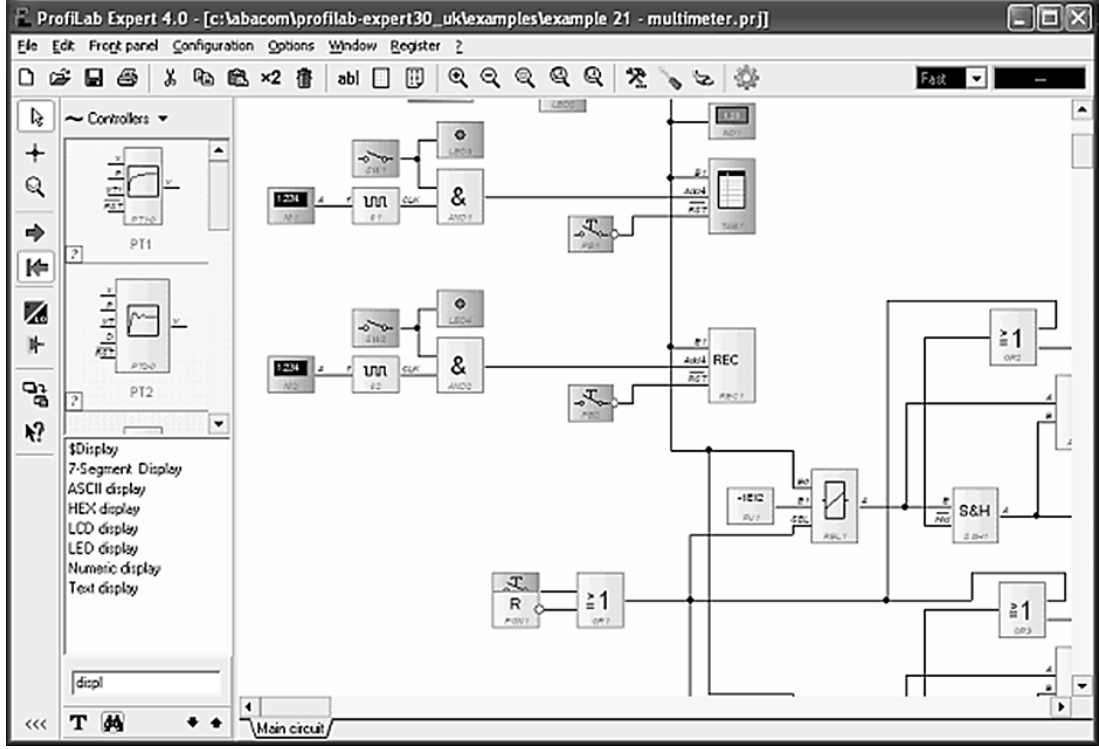
### **3.1. Profilab Expert 4.0 Yazılımı ve Rüzgar Türbini Deney Seti**

Profilab-Expert 4.0 yazılımı dijital ve analog kontrol ile ölçme teknolojileri tabanlı proje geliştirilmesine izin veren bir yapıya sahiptir. Yazılımın çalışma prensibi sadece satır satır programı oluşturmaktan ziyade bir çizim ve kablolama temeline dayanmaktadır. Projelerde kullanılan anahtarlar, ekranlar, kontrol elemanları kolayca eklenebilir veya çıkarılabilir. İstenirse adım adım programlama yapılabilir. Şekil 3.1’de örnek bir program görülmektedir[58].

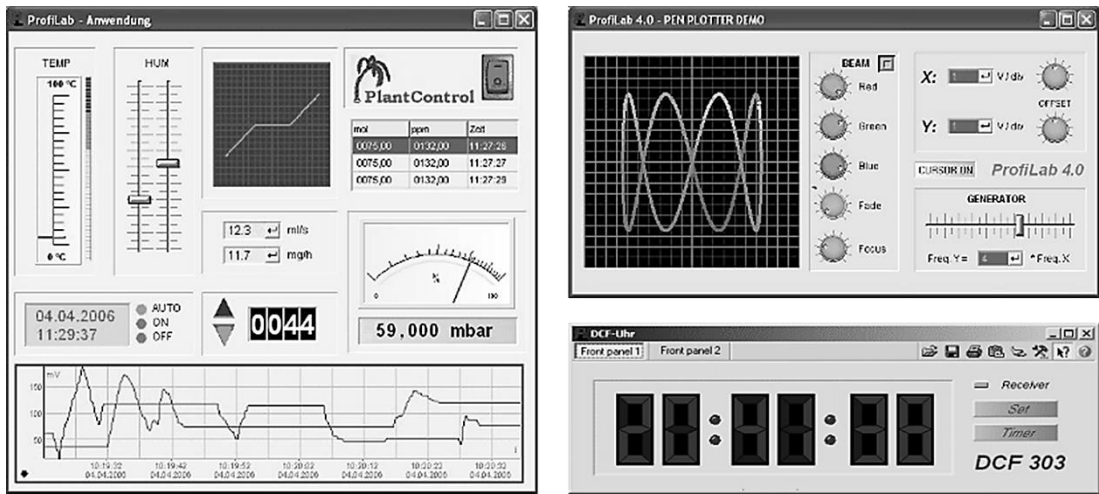
Profilab-Expert 4.0 yazılımında programlamanın yapılabilmesi için aritmetik ve lojik elemanlardan oluşan bir kütüphane bulunmaktadır. Lojik kapılar, darbe üreteçleri, flip-flop, sayıcı gibi lojik elemanlar ile tetikleme, formüller, saatler gibi aritmetik elemanlar kullanılarak çeşitli projeler için program geliştirilebilir. Y(t) çizici, XY çizici, veri kaydedici, tablo gibi elemanlar ile program sonuçları görüntülenebilir veya ölçüm sonuçları kaydedilebilir[58].

Profilab-Expert 4.0 da hazırlanan program ile gerçek zamanlı olarak simülasyon yapılabilir. Yazılan programda istenen bütün ölçüm değerleri daha önce belirlendiği şekilde görüntülenebilir veya işlenebilir. Simülasyon istenilen anda durdurulup gerekli düzenlemeler yapılabilir. Simülasyonda kullanılacak anahtar, potansiyometre gibi kontrol elemanları ile çiziciler, ölçüm cihazları, tablo gibi ekran elemanları yazılım tasarımının ön panel olarak tanımladığı ayrı bir pencerede görüntülenir. Hazırlanan programa ait simülasyon ön panel kullanılarak kontrol edilir. Ön panel

tümüyle hazırlanan programa göre istenildiği gibi tasarlanabilen bir yapıya sahiptir. Şekil 3.2’de farklı programlara ait ön panel örnekleri yer almaktadır[58].



Şekil 3.1. ProfiLab-Expert 4.0 yazılımı ile geliştirilmiş örnek bir program[58]



Şekil 3.2. Farklı programlara ait ön panel örnekleri[58]

Profilab-Expert 4.0 yazılımının önemli bir özelliği de çeşitli donanım aygıtları ile birlikte kullanılabilmesidir. Multimetre, elektronik kartlar, harici cihazlar gibi çeşitli donanım aygıtlarını Profilab-Expert 4.0 yazılımı desteklemektedir. Her bir donanım aygıtı programda normal bir eleman olarak görülmekte ve programlama esnasında kablolama yöntemiyle bağlantısının yapılması ve eleman özelliklerinin ayarlanması yeterli olmaktadır. Böylece simülasyon esnasında donanım aygıtları program ile birlikte çalışmakta ve istenildiği gibi kontrol edilebilmektedir[58].

Profilab-Expert 4.0 yazılımı ayrıca bir derleyici içermektedir. Bu derleyici sayesinde yazılmış olan programlar tek başına çalışabilen uygulama dosyaları haline getirilebilir. Böylece Profilab-Expert 4.0 programı başka bir bilgisayarda yüklü olmasa bile daha önce yazılmış olan programlar çalıştırılabilir ve istenildiği gibi kopyalanıp dağıtılabılır[58].

Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler biriminin 2012/111 numaralı proje kapsamında satın aldığı deney setinin bu çalışmada kullanılan bileşenleri şu şekildedir;

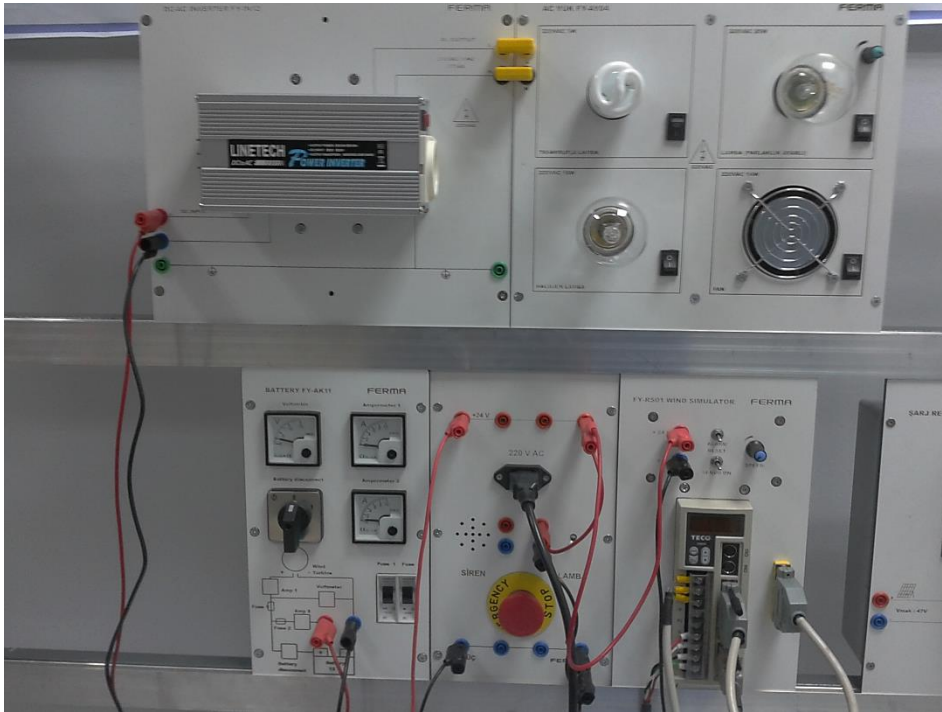
- 400W rüzgar türbini
- 400W servo motor ve sürücüsü
- DA-AA evirici
- Batarya
- AA yük
- USB ara yüz modülü

Deney seti bileşenlerinin teknik özellikleri Ek 1’de yer almaktadır. Deney setine ait rüzgar türbini ve servo motor bağlantısı Şekil 3.3’de görülmektedir. Deney setine ait DA-AA evirici, AA yük, ölçüm cihazları ve servo motor sürücü bağlantısı Şekil 3.4’de görülmektedir.





Şekil 3.3. Deney setine ait rüzgar türbini ve servo motor bağlantısı

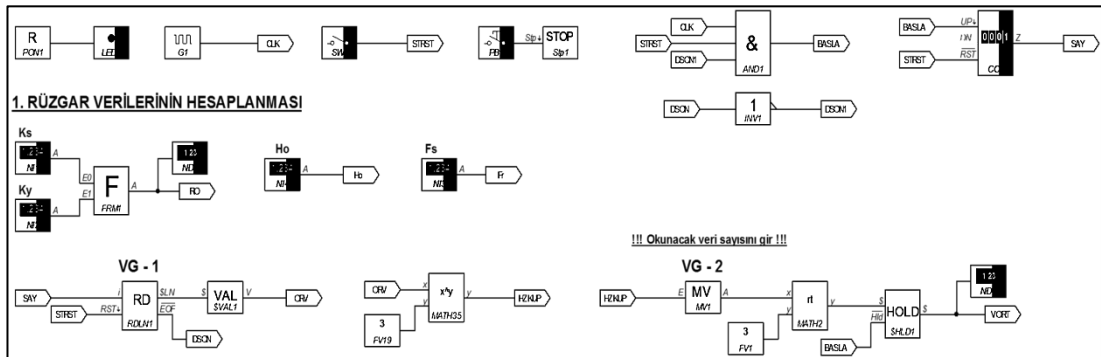


Şekil 3.4. Deney setine ait DA-AA evirici, AA yük, ölçüm cihazları ve servo motor sürücüsü bağlantısı

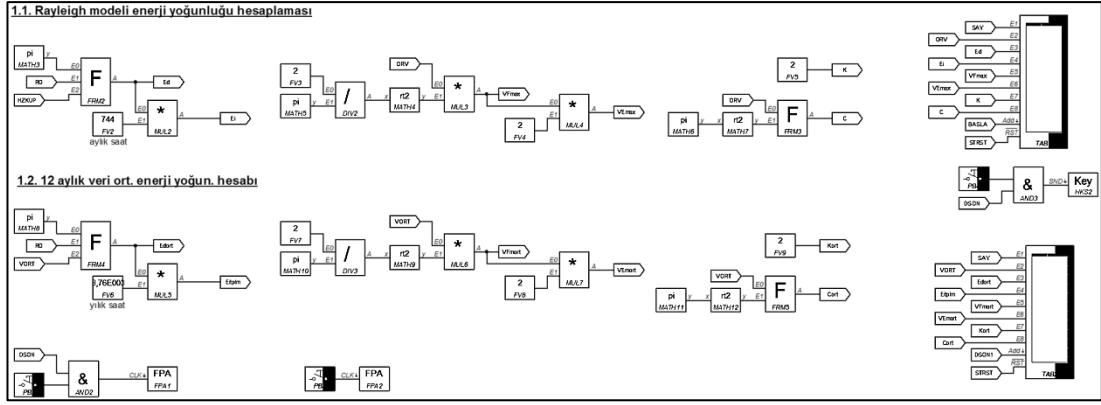
### 3.2. Profilab Expert 4.0 Yazılımı ile Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Analiz ve Uygulama Programı Geliştirilmesi

Profilab Expert 4.0 yazılımında hazırlanan program 4 aşamalı olarak planlanmıştır. İlk olarak rüzgar türbini kurulmak istenen bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelinin hesaplamasını yapan program bölümü yazılmıştır. İkinci aşama olarak farklı karakteristiğe sahip üç türbin ile Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonlarının ve türbinlerin enerji üretim miktarı ve verimlerinin hesaplandığı program bölümü yazılmıştır. Üçüncü aşamada seçilen türbinlerin kapasite faktörü ve ekonomiklik hesaplamasının yapıldığı program bölümü yazılmıştır. Dördüncü aşamada ise rüzgar enerjisi hesaplaması yapılan bölgenin rüzgar hızlarının simüle edilerek deney setine ait rüzgar türbininin enerji üretimi verimliliğinin pratik olarak incelendiği uygulama için programın son bölümü yazılmıştır.

İlk olarak bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelinin hesaplandığı programın birinci bölümü yazılmıştır. Şekil 3.5’de görülen program parçacığında 2.9 denklemi kullanılarak hava yoğunluğu hesaplanması için gerekli kısım yazılmıştır. Bölgeye ait rüzgar hızı verilerini text uzantılı bir dosyaya kaydedilerek, kaydedilen bu rüzgar hızı verilerini program parçacığındaki dosyadan veri okuma elemanı aracılığıyla tek tek okunup her bir rüzgar hızının küp hesaplamasını yapan kısım yazılmıştır. Sonra 2.24 denklemi temel alınarak okunan rüzgar hızı verilerinin ortalamasını hesaplayan program kısmı yazılmıştır.



Şekil 3.5. Veri girişi ve hava yoğunluğu hesaplaması program bölümü

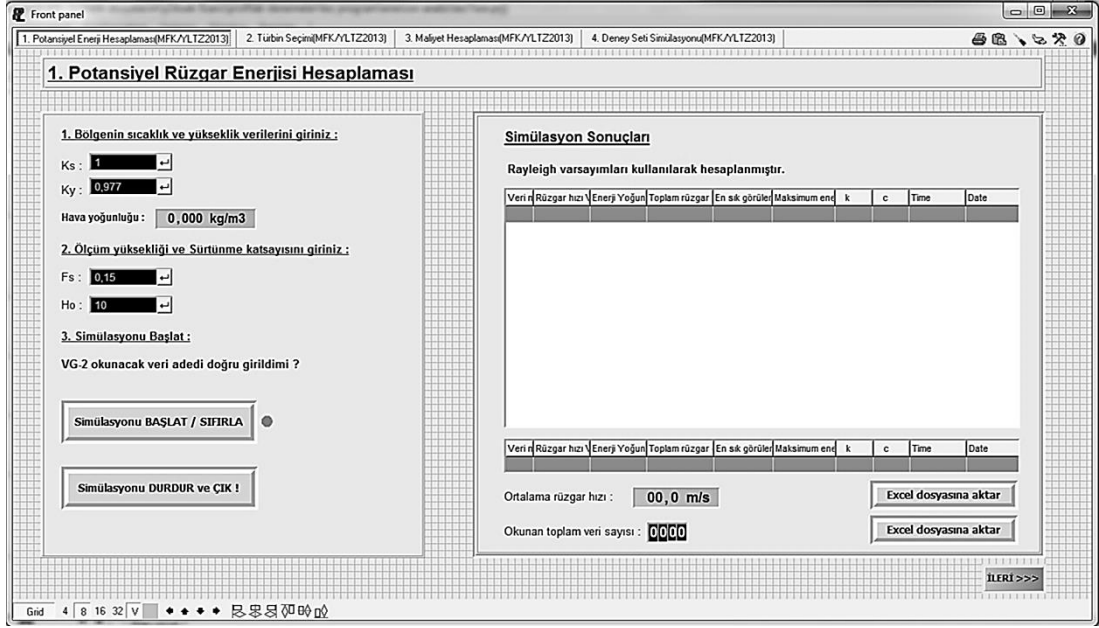


**Şekil 3.6.** Enerji yoğunluğu ve potansiyelinin hesaplandığı program bölümü

Daha sonra Şekil 3.6’da görülen Rayleigh istatistiksel yöntemi ile bölgenin enerji yoğunluğu ve potansiyelinin hesaplandığı program parçacığı yazılmıştır. 2.62 ve 2.63 denklemleri temel alınarak enerji yoğunluğu ve toplam enerji miktarının hesaplamasının yapıldığı kısım yazılmıştır. Hesaplanan ortalama rüzgar hızı verisi ile 2.68 denklemi kullanılarak en sık görülen rüzgar hızının ve 2.73 denklemi temel alınarak enerji üretimine katkı sağlayan rüzgar hızının bulunduğu kısım yazılmıştır. Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonunun  $c$  ölçü parametresinin hesabı için 2.29 denklemi temel alınan program bölümü yazılmıştır.

Hazırlanan programın birinci bölümünde yapılan hesaplamalar için giriş verisinin ortalama aylık rüzgar hızı verileri olduğu kabul edilmiş ve sonrasında yıllık ortalama rüzgar hızı hesaplanarak programın birinci bölümündeki hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplanan bütün verilerin sonuçlarının düzenli bir şekilde görülebilmesi için tablo elemanı kullanılmıştır. Böylece sonuçların ön panelde düzenli bir şekilde görülmesi ve istenildiği takdirde sonuçların tablo şeklinde excel dosyasına aktarılması ve sonuçlara ait grafiklerin otomatik olarak çizdirilmesi sağlanmıştır.

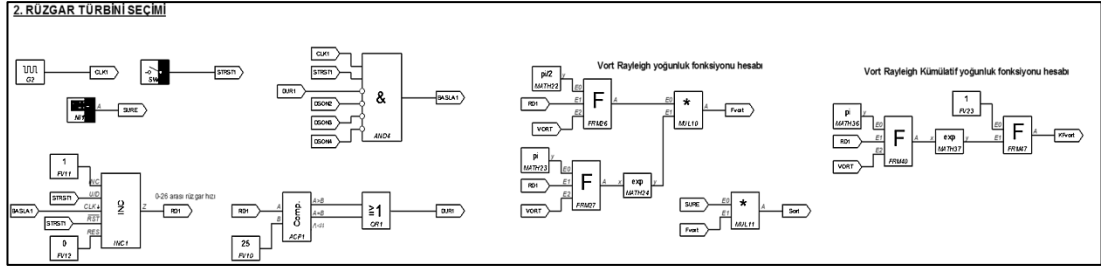
Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’daki programın ilk bölümünün yazımına paralel olarak yazılan programın veri girişlerinin yapıldığı ve hesaplama sonuçlarının çıkış olarak görüldüğü ön panelde gerekli tasarım ve düzenlemeler yapılmıştır. Şekil 3.7’de programın ilk bölümüne ait ön panel görüntüsü yer almaktadır.



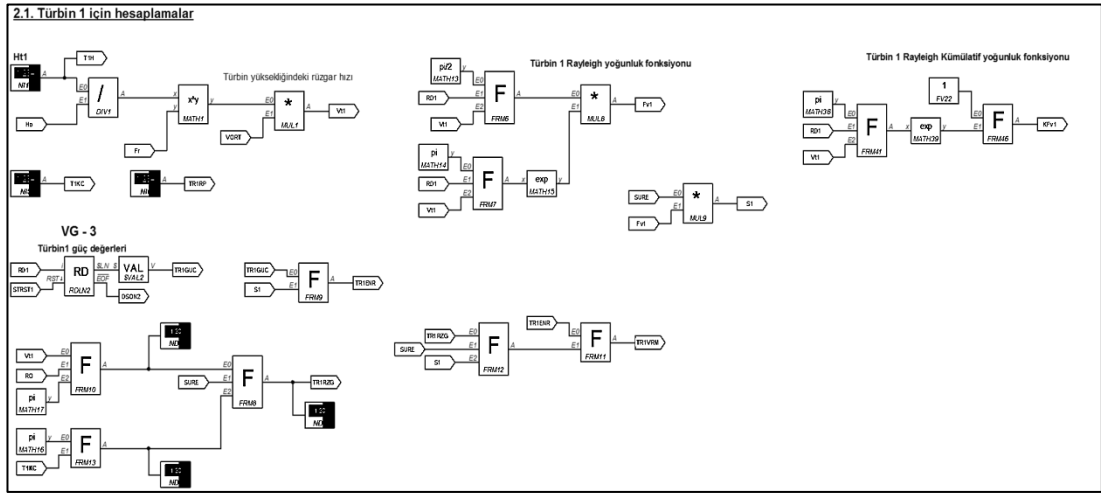
**Şekil 3.7.** Programın ilk bölümüne ait ön panel görüntüsü

Programın birinci bölümü tamamlandıktan sonra farklı karakteristiğe sahip üç türbin ile Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonlarının ve türbinlerin enerji üretim miktarı ve verimlerini hesaplandığı ikinci bölüm yazılmıştır. İlk olarak 2.30 denklemi esas alınarak ortalama rüzgar hızı ile bölgenin rüzgar potansiyelinin Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu hesaplandığı Şekil 3.8’de görülen program parçacığı yazılmıştır.

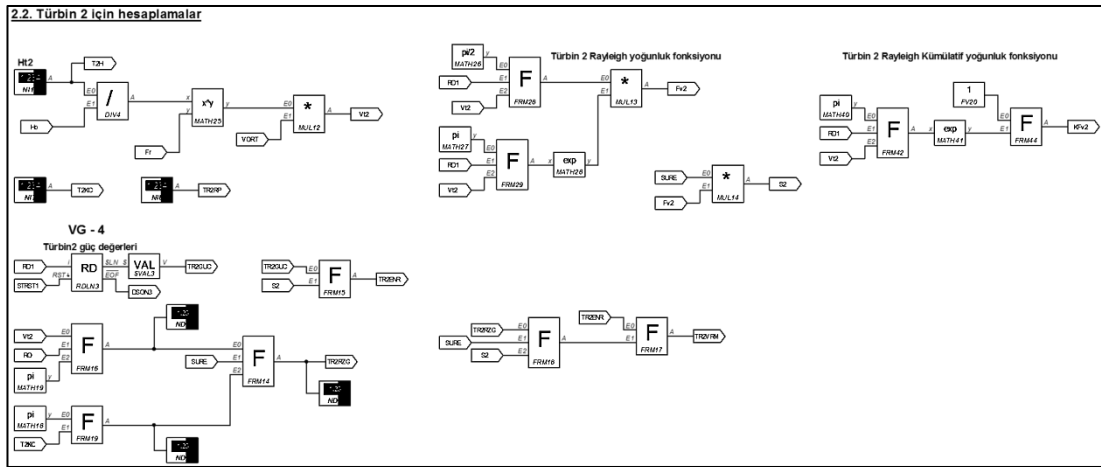
Rayleigh istatistiksel yöntemi ile türbin güç eğrilerinin eşleştirilebilmesi ve her bir türbin için enerji hesaplamalarının yapıldığı program parçacıkları yazılmıştır. Şekil 3.9’da hesaplama yapılması istenen birinci türbin için yazılmış olan program görülmektedir. Burada türbin güç eğrisindeki güç değerlerinin text dosyası formatında kaydedilmesi ve bu dosyanın da dosyadan veri okuma elemanı aracılığıyla okunması sağlanmıştır. Böylece okunan her bir rüzgar hızı verisi için Rayleigh istatistiksel yöntemi kullanılarak yoğunluk fonksiyonu hesaplaması ve türbin enerji üretimi hesaplamaları yapılmıştır.



Şekil 3.8. Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonunun hesaplandığı program bölümü

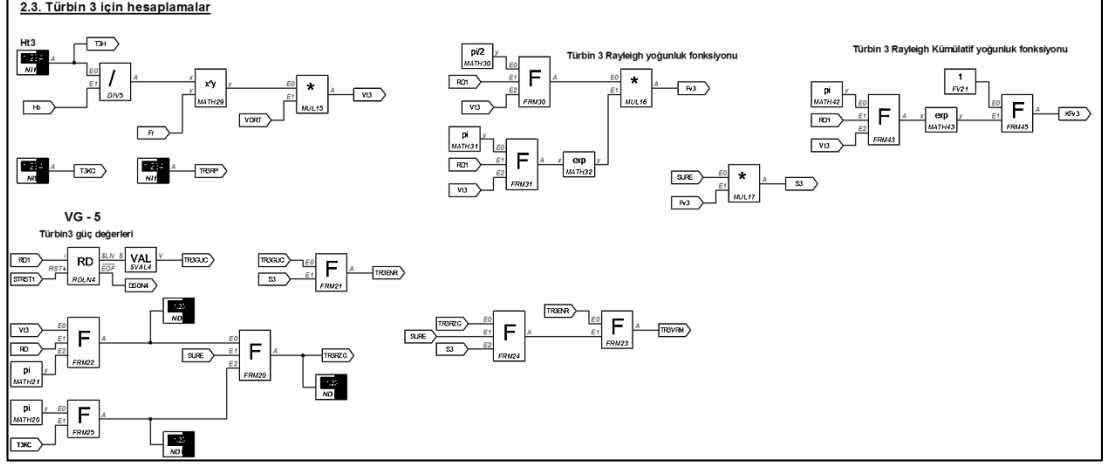


Şekil 3.9. Türbin1 için enerji hesaplamalarının yapıldığı program bölümü



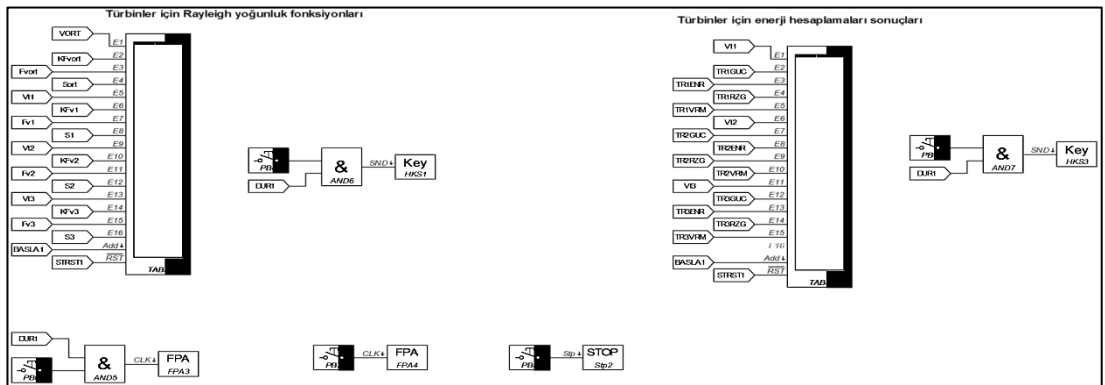
Şekil 3.10. Türbin2 için enerji hesaplamalarının yapıldığı program bölümü

Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de sırasıyla hesaplama yapılması istenen ikinci türbin ve üçüncü türbin için yazılmış olan program kısımları görülmektedir.



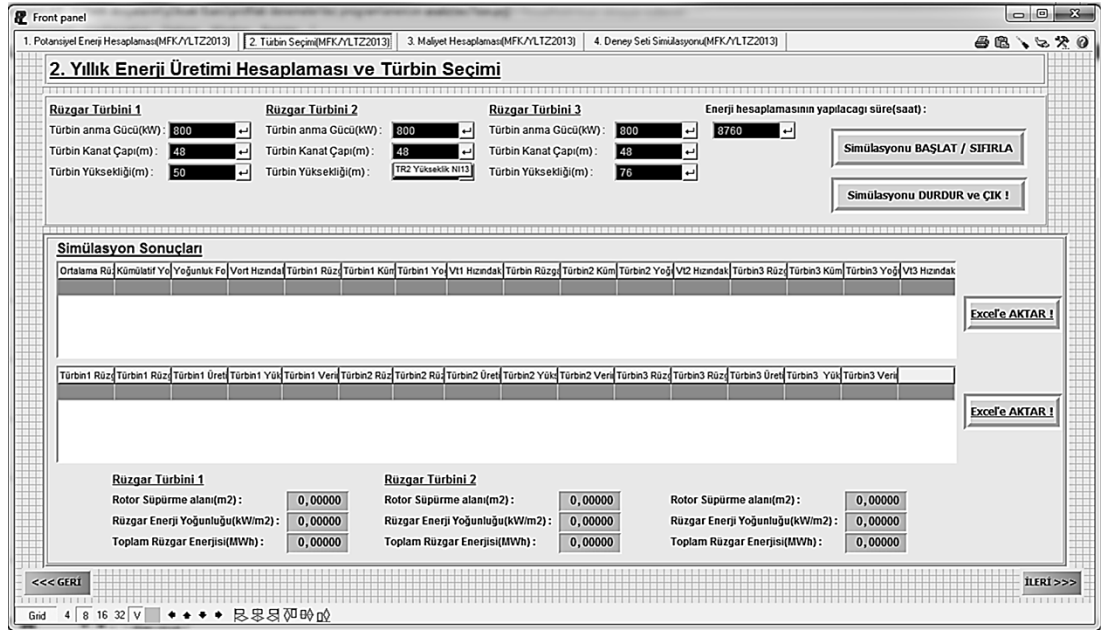
Şekil 3.11. Türbin3 için enerji hesaplamalarının yapıldığı program bölümü

Programın ikinci bölümünde yapılan hesaplamaların sonuçlarının düzenli bir şekilde görülebilmesi için sonuçlar Şekil 3.12’de görülen tablo elemanları için veri girişi olarak kullanılmıştır.



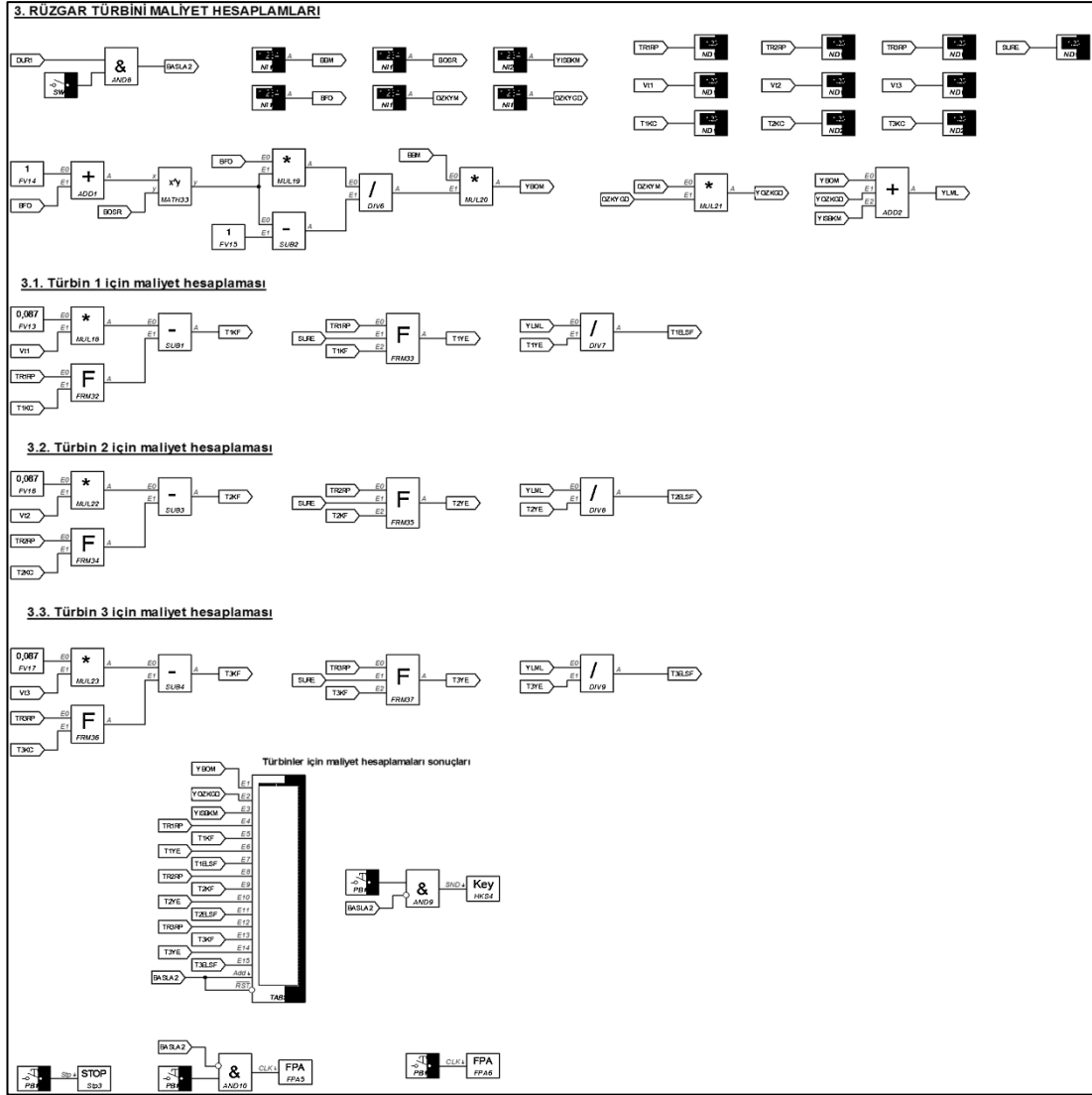
Şekil 3.12. Tablo elemanları için veri girişi program bölümü

İkinci aşamada hazırlanan programa paralel olarak veri girişlerinin yapıldığı ve hesaplama sonuçlarının çıkış olarak görüldüğü ön panelde gerekli tasarım ve düzenlemeler yapılmıştır. Hesaplama sonuçları ön paneldeki tablolarda görüntülenmiş ve istenildiği takdirde excel dosyasına aktarılabilmesi için gerekli düzenlemeler yapılmıştır. Şekil 3.13’de programın ikinci bölümüne ait ön panel görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 3.13. Programın ikinci bölümüne ait ön panel görüntüsü

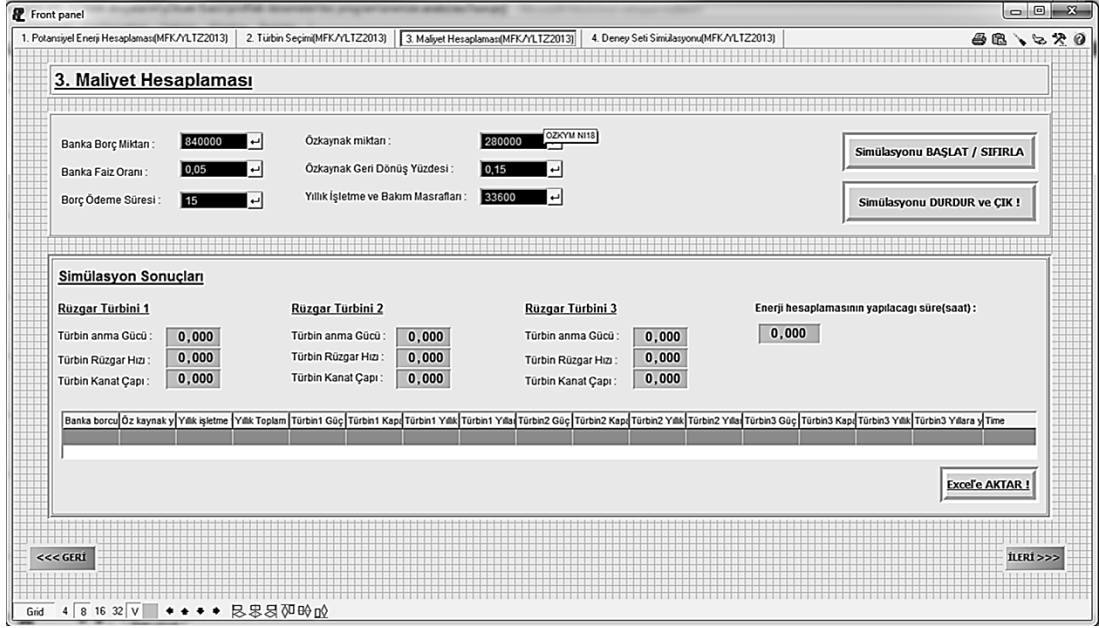
Programın ikinci bölümünün hazırlandıktan sonra ikinci bölümde seçilen türbinlerin ekonomiklik analizinin yapıldığı programın üçüncü bölümü yazılmıştır. Bu bölümdeki hesaplamalar için kapasite faktörü yöntemi kullanılmıştır. Kapasite faktörü hesaplaması için 2.81 denklemi temel alınmıştır. Üretilen elektrik enerjisinin yıllara yayılmış maliyetinin hesaplanabilmesi için 2.82, 2.83, 2.84, 2.85, 2.86, 2.87 denklemleri kullanılarak program parçacıkları yazılmıştır. Şekil 3.14’de her bir rüzgar türbini ekonomiklik analizi için yazılmış program görülmektedir. Hesaplama sonuçları tablo elemanına aktarılarak sonuçların düzenli bir şekilde görüntülenmesi sağlanmıştır.



**Şekil 3.14.** Her bir rüzgar türbini için ekonomiklik analizi program bölümü

Hazırlanan programın üçüncü aşamasına paralel olarak veri girişlerinin yapıldığı ve hesaplama sonuçlarının çıkış olarak görüldüğü ön panelde gerekli tasarım ve düzenlemeler yapılmıştır. Hesaplama sonuçları ön paneldeki tabloda görüntülenmiş ve istenildiği takdirde excel dosyasına aktarılabilmesi için gerekli düzenlemeler yapılmıştır. Şekil 3.15’de programın üçüncü bölümüne ait ön panel görüntüsü yer almaktadır.

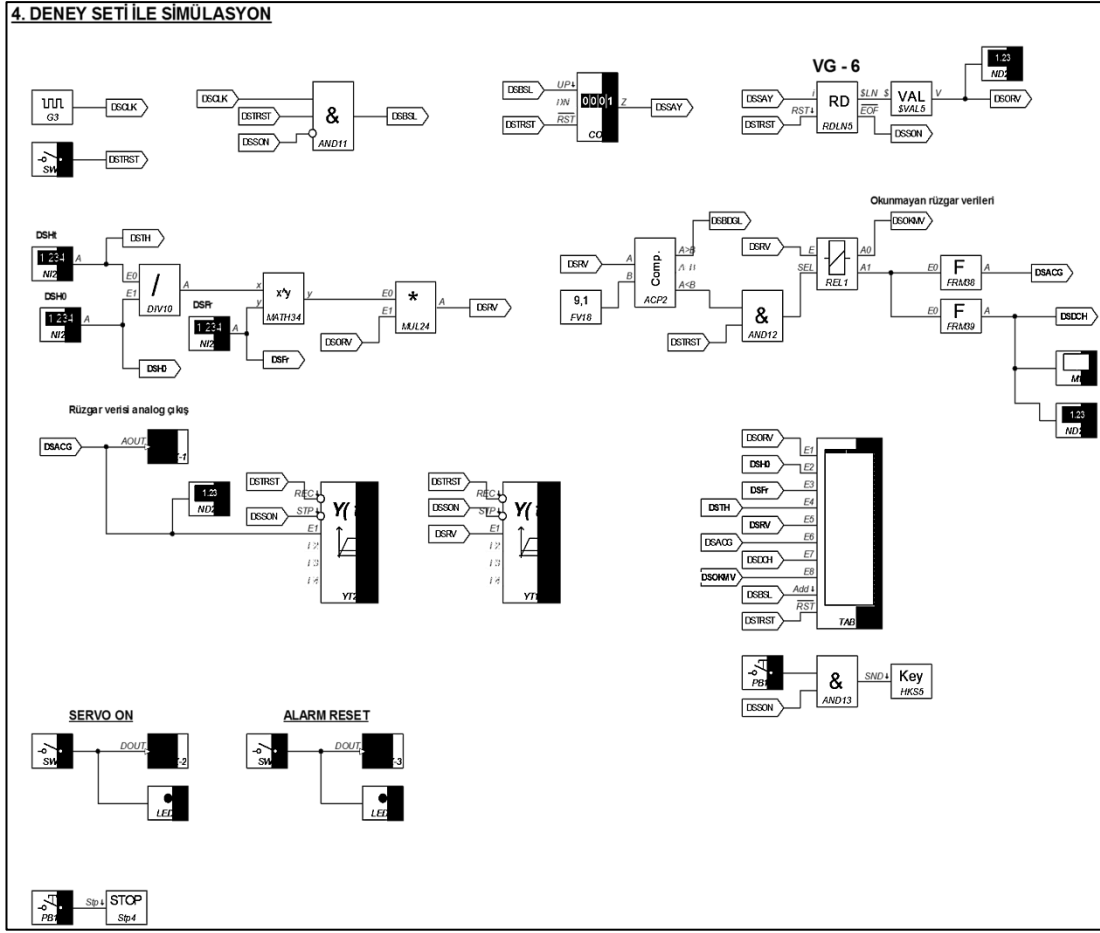




Şekil 3.15. Programın üçüncü bölümüne ait ön panel görüntüsü

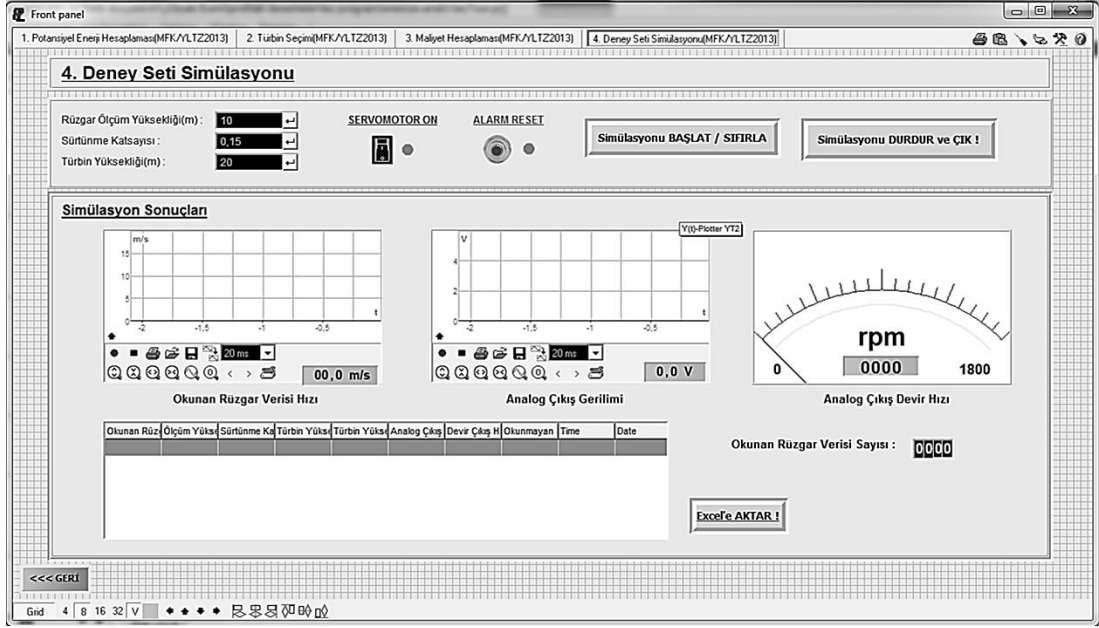
Programın dördüncü bölümü olarak rüzgar enerjisi hesaplaması yapılan bölgenin rüzgar hızlarının simüle edilerek deney setine ait rüzgar türbininin enerji üretimi verimliliğinin pratik olarak incelendiği uygulama kısmı yazılmıştır. Deney setinin laboratuvar ortamında olması nedeniyle rotor kanatları çıkarılmış yerine rüzgar hızlarını simüle edebilmek için servo motor bağlanmıştır. Profilab Expert 4.0 yazılımı bilgisayarda yazılan bir programın haberleşme kablosu ve ara kart üzerinden bir donanımı kontrol etmeye imkan vermektedir.

Deney seti ile uygulama yapabilmek için Şekil 3.16'da görülen program bölümü yazılmıştır. Hazırlanan programın bu bölümünde rüzgar hızı verileri text dosyasından okutulup analog sinyale dönüştürülmüştür. 0-5 V analog sinyal çıkışı bilgisayar ile servo motor sürücü ile haberleşmeyi sağlayan kart üzerinden servo motor sürücüyeye iletilmiştir. Böylece servo motor devir hızı bilgisayar üzerinden kontrol edilmiş ve rüzgar hızlarının simüle edilmesi için kullanılmıştır.



**Şekil 3.16.** Deney seti ile uygulama yapmak için yazılan program bölümü

Programın son bölümünün hazırlanmasına paralel olarak veri girişlerinin yapıldığı ve deney setine gönderilen verilerin görüldüğü ön panelde gerekli tasarım ve düzenlemeler yapılmıştır. Şekil 3.17’de programın dördüncü bölümüne ait ön panel görüntüsü yer almaktadır. Programın son bölümünde hazırlanan ön panel üzerinden servo motor devreye alınabilmekte ve devreden çıkarılabilmektedir.



**Şekil 3.17.** Programın dördüncü bölümüne ait ön panel görüntüsü

Deneysel setinin rüzgar türbini generatörünün maksimum devir hızı değerinin 1.800 rpm ve generatöre bağlı servo motor maksimum devir hızının 3.000 rpm olmasından dolayı simüle edilen rüzgar hızı değeri için hazırlanan programda üst sınırlama getirilmiştir. Böylece deney setinde kullanılan rüzgar türbini ve türbin içerisindeki kontrol devresine ait elektronik kartın olası yüksek servo motor devir hızından dolayı zarar görmesi önlenmiştir.

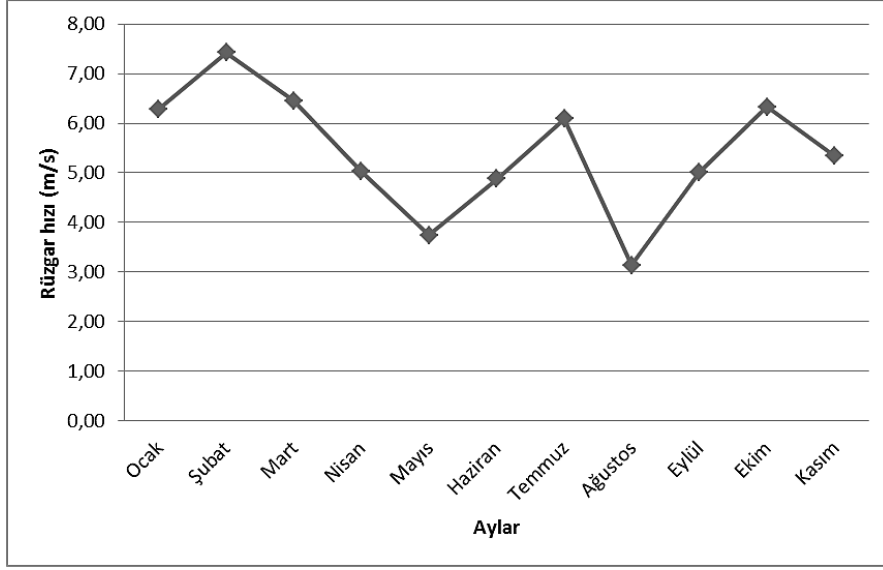
Deneyde de kullanılan rüzgar hızı verileri ve üst değer sınırlaması nedeniyle simüle edilemeyen rüzgar hızı verileri tablo elemanında bir sütuna aktarılmıştır. Böylece simülasyonda kullanılan rüzgar hızı değeri ile kullanılmayan rüzgar hızı değerinin görülmesi sağlanmıştır. İstenildiği takdirde tablo elemanındaki verilerin excel dosyasına aktarılabilmesi için gerekli düzenlemeler yapılmıştır. Hazırlanan programın bu bölümünde simüle edilen rüzgar hızı değerlerine getirilen üst değer sınırlamasının deney sonuçlarını etkileyecek olması nedeniyle deney sonuçları analiz edilirken bu faktörün göz önünde bulundurulması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır.

### 3.3. Datça 2010 Yılı Rüzgar Hızı Verilerinin Geliştirilen Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Analiz Programı ile Simülasyonu

Bölgenin rüzgar enerjisi potansiyeli analizinde Meteoroloji Genel Müdürlüğü Muğla ili Datça ilçesi 2010 yılı günlük ortalama rüzgar hızı verileri kullanılmıştır. Günlük ortalama rüzgar hızı verileri ve 2.24 denklemi kullanılarak aylık ortalama rüzgar hızları hesaplanmıştır. Hesaplanan bu rüzgar hızı verileri Profilab Expert 4.0 yazılımında geliştirilen analiz programında giriş verisi olarak kullanılmıştır. Muğla ili Datça ilçesi için günlük ortalama rüzgar hızları kullanılarak hesaplanmış aylık ortalama rüzgar hızı değerleri Çizelge 3.1’de, bu değerler kullanılarak hazırlanmış rüzgar hızları grafiği ise Şekil 3.18’de görülmektedir.

**Çizelge 3.1.** Datça ilçesi için aylık ortalama rüzgar hızları

Ay	Rüzgar hızı (m/s)
Ocak	6,3
Şubat	7,4
Mart	6,5
Nisan	5
Mayıs	3,7
Haziran	4,9
Temmuz	6,1
Ağustos	3,1
Eylül	5,0
Ekim	6,3
Kasım	5,3
Aralık	6,8



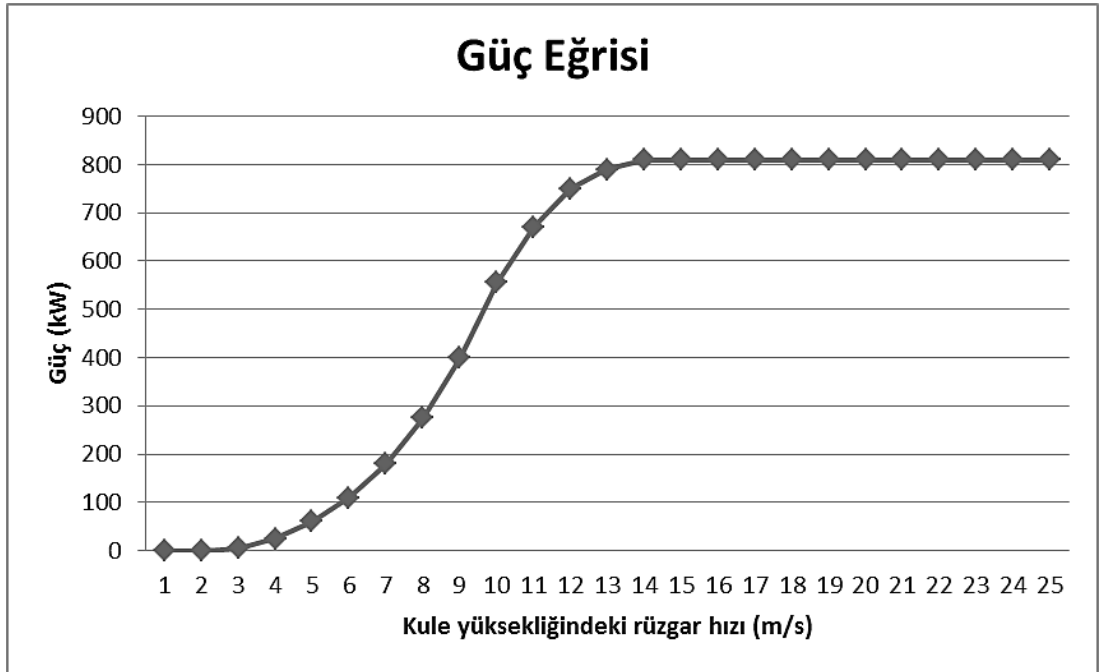
**Şekil 3.18.** Datça ilçesi için aylık ortalama rüzgar hızları grafiği

Profilab-Expert 4.0 yazılımında geliştirilen program ile Datça ilçesi için rüzgar enerjisi potansiyeli analizinde Enercon marka E-48 ve Enercon marka E-53 modeli türbinlerin teknik değerleri kullanılmıştır. Önce Enercon marka E-48 modeli türbinin farklı kule yüksekliğindeki enerji üretimi, verimlilik ve ekonomiklik analizi yapılmıştır. Sonra Enercon marka aynı güçteki fakat farklı rotor kanat çapına sahip E-53 modeli ile E-48 modeli türbinlerin aynı kule yüksekliğindeki enerji üretimi, verimlilik ve ekonomiklik analizi yapılmıştır. Enercon marka E-48 modeli türbininin üretici firma kataloğunda yer alan teknik özelliklerinin bir kısmı Çizelge 3.2’de verilmiştir[59].

Çizelge 3.2’de görüldüğü üzere Enercon marka E-48 modeli türbinin gücü 800kW olup, 4 farklı tip kule ile farklı yüksekliklerde kullanılabilir. Enercon marka E-48 modeli türbinin kule yüksekliğindeki rüzgar hızlarında ürettiği güç değerleri Ek 2’de görülmektedir. Enercon marka E-48 modeli türbinin güç eğrisi Şekil 3.19’da görülmektedir[59].

**Çizelge 3.2.** Enercon marka E-48 modeli türbininin teknik özelliklerinin bir kısmı[59]

Anma Gücü (kW)	800
Rotor kanat çapı (m)	48
Kule yüksekliği (m)	50 / 55 / 60 / 76
Rotor süpürme alanı (m <sup>2</sup> )	1810
Başlama rüzgar hızı (m/s)	3
Anma rüzgar hızı (m/s)	14
Durma rüzgar hızı (m/s)	28 - 34



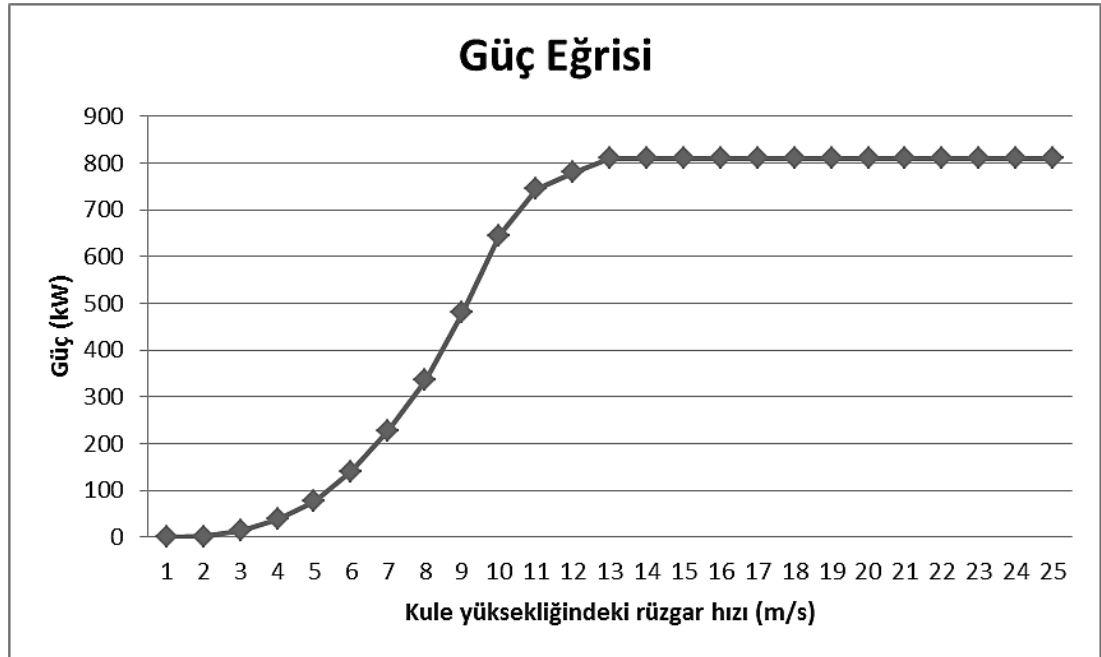
**Şekil 3.19.** Enercon marka E-48 modeli türbinin güç eğrisi[59]

Enercon marka E-53 modeli türbininin üretici firma katalogunda yer alan teknik özelliklerinin bir kısmı Çizelge 3.3'de verilmiştir[59].

**Çizelge 3.3.** Enercon marka E-53 modeli türbininin teknik özelliklerinin bir kısmı[59]

Anma Gücü (kW)	800
Rotor kanat çapı (m)	52,9
Kule yüksekliği (m)	60 / 73
Rotor süpürme alanı (m <sup>2</sup> )	2.198
Başlama rüzgar hızı (m/s)	2
Anma rüzgar hızı (m/s)	13
Durma rüzgar hızı (m/s)	28 - 34

Çizelge 3.3’de görüldüğü üzere Enercon marka E-53 modeli türbinin gücü 800kW olup, 2 farklı tip kule ile farklı yüksekliklerde kullanılabilir. Enercon marka E-53 modeli türbinin kule yüksekliğindeki rüzgar hızlarında ürettiği güç değerleri Ek 2’de görülmektedir. Şekil 3.20’de Enercon marka E-53 modeli türbinin güç eğrisi görülmektedir[59].



**Şekil 3.20.** Enercon marka E-53 modeli türbinin güç eğrisi[59]

Muğla ili Datça ilçesi rüzgar enerjisi potansiyeli analizinde kullanılan diğer veriler şu şekildedir;

- Meteoroloji Genel Müdürlüğünün rüzgar hızı ölçümleri 10 metre yükseklikte yapılmıştır. 2010 yılına ait günlük ortalama rüzgar hızı verileri kullanılmıştır.
- Muğla ili Datça ilçesi 2010 yılı ortalama sıcaklık değeri 15°C olarak alınmıştır.
- Hava yoğunluğu hesaplamasında sıcaklık düzeltme faktörü  $K_S$  değeri 1,00 olarak alınmıştır.
- Türbinin bulunduğu yerin deniz seviyesinden yüksekliğinin 200 metre olduğu varsayımıyla yükseklik düzeltme faktörü  $K_Y$  değeri 0,977 olarak alınmıştır.
- Yeryüzü yapısının toprak seviyesinde uzun çimli bölge olduğu varsayımıyla pürüzlülük katsayısı 0,15 alınmıştır.
- Türbin yatırım maliyeti için 1400 ABD doları/kW değeri alınmıştır.
- Bakım ve işletme maliyetleri, toplam yatırım maliyetinin %3'ü olarak alınmıştır.
- Yatırımın maliyetinin %25'nin öz kaynaktan karşılanacağı ve yıllık öz kaynak geri dönüş oranı %15 olarak kabul edilmiştir.
- Yatırımın maliyetinin %75'inin banka kredisi karşılanacağı, banka yıllık faiz oranının %5 ve borç ödeme süresi 15 yıl olarak alınmıştır.

Datça ilçesinin rüzgar enerjisi potansiyeli analizinde Rayleigh istatistiksel yöntemi kullanılmıştır. Profilab-Expert 4.0 yazılımında geliştirilen programın ilk bölümü ile yapılan hesaplamaların sonuçlarının ön paneli Şekil 3.21'de gösterilmiştir. Bölgenin aylık ve yıllık rüzgar enerjisi potansiyeline ait sonuçlar Çizelge 3.4'te gösterilmiştir.



Front panel

1. Potansiyel Enerji Hesaplaması(MFK/YLTZ2013) 2. Türbin Seçimi(MFK/YLTZ2013) 3. Maliyet Hesaplaması(MFK/YLTZ2013) 4. Deney Seti Simülasyonu(MFK/YLTZ2013)

### 1. Potansiyel Rüzgar Enerjisi Hesaplaması

1. Bölgenin sıcaklık ve yükseklik verilerini giriniz :

Ks : 1

Ky : 0,977

Hava yoğunluğu : 1,196 kg/m<sup>3</sup>

2. Ölçüm yüksekliği ve Sürtünme katsayısını giriniz :

Fs : 0,15

Ho : 10

3. Simülasyonu Başlat :

VG-2 okunacak veri sayısı doğru girildimi ?

Simülasyonu BAŞLAT / SIFIRLA

Simülasyonu DURDUR ve ÇIK !

### Simülasyon Sonuçları

Rayleigh varsayımları kullanılarak hesaplanmıştır.

Veri no	Rüzgar hızı	Enerji Yoğunluğu	Toplam rüzgar	En sık görülen	Maksimum end	k	c	Time	Date
0	6,3	0,28	211,6	5,0	10,0	2	7,10	22:56:29	07.12.2013
1	7,4	0,47	347,4	5,9	11,8	2	8,37	22:56:30	07.12.2013
2	6,5	0,31	228,2	5,1	10,3	2	7,28	22:56:30	07.12.2013
3	5,0	0,15	108,2	4,0	8,0	2	5,68	22:56:30	07.12.2013
4	3,7	0,06	44,5	3,0	6,0	2	4,22	22:56:30	07.12.2013
5	4,9	0,13	98,8	3,9	7,8	2	5,51	22:56:30	07.12.2013
6	6,1	0,26	192,1	4,9	9,7	2	6,87	22:56:30	07.12.2013
7	3,1	0,04	26,3	2,5	5,0	2	3,54	22:56:30	07.12.2013
8	5,0	0,14	107,6	4,0	8,0	2	5,66	22:56:30	07.12.2013
9	6,3	0,29	215,7	5,1	10,1	2	7,14	22:56:30	07.12.2013
10	5,3	0,17	129,5	4,3	8,5	2	6,03	22:56:31	07.12.2013
11	6,8	0,37	273,3	5,5	10,9	2	7,73	22:56:31	07.12.2013

Veri no	Rüzgar hızı	Enerji Yoğunluğu	Toplam rüzgar	En sık görülen	Maksimum end	k	c	Time	Date
12	5,8	0,22	1926,6	4,6	9,2	2	6,51	22:56:31	07.12.2013

Ortalama rüzgar hızı : 05,8 m/s

Okunacak toplam veri sayısı : 0012

Excel dosyasına aktar

Excel dosyasına aktar

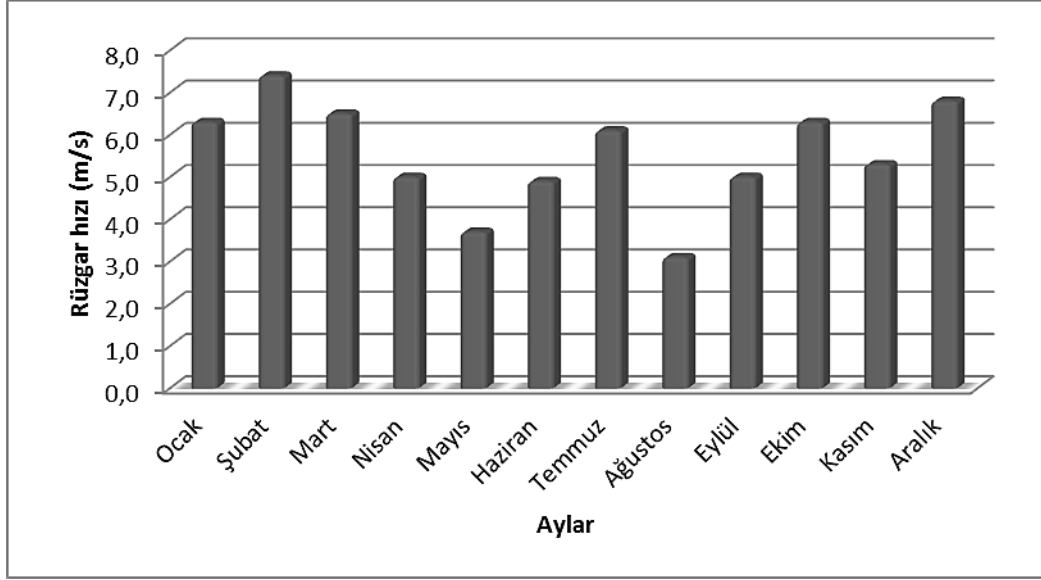
İLERİ >>>

Şekil 3.21. Datça ilçesinin rüzgar enerjisi potansiyeli ön panel görüntüsü

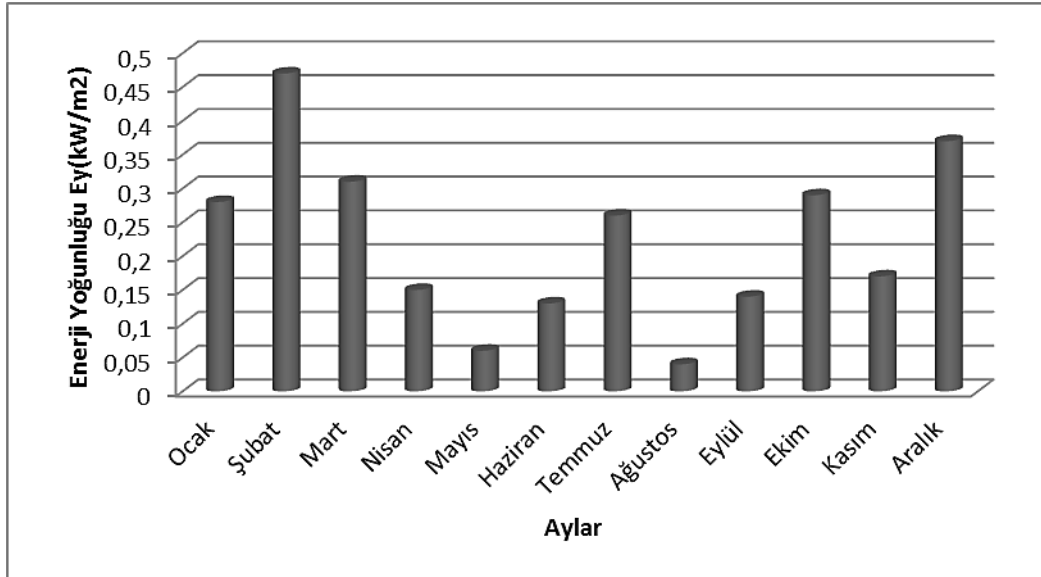
Çizelge 3.4. Datça ilçesinin aylık ve yıllık rüzgar enerjisi potansiyeli

Veri no	V <sub>r</sub> (m/s)	E <sub>Y</sub> (kW/m <sup>2</sup> )	E <sub>T</sub> (kW/m <sup>2</sup> /ay)	V <sub>Fmaks</sub> (m/s)	V <sub>Emaks</sub> (m/s)	k	c
1	6,3	0,28	211,6	5	10	2	7,1
2	7,4	0,47	347,4	5,9	11,8	2	8,37
3	6,5	0,31	228,2	5,1	10,3	2	7,28
4	5	0,15	108,2	4	8	2	5,68
5	3,7	0,06	44,5	3	6	2	4,22
6	4,9	0,13	98,8	3,9	7,8	2	5,51
7	6,1	0,26	192,1	4,9	9,7	2	6,87
8	3,1	0,04	26,3	2,5	5	2	3,54
9	5	0,14	107,6	4	8	2	5,66
10	6,3	0,29	215,7	5,1	10,1	2	7,14
11	5,3	0,17	129,5	4,3	8,5	2	6,03
12	6,8	0,37	273,3	5,5	10,9	2	7,73
Yıllık ortalama	5,8	0,22	1926,6	4,6	9,2	2	6,51

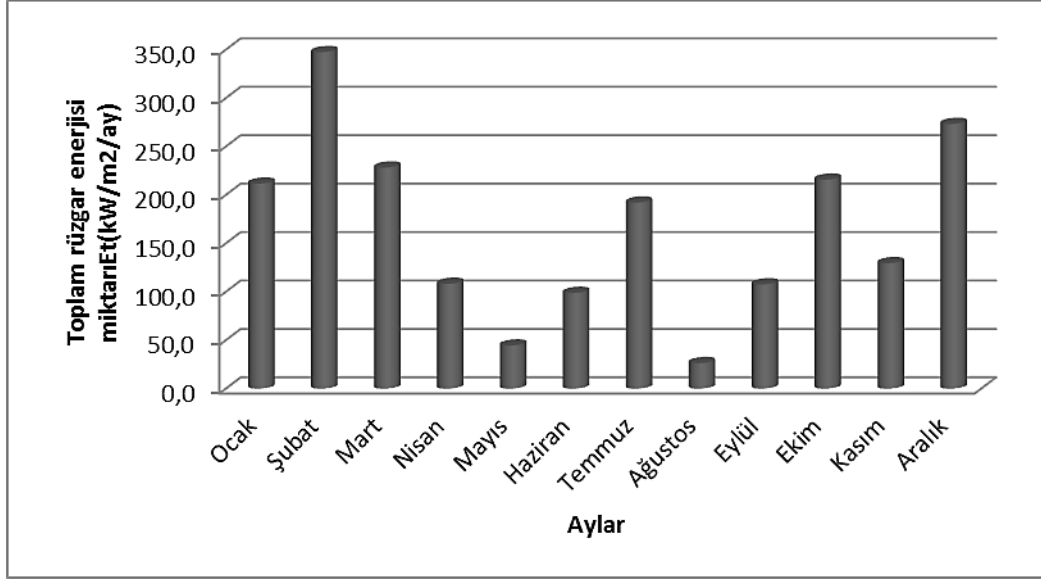
Datça ilçesinin aylık ortalama rüzgar hızı verileri için; rüzgar hızı  $V_r(m/s)$  grafiği Şekil 3.22'de, enerji yoğunluğu  $E_Y(kW/m^2)$  grafiği Şekil 3.23'de, toplam rüzgar enerjisi miktarı  $E_T(kW/m^2/ay)$  grafiği Şekil 3.24'de gösterilmiştir.



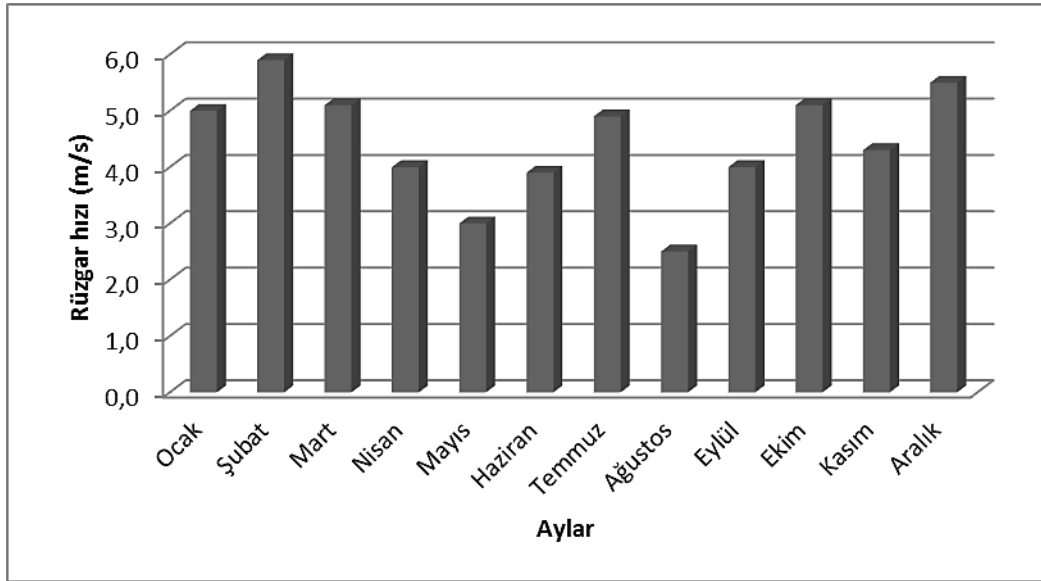
Şekil 3.22. Datça ilçesi rüzgar hızı  $V_r(m/s)$  grafiği



Şekil 3.23. Datça ilçesi enerji yoğunluğu  $E_Y(kW/m^2)$  grafiği



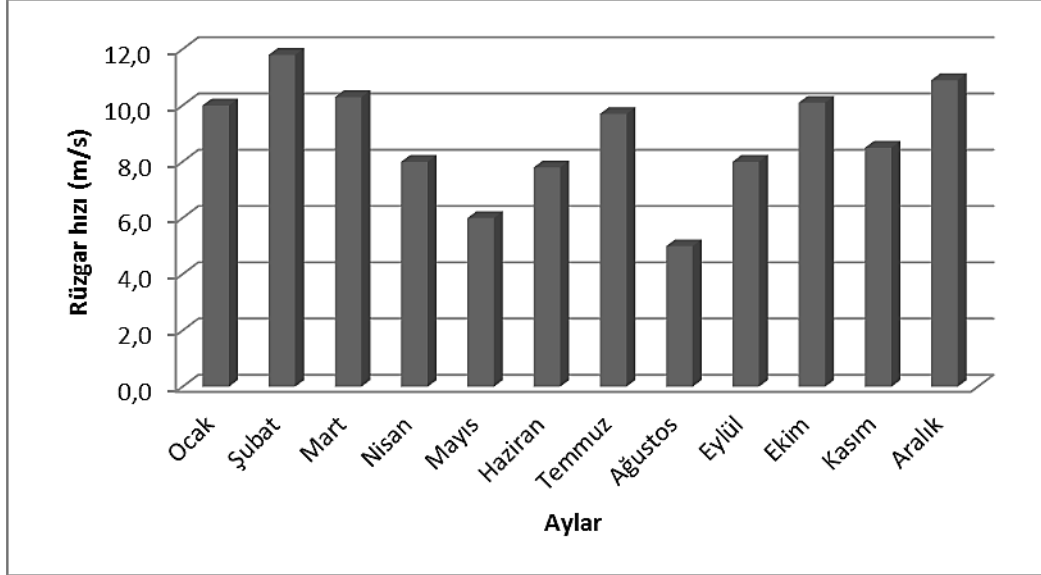
Şekil 3.24. Datça ilçesi toplam rüzgar enerjisi miktarı  $E_T$ (kW/m<sup>2</sup>/ay) grafiği



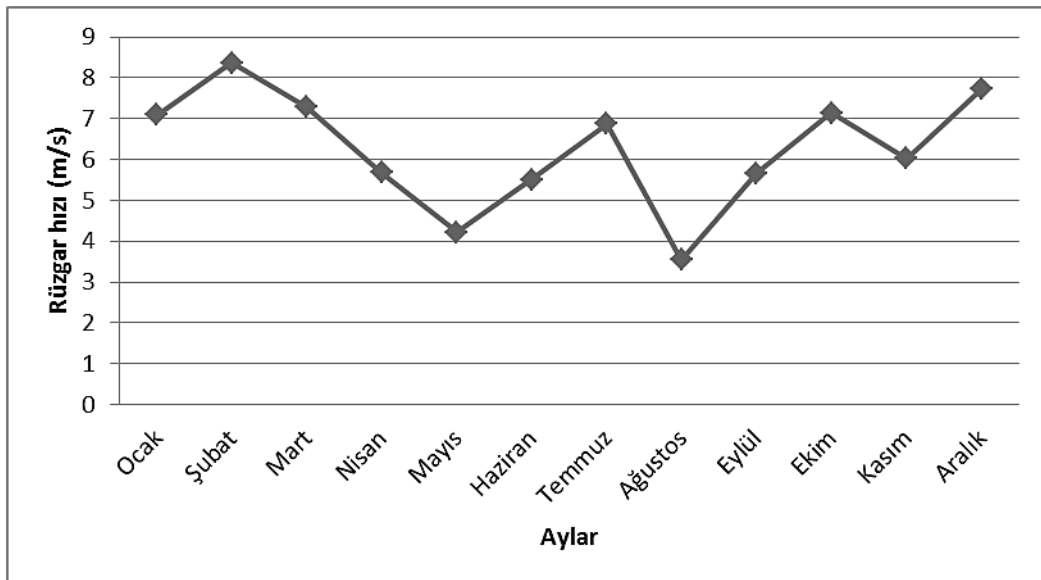
Şekil 3.25. Datça ilçesi en sık görülen rüzgar hızı  $V_{Fmaks}$ (m/s) grafiği

Datça ilçesinin aylık ortalama rüzgar hızı verileri için; en sık görülen rüzgar hızı  $V_{Fmaks}$ (m/s) grafiği Şekil 3.25’de, maksimum enerji üretimi sağlayan rüzgar hızı

$V_{Emaks}(m/s)$  grafiği Şekil 3.26'da, Rayleigh  $c$  ölçü parametresi grafiği Şekil 3.27'de gösterilmiştir.

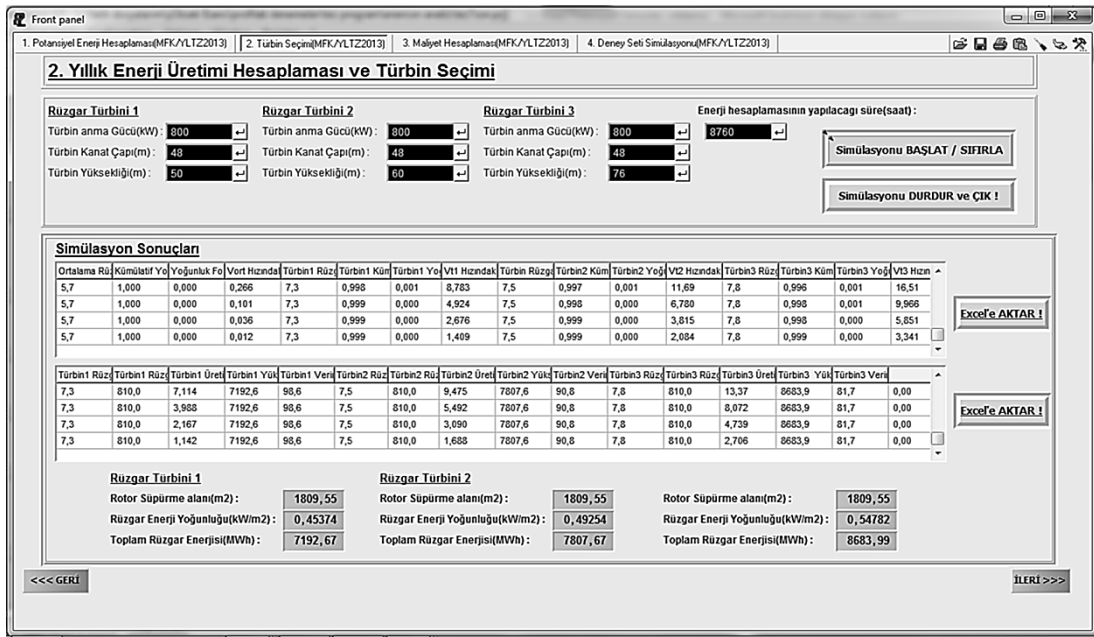


Şekil 3.26. Datça ilçesi maksimum enerji üretimi sağlayan rüzgar hızı  $V_{Emaks}(m/s)$  grafiği



Şekil 3.27. Datça ilçesi Rayleigh  $c$  ölçü parametresi grafiği

Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbini ile 50, 60 ve 76 metre kule yüksekliklerindeki Rayleigh dağılımı fonksiyonları ve enerji üretimi hesaplamaları yapılmıştır. Şekil 3.28’de Profilab-Expert 4.0 yazılımında geliştirilen programın E-48 modeli rüzgar türbini için 50, 60 ve 76 metre kule yüksekliklerindeki Rayleigh dağılımı fonksiyonları ve enerji üretimi analizi sonuçlarının ön panel ekranı gösterilmiştir. Farklı kule yüksekliklerindeki Rayleigh dağılımı fonksiyonlarına ait sonuçlar Çizelge 3.5’de gösterilmiştir.

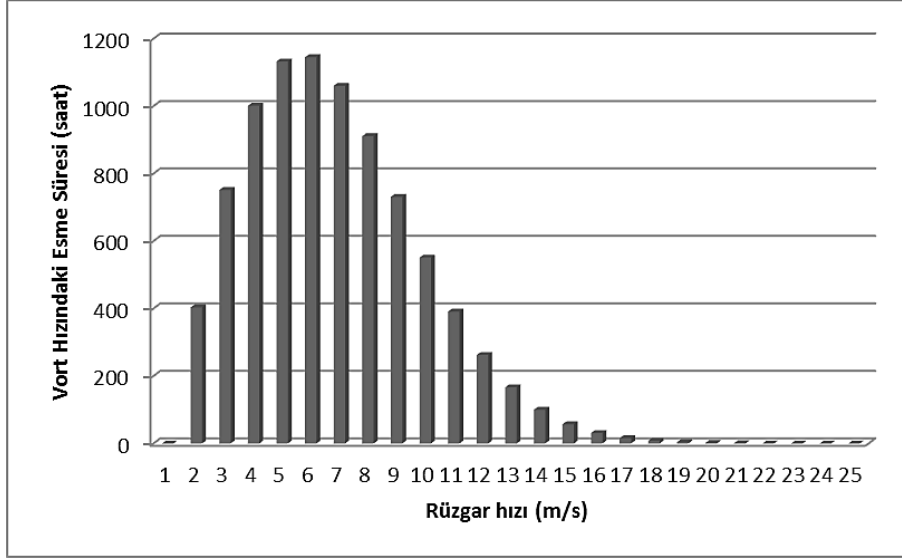


Şekil 3.28. Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbini Rayleigh dağılımı fonksiyonları ve enerji üretimi hesaplamaları sonuçlarının ön panel ekranı

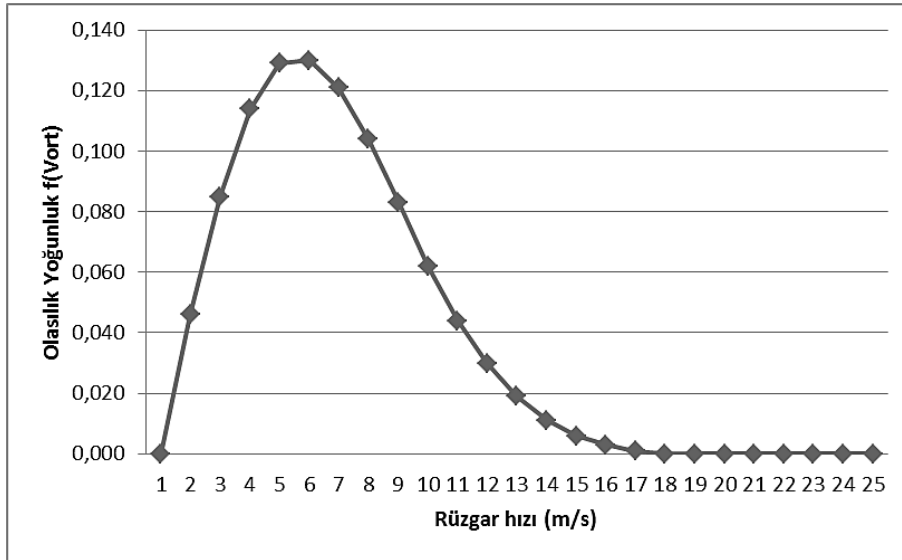
**Çizelge 3.5.** Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbini Rayleigh dağılımı fonksiyonlarına ait sonuçlar

Rüzgar Hızı $V_t$ (m/s)	Ortalama Rüzgar Hızı $V_{ort}$ (m/s)	Kümülatif Yoğunluk Fonksiyonu $F(V_{ort})$	Yoğunluk Fonksiyonu $f(V_{ort})$	Vort Hızındaki Esme Süresi (saat)	Türbin1 Rüzgar Hızı $V_{t1}$ (m/s)	Türbin1 Kümülatif Yoğunluk Fonksiyonu $F(V_{t1})$	Türbin1 Yoğunluk Fonksiyonu $f(V_{t1})$	Vt1 Hızındaki Esme Süresi (saat)	Türbin Rüzgar Hızı $V_{t2}$ (m/s)	Türbin2 Kümülatif Yoğunluk Fonksiyonu $F(V_{t2})$	Türbin2 Yoğunluk Fonksiyonu $f(V_{t2})$	Vt2 Hızındaki Esme Süresi (saat)	Türbin3 Rüzgar Hızı $V_{t3}$ (m/s)	Türbin3 Kümülatif Yoğunluk Fonksiyonu $F(V_{t3})$	Türbin3 Yoğunluk Fonksiyonu $f(V_{t3})$	Vt3 Hızındaki Esme Süresi (saat)	
0	5,7	0	0	0	7,3	0	0	0	7,5	0	0	0	7,8	0	0	0	0
1	5,7	0,023	0,046	403,2	7,3	0,014	0,028	251	7,5	0,013	0,027	237,8	7,8	0,012	0,025	221,7	
2	5,7	0,089	0,085	751,3	7,3	0,056	0,054	480,6	7,5	0,053	0,052	456,5	7,8	0,05	0,048	426,8	
3	5,7	0,191	0,114	1001	7,3	0,122	0,076	670,4	7,5	0,116	0,073	639,2	7,8	0,109	0,068	600,5	
4	5,7	0,314	0,129	1132	7,3	0,207	0,092	807,4	7,5	0,197	0,088	773,9	7,8	0,185	0,083	731,9	
5	5,7	0,445	0,13	1145	7,3	0,304	0,101	885,5	7,5	0,291	0,097	854,7	7,8	0,274	0,093	815,2	
6	5,7	0,571	0,121	1060	7,3	0,407	0,103	905,5	7,5	0,39	0,1	881,5	7,8	0,369	0,097	849,5	
7	5,7	0,684	0,104	910,8	7,3	0,509	0,099	874,5	7,5	0,49	0,098	859,9	7,8	0,466	0,095	838,9	
8	5,7	0,778	0,083	731	7,3	0,605	0,091	803,6	7,5	0,585	0,091	799,4	7,8	0,559	0,09	791	
9	5,7	0,851	0,062	550,9	7,3	0,692	0,08	706	7,5	0,672	0,081	711,7	7,8	0,646	0,081	715,6	
10	5,7	0,905	0,044	391,2	7,3	0,766	0,067	595,1	7,5	0,747	0,069	608,8	7,8	0,722	0,071	623,1	
11	5,7	0,942	0,03	262,3	7,3	0,827	0,055	482,4	7,5	0,81	0,057	501,5	7,8	0,788	0,059	523,6	
12	5,7	0,966	0,019	166,4	7,3	0,876	0,043	376,6	7,5	0,862	0,045	398,6	7,8	0,842	0,048	425,3	
13	5,7	0,981	0,011	100	7,3	0,914	0,032	283,7	7,5	0,902	0,034	306,1	7,8	0,885	0,038	334,4	
14	5,7	0,99	0,006	57,03	7,3	0,942	0,023	206,3	7,5	0,932	0,026	227,3	7,8	0,919	0,029	254,7	
15	5,7	0,995	0,003	30,85	7,3	0,962	0,016	145	7,5	0,954	0,018	163,4	7,8	0,944	0,021	188,1	
16	5,7	0,997	0,001	15,85	7,3	0,975	0,011	98,56	7,5	0,97	0,013	113,7	7,8	0,962	0,015	134,8	
17	5,7	0,998	0	7,74	7,3	0,985	0,007	64,81	7,5	0,981	0,008	76,74	7,8	0,975	0,01	93,87	
18	5,7	0,999	0	3,592	7,3	0,991	0,004	41,25	7,5	0,988	0,005	50,19	7,8	0,984	0,007	63,45	
19	5,7	0,999	0	1,585	7,3	0,994	0,002	25,42	7,5	0,993	0,003	31,83	7,8	0,99	0,004	41,67	
20	5,7	0,999	0	0,665	7,3	0,997	0,001	15,18	7,5	0,995	0,002	19,58	7,8	0,994	0,003	26,6	
21	5,7	1	0	0,266	7,3	0,998	0,001	8,783	7,5	0,997	0,001	11,69	7,8	0,996	0,001	16,51	
22	5,7	1	0	0,101	7,3	0,999	0	4,924	7,5	0,998	0	6,78	7,8	0,998	0,001	9,966	
23	5,7	1	0	0,036	7,3	0,999	0	2,676	7,5	0,999	0	3,815	7,8	0,998	0	5,851	
24	5,7	1	0	0,012	7,3	0,999	0	1,409	7,5	0,999	0	2,084	7,8	0,999	0	3,341	

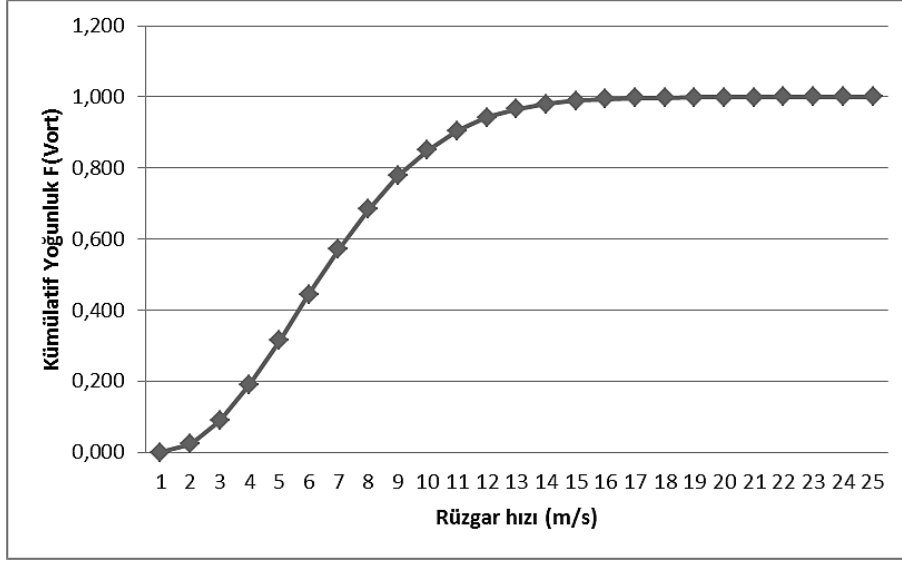
Ölçüm yüksekliğindeki aylık ortalama rüzgar hızı verileri için  $V_{ort}$  hızındaki esme süresi(saat) grafiği Şekil 3.29'da, olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(V_{ort})$  grafiği Şekil 3.30'da, kümülatif yoğunluk fonksiyonu  $F(V_{ort})$  grafiği Şekil 3.31'de gösterilmiştir.



Şekil 3.29. Ölçüm yüksekliğindeki  $V_{ort}$  hızındaki esme süresi(saat) grafiği

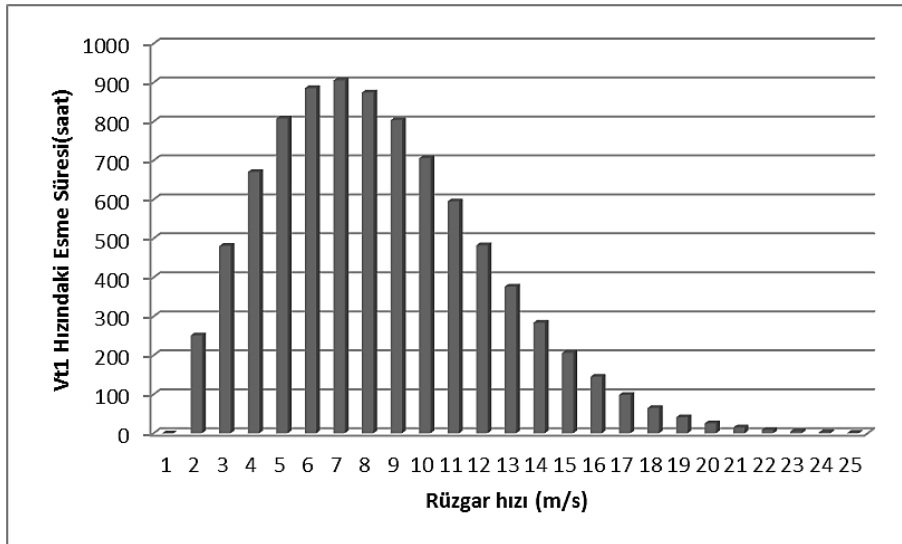


Şekil 3.30. Ölçüm yüksekliğindeki olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(V_{ort})$  grafiği



**Şekil 3.31.** Ölçüm yüksekliğindeki kümülatif yoğunluk fonksiyonu  $F(V_{ort})$  grafiği

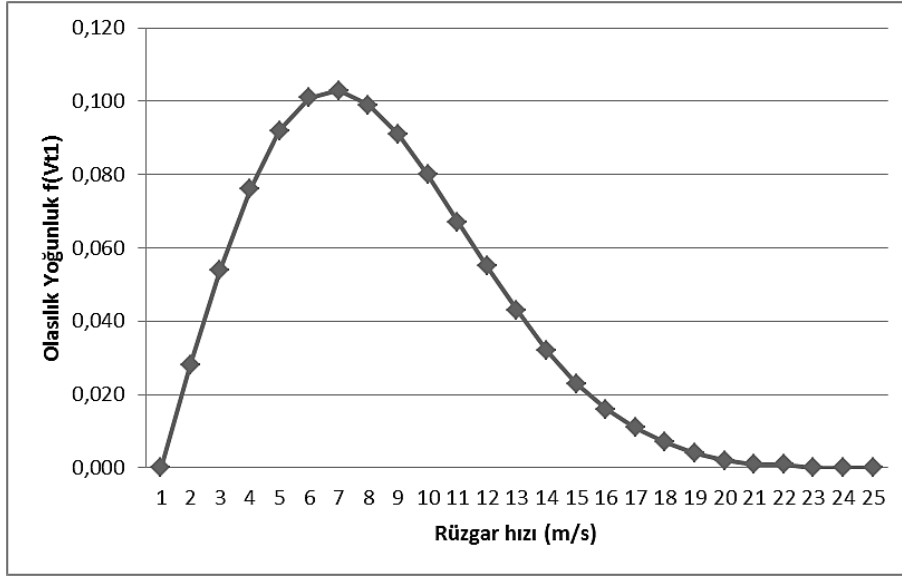
50 metre kule yüksekliğindeki aylık ortalama rüzgar hızı verileri için  $V_{t1}$  hızındaki esme süresi (saat) grafiği Şekil 3.32'de gösterilmiştir.



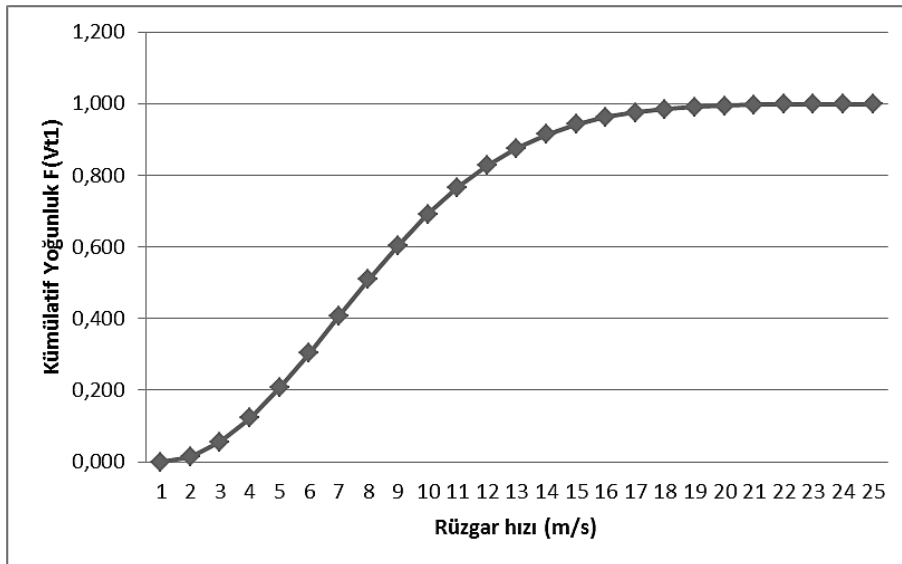
**Şekil 3.32.** 50 metre kule yüksekliğindeki  $V_{t1}$  hızındaki esme süresi (saat) grafiği



50 metre kule yüksekliğindeki aylık ortalama rüzgar hızı verileri için Türbin1 olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(V_{t1})$  grafiği Şekil 3.33'de, Türbin1 kümülatif yoğunluk fonksiyonu  $F(V_{t1})$  grafiği Şekil 3.34'de gösterilmiştir.

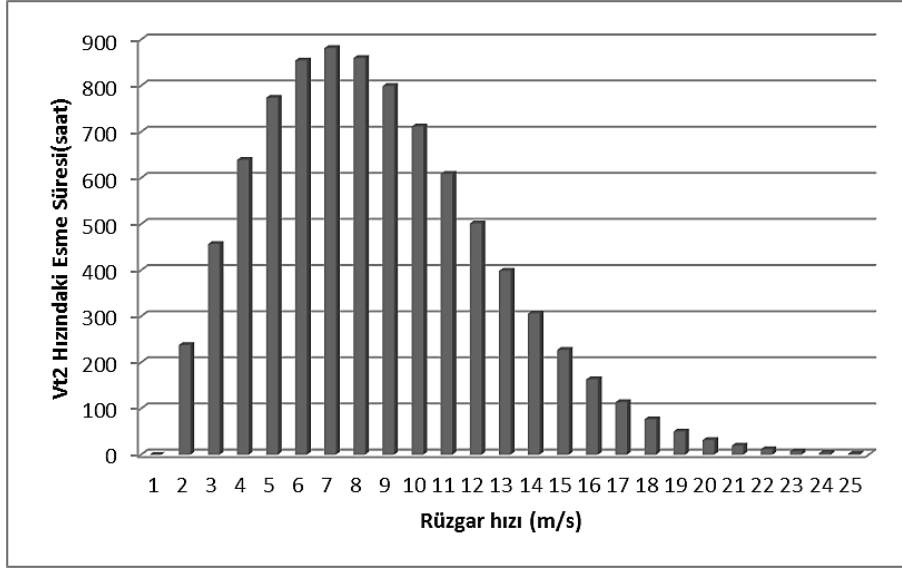


Şekil 3.33. Enercon E-48 modeli Türbin1 olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(V_{t1})$  grafiği

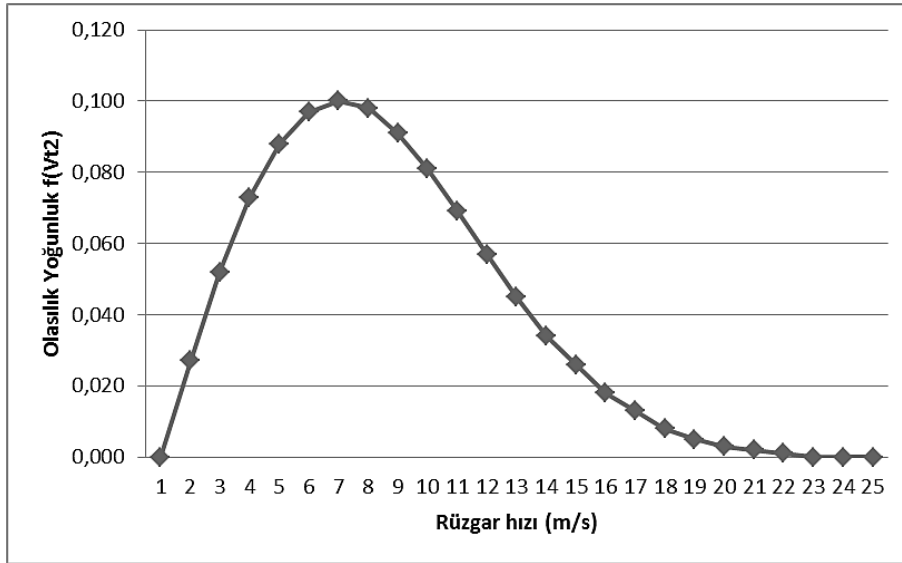


Şekil 3.34. Enercon E-48 modeli Türbin1 kümülatif yoğunluk fonksiyonu  $F(V_{t1})$  grafiği

60 metre kule yüksekliğindeki aylık ortalama rüzgar hızı verileri için  $V_{12}$  hızındaki esme süresi (saat) grafiği Şekil 3.35’de, Türbin2 olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(V_{12})$  grafiği Şekil 3.36’da, Türbin2 kümülatif yoğunluk fonksiyonu  $F(V_{12})$  grafiği Şekil 3.37’de gösterilmiştir.



Şekil 3.35. 60 metre kule yüksekliğindeki  $V_{12}$  hızındaki esme süresi (saat) grafiği

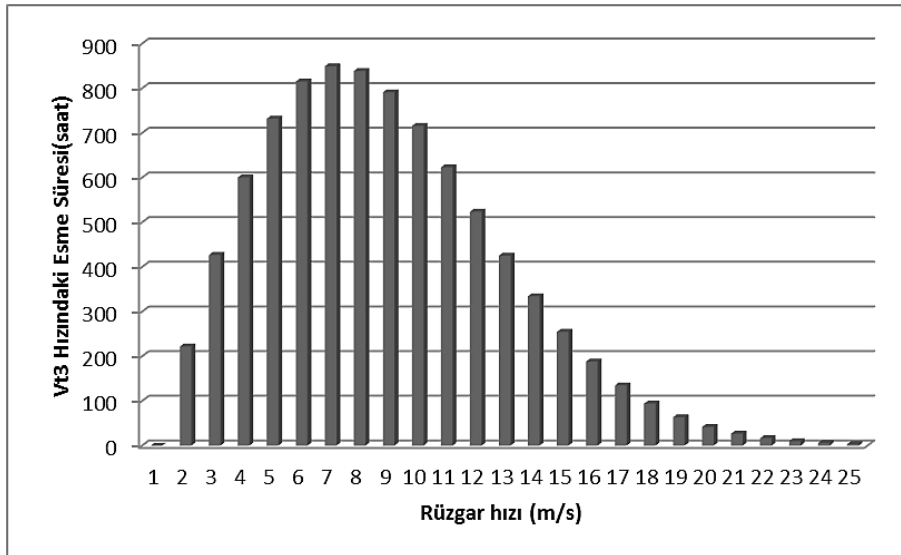


Şekil 3.36. Enercon E-48 modeli Türbin2 olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(V_{12})$  grafiği



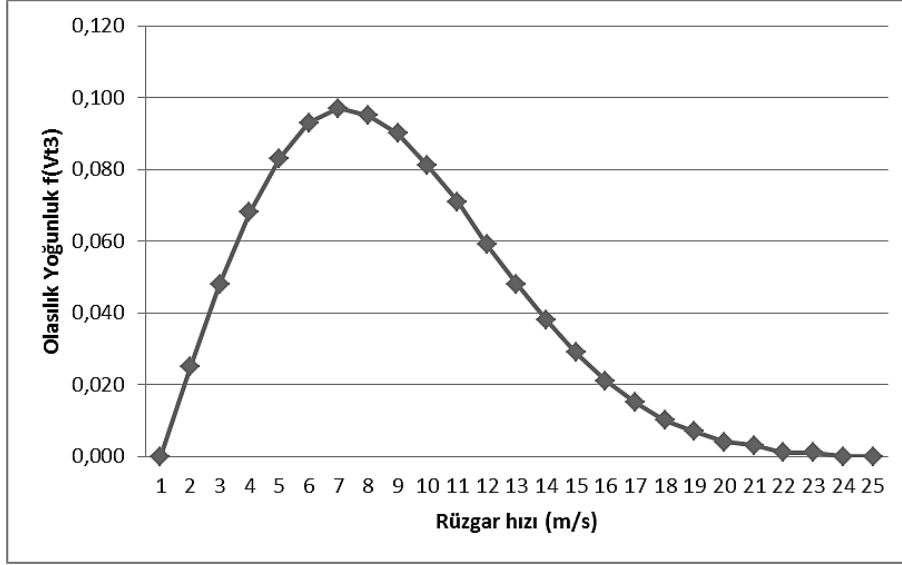
Şekil 3.37. Enercon E-48 modeli Türbin2 kümülatif yoğunluk fonksiyonu  $F(V_{t2})$  grafiği

76 metre kule yüksekliğindeki aylık ortalama rüzgar hızı verileri için  $V_{t3}$  hızındaki esme süresi(saat) grafiği Şekil 3.38'de gösterilmiştir.

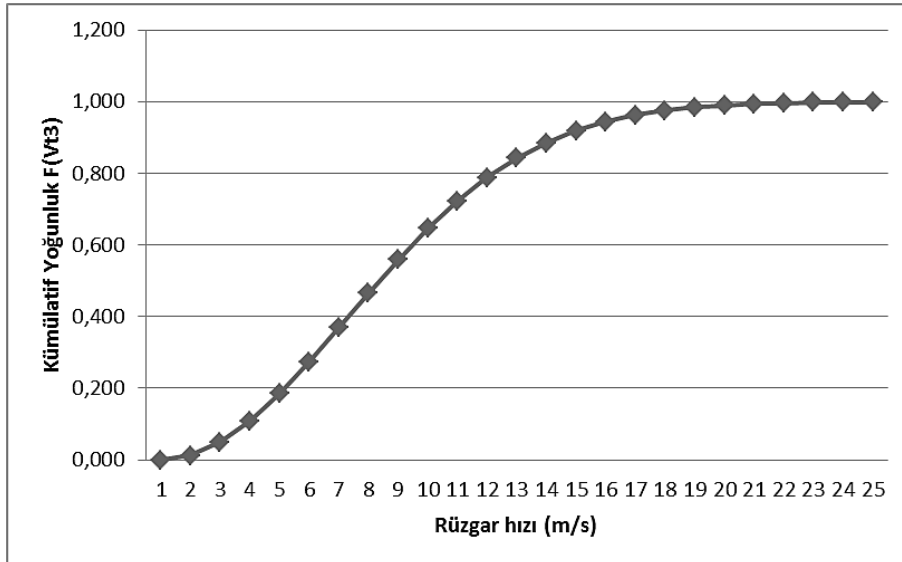


Şekil 3.38. 76 metre kule yüksekliğindeki  $V_{t3}$  hızındaki esme süresi (saat) grafiği

76 metre kule yüksekliğindeki aylık ortalama rüzgar hızı verileri için Türbin3 olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(V_{t3})$  grafiği Şekil 3.39'da, Türbin3 kümülatif yoğunluk fonksiyonu  $F(V_{t3})$  grafiği Şekil 3.40'da gösterilmiştir.



Şekil 3.39. Enercon E-48 modeli Türbin3 olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(V_{t3})$  grafiği



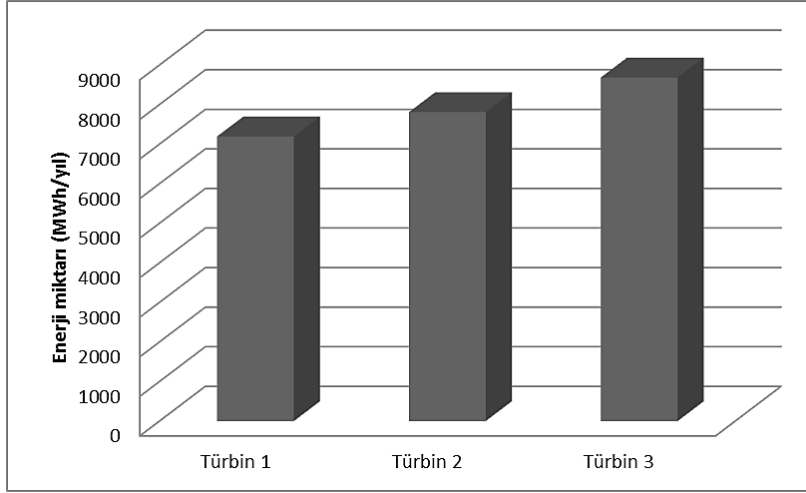
Şekil 3.40. Enercon E-48 modeli Türbin3 kümülatif yoğunluk fonksiyonu  $F(V_{t3})$  grafiği

Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbini ile 50, 60 ve 76 metre kule yüksekliklerindeki enerji üretimi analizine ait sonuçlar Çizelge 3.6’da gösterilmiştir.

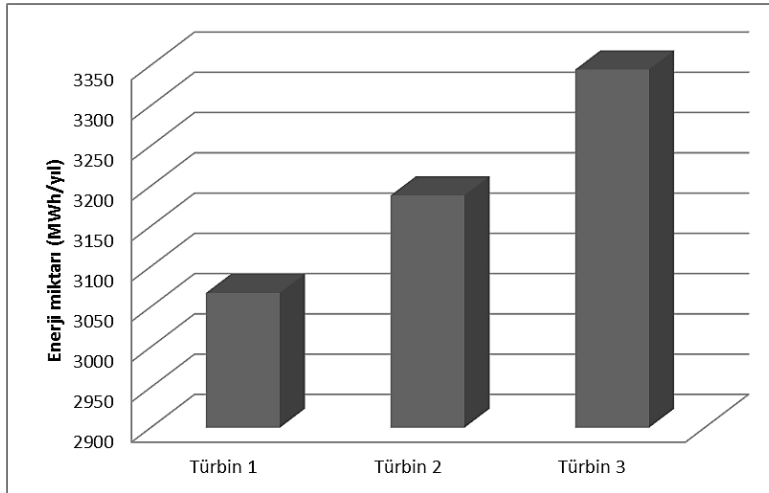
**Çizelge 3.6.** Enercon E-48 modeli rüzgar türbini enerji üretimi analizine ait sonuçlar

Türbin1 Rüzgar Hızı Vt1(m/s)	Türbin1 Rüzgar Hızı - Güç (kW)	Türbin1 Üretilen Enerji(MWh)	Türbin1 Yüksekliğindeki Rüzgar Enerjisi Potansiyeli (Mwh)	Türbin1 Verim (%)	Türbin2 Rüzgar Hızı Vt2(m/s)	Türbin2 Rüzgar Hızı - Güç (kW)	Türbin2 Üretilen Enerji (MWh)	Türbin2 Yüksekliğindeki Rüzgar Enerjisi Potansiyeli (Mwh)	Türbin2 Verim (%)	Türbin2 Rüzgar Hızı Vt3(m/s)	Türbin3 Rüzgar Hızı - Güç (kW)	Türbin3 Üretilen Enerji (MWh)	Türbin3 Yüksekliğindeki Rüzgar Enerjisi Potansiyeli (Mwh)	Türbin3 Verim (%)
7,3	0	0	7192,6	0	7,5	0	0	7807,6	0	7,8	0	0	8683,9	0
7,3	0	0	7192,6	0	7,5	0	0	7807,6	0	7,8	0	0	8683,9	0
7,3	5	2,403	7192,6	0,6	7,5	5	2,282	7807,6	0,56	7,8	5	2,134	8683,9	0,5
7,3	25	16,76	7192,6	3,04	7,5	25	15,98	7807,6	2,8	7,8	25	15,01	8683,9	2,52
7,3	60	48,44	7192,6	7,3	7,5	60	46,43	7807,6	6,73	7,8	60	43,91	8683,9	6,05
7,3	110	97,4	7192,6	13,3	7,5	110	94,02	7807,6	12,3	7,8	110	89,67	8683,9	11
7,3	180	163	7192,6	21,9	7,5	180	158,6	7807,6	20,1	7,8	180	152,9	8683,9	18,1
7,3	275	240,4	7192,6	33,4	7,5	275	236,4	7807,6	30,8	7,8	275	230,7	8683,9	27,7
7,3	400	321,4	7192,6	48,7	7,5	400	319,7	7807,6	44,8	7,8	400	316,4	8683,9	40,3
7,3	555	391,8	7192,6	67,5	7,5	555	395	7807,6	62,2	7,8	555	397,1	8683,9	55,9
7,3	671	399,3	7192,6	81,7	7,5	671	408,5	7807,6	75,2	7,8	671	418,1	8683,9	67,6
7,3	750	361,8	7192,6	91,3	7,5	750	376,1	7807,6	84,1	7,8	750	392,7	8683,9	75,6
7,3	790	297,5	7192,6	96,2	7,5	790	314,9	7807,6	88,6	7,8	790	336	8683,9	79,6
7,3	810	229,8	7192,6	98,6	7,5	810	247,9	7807,6	90,8	7,8	810	270,8	8683,9	81,7
7,3	810	167,1	7192,6	98,6	7,5	810	184,1	7807,6	90,8	7,8	810	206,3	8683,9	81,7
7,3	810	117,4	7192,6	98,6	7,5	810	132,3	7807,6	90,8	7,8	810	152,4	8683,9	81,7
7,3	810	79,83	7192,6	98,6	7,5	810	92,14	7807,6	90,8	7,8	810	109,2	8683,9	81,7
7,3	810	52,49	7192,6	98,6	7,5	810	62,16	7807,6	90,8	7,8	810	76,03	8683,9	81,7
7,3	810	33,41	7192,6	98,6	7,5	810	40,65	7807,6	90,8	7,8	810	51,39	8683,9	81,7
7,3	810	20,59	7192,6	98,6	7,5	810	25,78	7807,6	90,8	7,8	810	33,75	8683,9	81,7
7,3	810	12,29	7192,6	98,6	7,5	810	15,86	7807,6	90,8	7,8	810	21,54	8683,9	81,7
7,3	810	7,114	7192,6	98,6	7,5	810	9,475	7807,6	90,8	7,8	810	13,37	8683,9	81,7
7,3	810	3,988	7192,6	98,6	7,5	810	5,492	7807,6	90,8	7,8	810	8,072	8683,9	81,7
7,3	810	2,167	7192,6	98,6	7,5	810	3,09	7807,6	90,8	7,8	810	4,739	8683,9	81,7
7,3	810	1,142	7192,6	98,6	7,5	810	1,688	7807,6	90,8	7,8	810	2,706	8683,9	81,7

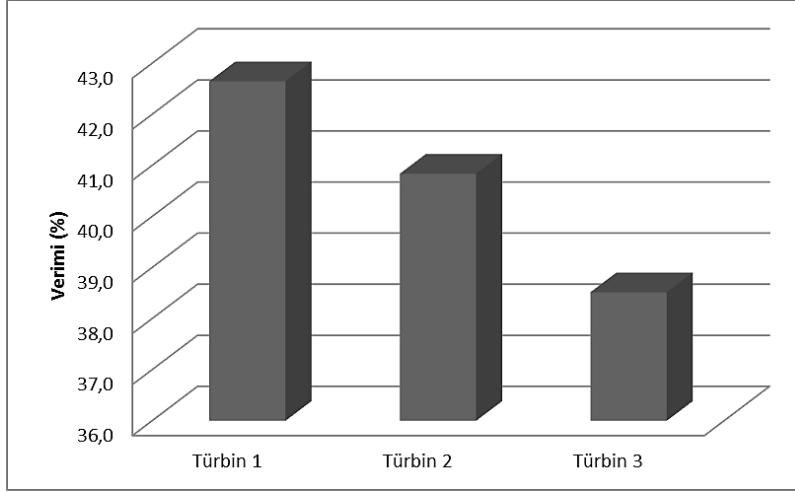
50, 60 ve 76 metre kule yüksekliğindeki ortalama rüzgar hızı verileri için kule yüksekliğindeki yıllık rüzgar enerjisi potansiyeli (MWh) grafiği Şekil 3.41’de, türbinlerin üretilebileceği yıllık enerji miktarı (MWh) grafiği Şekil 3.42’de, ortalama türbin verimi (%) grafiği Şekil 3.43’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.41.** Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbini kule yüksekliğindeki yıllık rüzgar enerjisi potansiyeli (MWh) grafiği

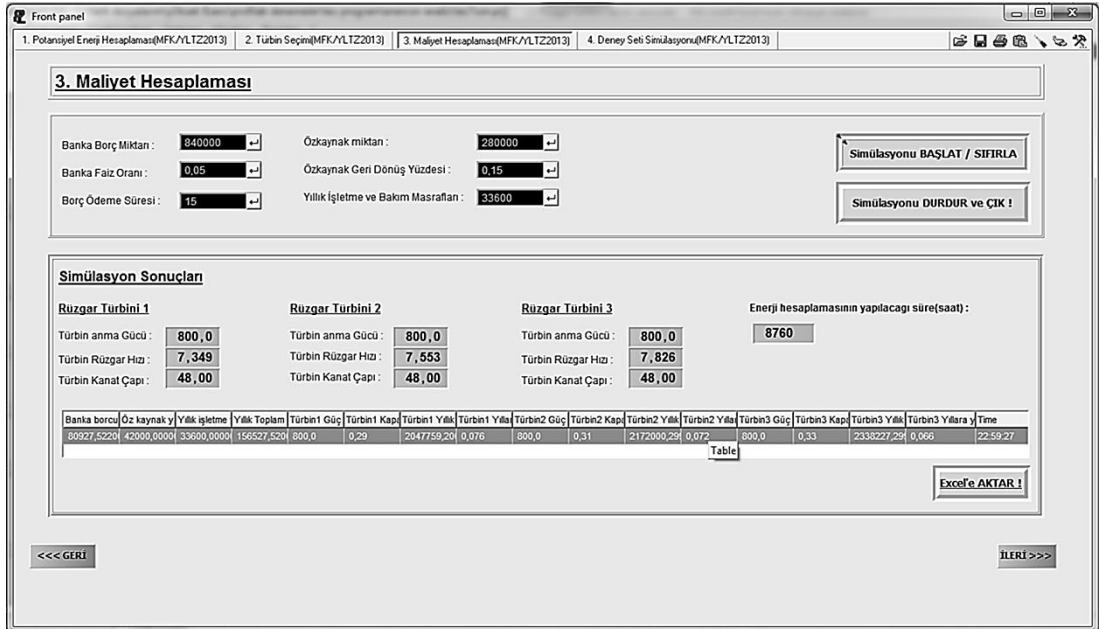


**Şekil 3.42.** Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbinlerinin üretilebileceği yıllık enerji miktarı (MWh) grafiği



**Şekil 3.43.** Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbinleri ortalama türbin verimi (%) grafiği

Profilab-Expert 4.0 yazılımında geliştirilen programın E-48 modeli rüzgar türbini ile 50, 60 ve 76 metre kule yüksekliklerindeki ekonomiklik analizi sonuçlarının ön panel ekranı Şekil 3.44’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.44.** Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbini ekonomiklik analizi sonuçlarının ön panel ekranı

Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbini ile 50, 60 ve 76 metre kule yüksekliklerindeki enerji üretimi ve ekonomiklik analizine ait sonuçlar Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8’de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.7.** Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbini enerji üretimi analizine ait sonuçlar

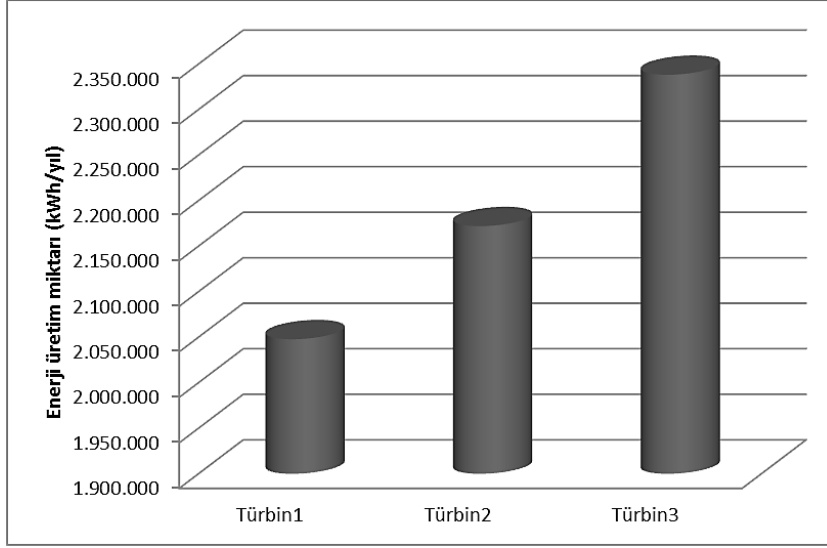
	Güç (kW)	Kapasite Faktörü	Yıllık enerji üretim miktarı (kWh/yıl)	Yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı (ABD doları/kWh)
Türbin1	800	% 29,0	2.047.759	0,076
Türbin2	800	% 31,0	2.172.000	0,072
Türbin3	800	% 33,0	2.338.227	0,066

**Çizelge 3.8.** Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbini ekonomiklik analizine ait sonuçlar

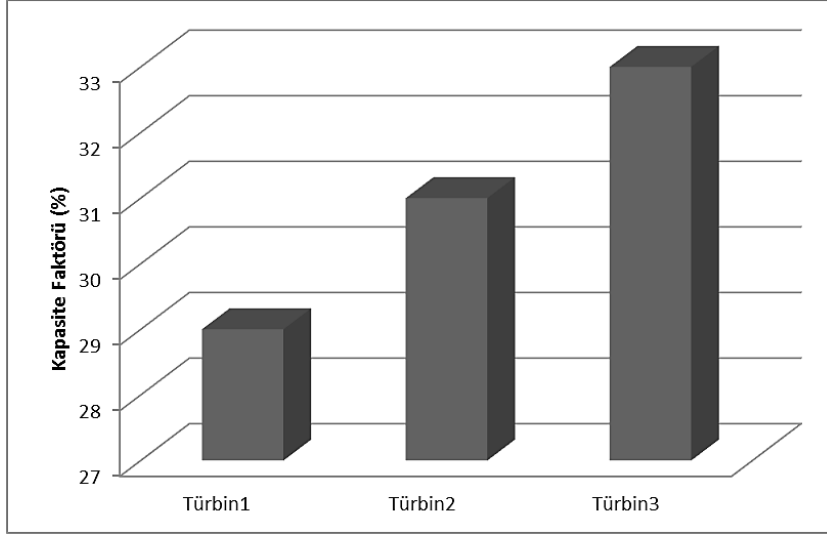
	Banka borcu yıllık geri ödeme miktarı (ABD doları/yıl)	Öz kaynak yıllık geri ödeme miktarı (ABD doları/yıl)	Yıllık işletme ve bakım masrafları (ABD doları/yıl)	Yıllık Toplam Borç Ödeme Miktarı (ABD doları/yıl)
Türbin	80.928	42.000	33.600	156.528

50, 60 ve 76 metre kule yüksekliğindeki ortalama rüzgar hızı verileri için türbinlerin yıllık enerji üretim miktarı (kWh) grafiği Şekil 3.45’de, türbin kapasite faktörleri grafiği Şekil 3.46’da gösterilmiştir.





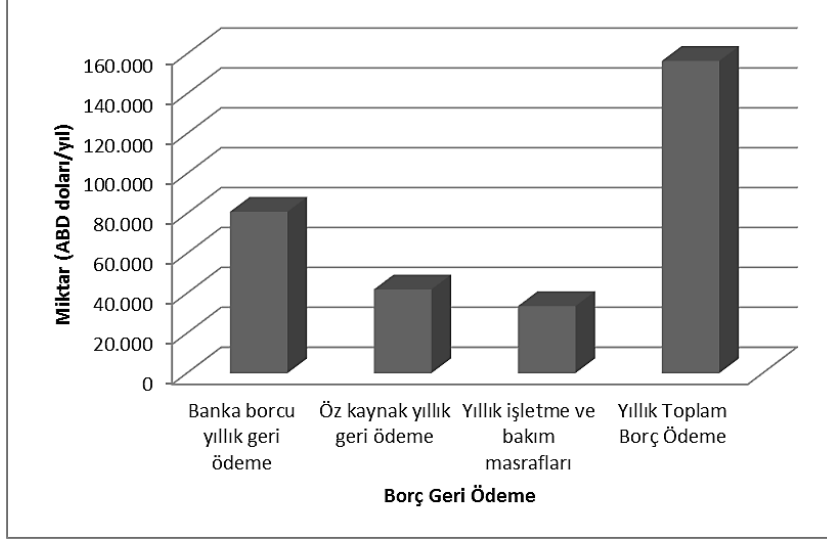
**Şekil 3.45.** Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbinleri yıllık enerji üretim miktarı (kWh) grafiği



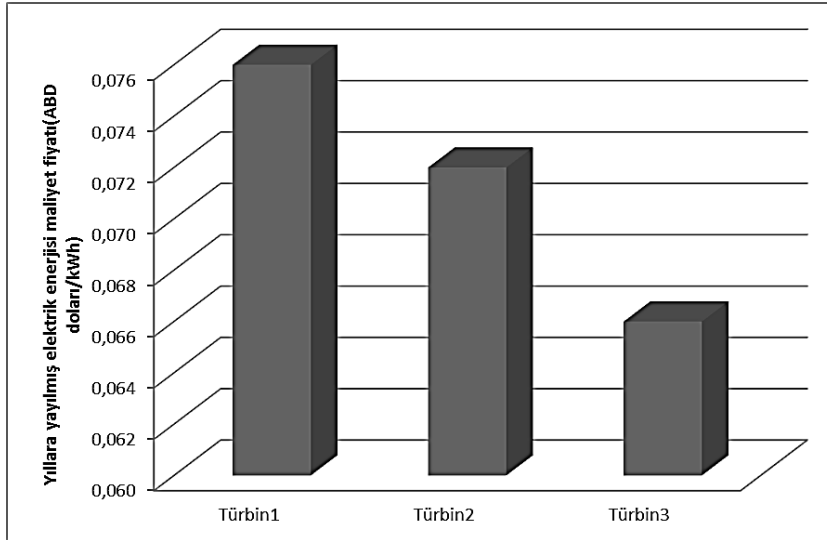
**Şekil 3.46.** Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbinleri türbin kapasite faktörleri grafiği

50, 60 ve 76 metre kule yüksekliğindeki ortalama rüzgar hızı verileri için yıllık toplam borç ödeme miktarı (ABD doları/yıl) grafiği Şekil 3.47'de, türbinlerin yıllara

yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı (ABD doları/kWh) grafiği Şekil 3.48’de gösterilmiştir.

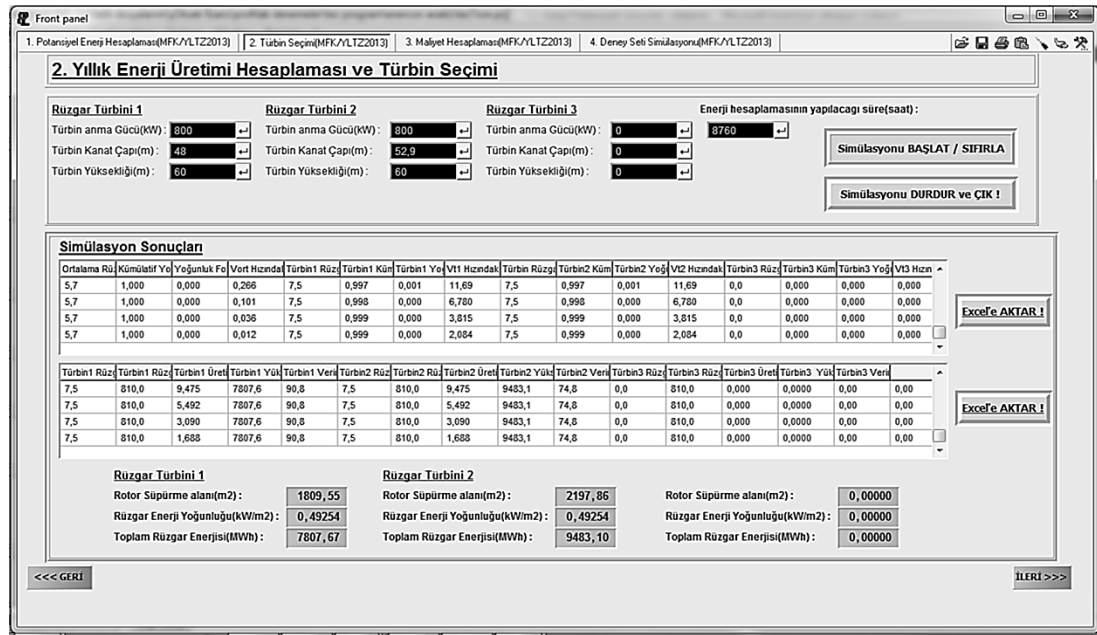


**Şekil 3.47.** Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbinleri yıllık toplam borç ödeme miktarı (ABD doları/yıl) grafiği



**Şekil 3.48.** Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbinleri yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı (ABD doları/kWh) grafiği

Rotor kanat çapının enerji üretime etkisini incelemek için, aynı güçteki farklı rotor kanat çaplarına sahip Enercon marka E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbinleriyle 60 metre kule yüksekliğinde Rayleigh dağılımı fonksiyonları ve enerji üretimi analizi yapılmıştır. Profilab-Expert 4.0 yazılımında geliştirilen programın aynı güçteki farklı rotor kanat çaplarına sahip E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbini ile 60 metre kule yüksekliklerindeki Rayleigh dağılımı fonksiyonları ve enerji üretimi analizi sonuçlarının ön panel ekranı Şekil 3.49’da gösterilmiştir.



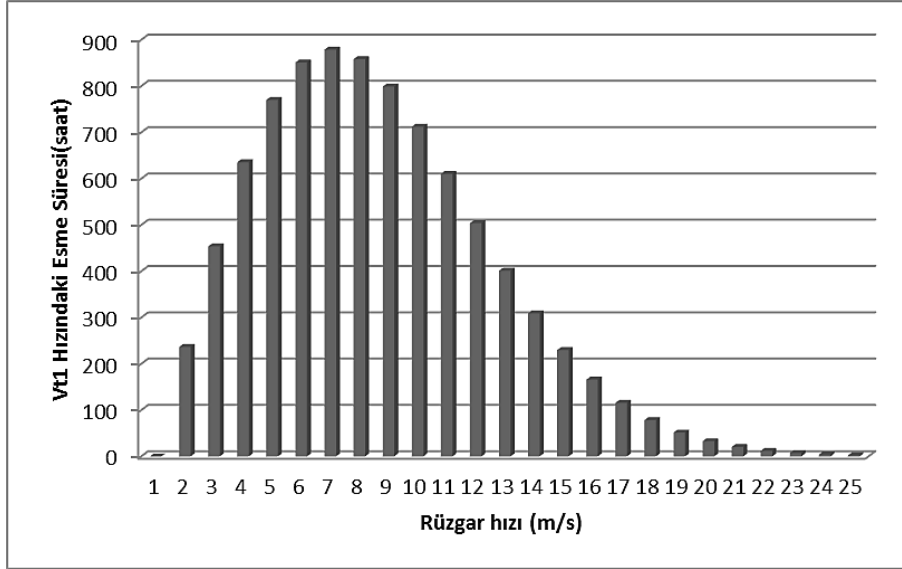
**Şekil 3.49.** Enercon E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbini Rayleigh dağılımı fonksiyonları ve enerji üretimi analizi sonuçlarının ön panel ekranı

Aynı güçteki farklı rotor kanat çaplarına sahip Enercon marka E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbinlerin 60 metre kule yüksekliğindeki Rayleigh dağılımı fonksiyonlarına ait sonuçlar Çizelge 3.9’da gösterilmiştir.

**Çizelge 3.9.** Enercon E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbini Rayleigh dağılımı fonksiyonlarına ait sonuçlar

Rüzgar Hızı Vr(m/s)	Ortalama Rüzgar Hızı Vort(m/s)	Kümülatif Yoğunluk Fonksiyonu F(Vort)	Yoğunluk Fonksiyonu f(Vort)	Vort Hızındaki Esme Süresi (saat)	Türbin1 Rüzgar Hızı Vt1(m/s)	Türbin1 Kümülatif Yoğunluk Fonksiyonu F(Vt1)	Türbin1 Yoğunluk Fonksiyonu f(Vt1)	Vt1 Hızındaki Esme Süresi (saat)	Türbin Rüzgar Hızı Vt2(m/s)	Türbin2 Kümülatif Yoğunluk Fonksiyonu F(Vt2)	Türbin2 Yoğunluk Fonksiyonu f(Vt2)	Vt2 Hızındaki Esme Süresi (saat)
0	5,7	0	0	0	7,5	0	0	0	7,5	0	0	0
1	5,7	0,023	0,045	400,6	7,5	0,013	0,027	236,3	7,5	0,013	0,027	236,3
2	5,7	0,089	0,085	746,9	7,5	0,053	0,051	453,6	7,5	0,053	0,051	453,6
3	5,7	0,19	0,113	996,6	7,5	0,115	0,072	635,5	7,5	0,115	0,072	635,5
4	5,7	0,312	0,128	1127	7,5	0,196	0,087	770	7,5	0,196	0,087	770
5	5,7	0,443	0,13	1142	7,5	0,289	0,097	851	7,5	0,289	0,097	851
6	5,7	0,569	0,12	1059	7,5	0,388	0,1	878,6	7,5	0,388	0,1	878,6
7	5,7	0,682	0,104	911,7	7,5	0,488	0,098	858,1	7,5	0,488	0,098	858,1
8	5,7	0,776	0,083	733,4	7,5	0,583	0,091	798,8	7,5	0,583	0,091	798,8
9	5,7	0,849	0,063	554,2	7,5	0,669	0,081	712,2	7,5	0,669	0,081	712,2
10	5,7	0,903	0,045	394,7	7,5	0,745	0,069	610,3	7,5	0,745	0,069	610,3
11	5,7	0,941	0,03	265,5	7,5	0,808	0,057	503,7	7,5	0,808	0,057	503,7
12	5,7	0,965	0,019	169,1	7,5	0,86	0,045	401,2	7,5	0,86	0,045	401,2
13	5,7	0,98	0,011	102	7,5	0,9	0,035	308,8	7,5	0,9	0,035	308,8
14	5,7	0,989	0,006	58,4	7,5	0,931	0,026	229,9	7,5	0,931	0,026	229,9
15	5,7	0,994	0,003	31,74	7,5	0,953	0,018	165,6	7,5	0,953	0,018	165,6
16	5,7	0,997	0,001	16,38	7,5	0,969	0,013	115,6	7,5	0,969	0,013	115,6
17	5,7	0,998	0	8,041	7,5	0,98	0,008	78,26	7,5	0,98	0,008	78,26
18	5,7	0,999	0	3,752	7,5	0,988	0,005	51,34	7,5	0,988	0,005	51,34
19	5,7	0,999	0	1,666	7,5	0,992	0,003	32,67	7,5	0,992	0,003	32,67
20	5,7	0,999	0	0,703	7,5	0,995	0,002	20,17	7,5	0,995	0,002	20,17
21	5,7	1	0	0,283	7,5	0,997	0,001	12,09	7,5	0,997	0,001	12,09
22	5,7	1	0	0,108	7,5	0,998	0	7,037	7,5	0,998	0	7,037
23	5,7	1	0	0,039	7,5	0,999	0	3,976	7,5	0,999	0	3,976
24	5,7	1	0	0,013	7,5	0,999	0	2,181	7,5	0,999	0	2,181

E-48 modeli rüzgar türbinin 60 metre kule yüksekliğindeki aylık ortalama rüzgar hızı verileri için  $V_{t1}$  hızındaki esme süresi (saat) grafiği Şekil 3.50’de, Türbin1 olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(V_{t1})$  grafiği Şekil 3.51’de gösterilmiştir.

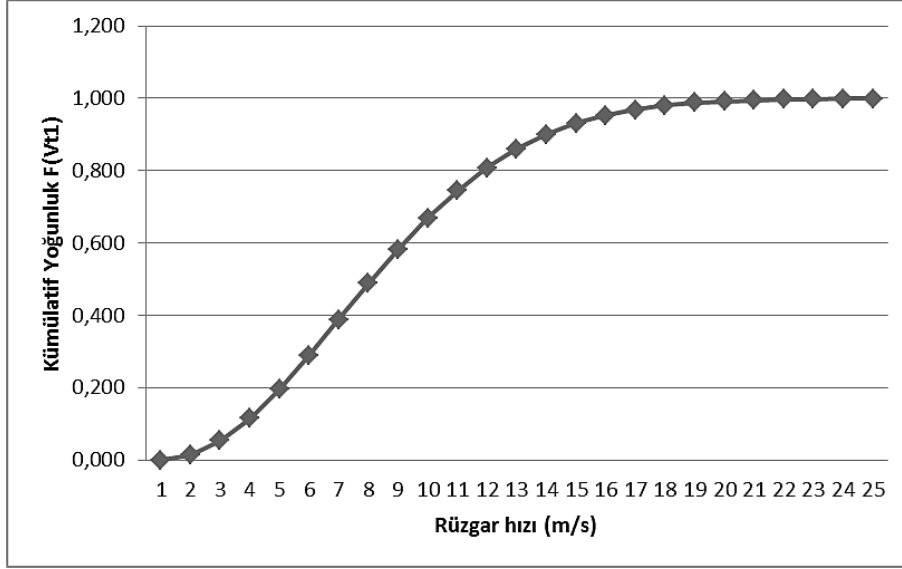


Şekil 3.50. Enercon E-48 modeli rüzgar türbini  $V_{t1}$  hızındaki esme süresi (saat) grafiği



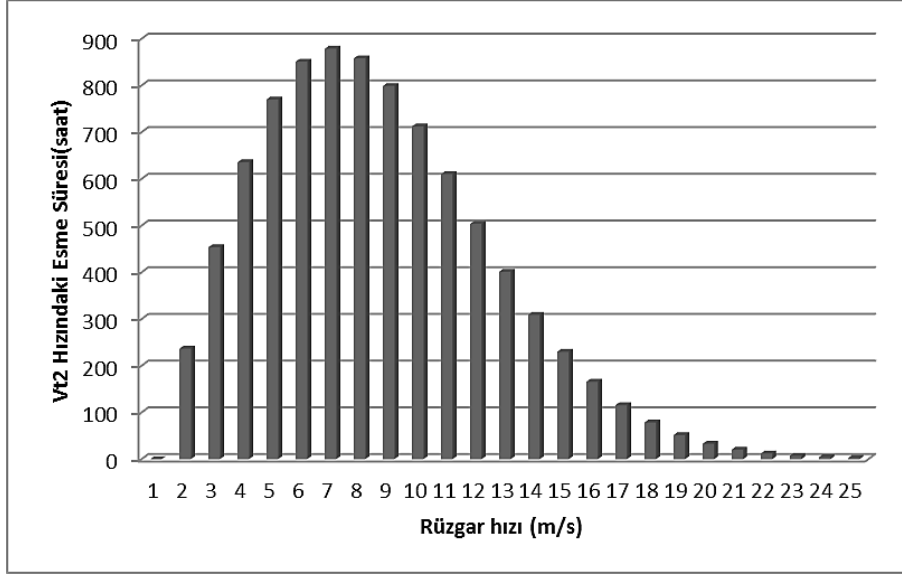
Şekil 3.51. Enercon E-48 modeli rüzgar türbini Türbin1 olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(V_{t1})$  grafiği

E-48 modeli rüzgar türbinin 60 metre kule yüksekliğindeki aylık ortalama rüzgar hızı verileri için Türbin1 kümülatif yoğunluk fonksiyonu  $F(V_{t1})$  grafiği Şekil 3.52’de gösterilmiştir.

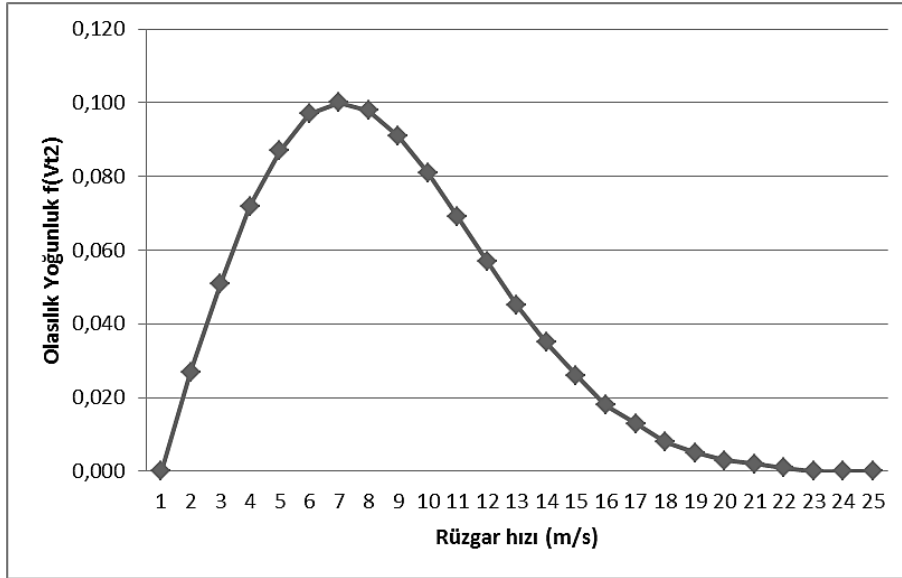


**Şekil 3.52.** Enercon E-48 modeli rüzgar türbinini Türbin1 kümülatif yoğunluk fonksiyonu  $F(V_{t1})$  grafiği

E-53 modeli rüzgar türbinin 60 metre kule yüksekliğindeki aylık ortalama rüzgar hızı verileri için  $V_{t2}$  hızındaki esme süresi (saat) grafiği Şekil 3.53’de, Türbin2 olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(V_{t2})$  grafiği Şekil 3.54’de, Türbin2 kümülatif yoğunluk fonksiyonu  $F(V_{t2})$  grafiği Şekil 3.55’de gösterilmiştir.



Şekil 3.53. Enercon E-53 modeli rüzgar türbini  $V_{12}$  hızındaki esme süresi (saat) grafiği



Şekil 3.54. Enercon E-53 modeli rüzgar türbini Türbin2 olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(V_{12})$  grafiği



**Şekil 3.55.** Enercon E-53 modeli rüzgar türbini Türbin2 kümülatif yoğunluk fonksiyonu  $F(V_{12})$  grafiği

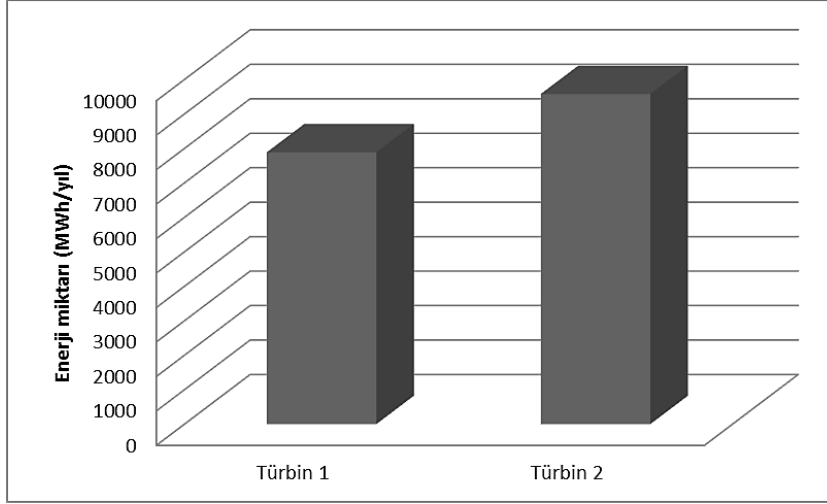
Aynı güçteki farklı rotor kanat çaplarına sahip Enercon marka E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbinlerin 60 metre kule yüksekliğindeki enerji üretimi analizine ait sonuçlar Çizelge 3.10'da gösterilmiştir.



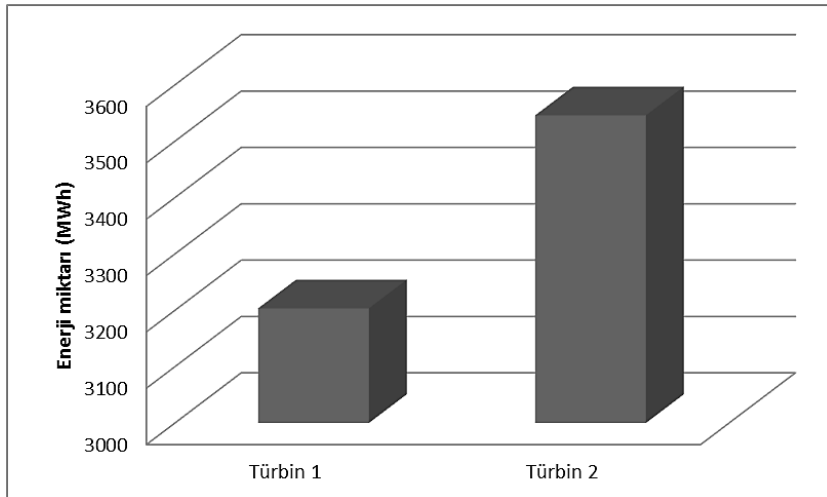
**Çizelge 3.10.** Enercon marka E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbinleri enerji üretimi analizine ait sonuçlar

Türbin1 Rüzgar Hızı Vt1(m/s)	Türbin1 Rüzgar Hızı - Güç (kW)	Türbin1 Üretilen Enerji (MWh)	Türbin1 Yüksekliğindeki Rüzgar Enerjisi Potansiyeli (MWh)	Türbin1 Verim (%)	Türbin2 Rüzgar Hızı Vt2(m/s)	Türbin2 Rüzgar Hızı - Güç (kW)	Türbin2 Üretilen Enerji (MWh)	Türbin2 Yüksekliğindeki Rüzgar Enerjisi Potansiyeli (MWh)	Türbin2 Verim (%)
7,5	0	0	7885,4	0	7,5	0	0	9577,5	0
7,5	0	0	7885,4	0	7,5	2	0,472	9577,5	0,18
7,5	5	2,268	7885,4	0,55	7,5	14	6,351	9577,5	1,28
7,5	25	15,88	7885,4	2,77	7,5	38	24,14	9577,5	3,47
7,5	60	46,2	7885,4	6,66	7,5	77	59,29	9577,5	7,04
7,5	110	93,61	7885,4	12,2	7,5	141	119,9	9577,5	12,8
7,5	180	158,1	7885,4	19,9	7,5	228	200,3	9577,5	20,8
7,5	275	235,9	7885,4	30,5	7,5	336	288,3	9577,5	30,7
7,5	400	319,5	7885,4	44,4	7,5	480	383,4	9577,5	43,9
7,5	555	395,3	7885,4	61,6	7,5	645	459,4	9577,5	58,9
7,5	671	409,5	7885,4	74,5	7,5	744	454	9577,5	68
7,5	750	377,8	7885,4	83,3	7,5	780	392,9	9577,5	71,3
7,5	790	316,9	7885,4	87,7	7,5	810	325	9577,5	74
7,5	810	250,1	7885,4	89,9	7,5	810	250,1	9577,5	74
7,5	810	186,2	7885,4	89,9	7,5	810	186,2	9577,5	74
7,5	810	134,2	7885,4	89,9	7,5	810	134,2	9577,5	74
7,5	810	93,68	7885,4	89,9	7,5	810	93,68	9577,5	74
7,5	810	63,39	7885,4	89,9	7,5	810	63,39	9577,5	74
7,5	810	41,59	7885,4	89,9	7,5	810	41,59	9577,5	74
7,5	810	26,46	7885,4	89,9	7,5	810	26,46	9577,5	74
7,5	810	16,34	7885,4	89,9	7,5	810	16,34	9577,5	74
7,5	810	9,796	7885,4	89,9	7,5	810	9,796	9577,5	74
7,5	810	5,7	7885,4	89,9	7,5	810	5,7	9577,5	74
7,5	810	3,22	7885,4	89,9	7,5	810	3,22	9577,5	74
7,5	810	1,767	7885,4	89,9	7,5	810	1,767	9577,5	74

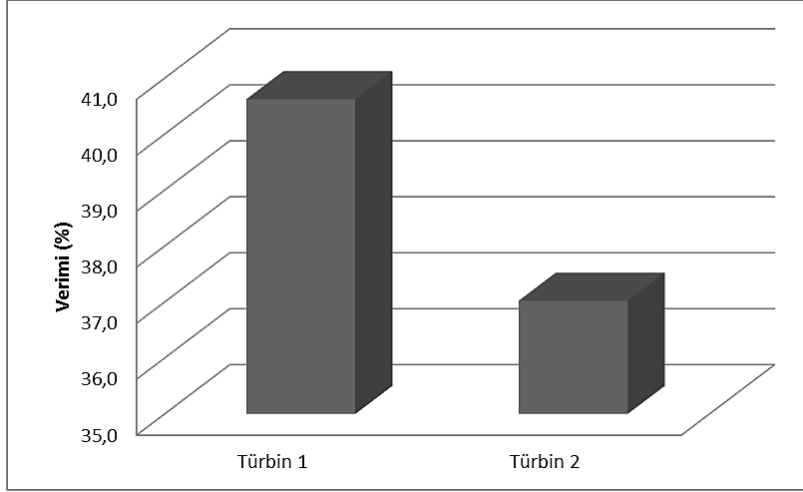
60 metre kule yüksekliğindeki farklı rotor kanat çaplarına sahip Enercon marka E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbinlerin ortalama rüzgar hızı verileri için türbin yüksekliğindeki yıllık rüzgar enerjisi potansiyeli (MWh) grafiği Şekil 3.56'da, türbinlerin üretilebileceği yıllık enerji (MWh) grafiği Şekil 3.57'de, ortalama türbin verimi (%) grafiği Şekil 3.58'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.56.** Enercon E-48 ve E-53 rüzgar türbinleri türbin yüksekliğindeki yıllık rüzgar enerjisi potansiyeli (MWh) grafiği



**Şekil 3.57.** Enercon E-48 ve E-53 rüzgar türbinlerinin üretilebileceği yıllık enerji (MWh) grafiği

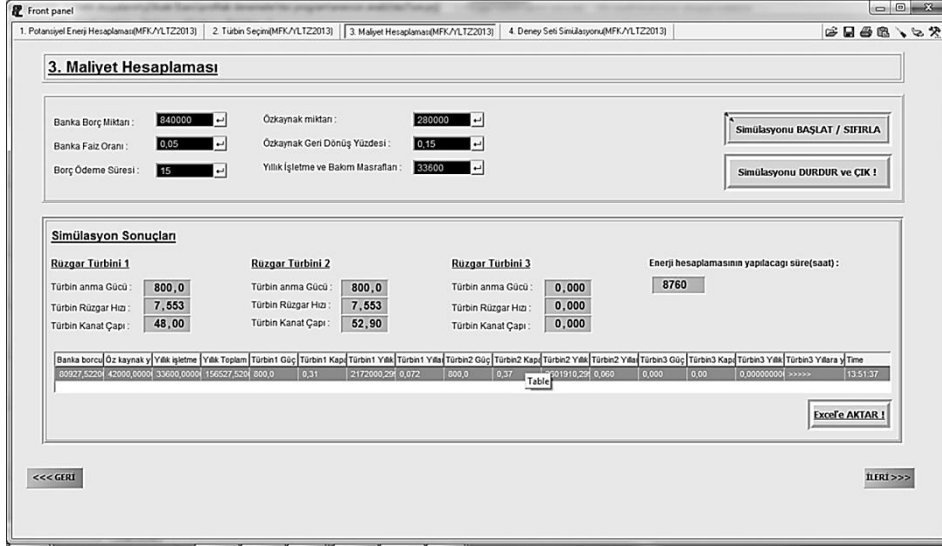


**Şekil 3.58.** Enercon E-48 ve E-53 rüzgar türbinleri ortalama türbin verimi (%) grafiği

Her iki rüzgar türbinini kule yüksekliği aynı olmasına rağmen E-53 modeli rüzgar türbinini rotor kanat çapının büyük olması enerji potansiyeli hesaplamasının sonucunu etkilemiştir.

Aynı güçteki farklı rotor kanat çaplarına sahip Enercon marka E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbinleriyle 60 metre kule yüksekliğinde ekonomiklik analizi yapılmıştır. Profilab-Expert 4.0 yazılımında geliştirilen programın aynı güçteki farklı rotor kanat çaplarına sahip E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbini ile 60 metre kule yüksekliklerindeki ekonomiklik analizi sonuçlarının ön panel ekranı Şekil 3.59'da gösterilmiştir.

Aynı güçteki farklı rotor kanat çaplarına sahip Enercon marka E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbinlerin 60 metre kule yüksekliğindeki enerji üretimi ve ekonomiklik analizine ait sonuçlar Çizelge 3.11 ve Çizelge 3.12'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.59.** Enercon E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbini ekonomiklik analizi sonuçlarının ön panel ekranı

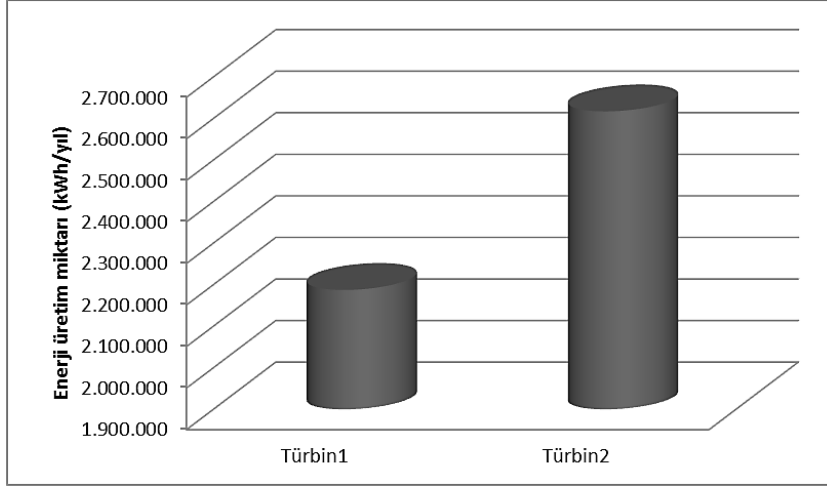
**Çizelge 3.11.** Enercon E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbini enerji üretimi analizine ait sonuçlar

	Güç (kW)	Kapasite Faktörü	Yıllık enerji üretim miktarı (kWh)	Yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı (ABD doları/kWh)
Türbin1	800	% 31,0	2.187.234	0,071
Türbin2	800	% 37,0	2.617.144	0,059

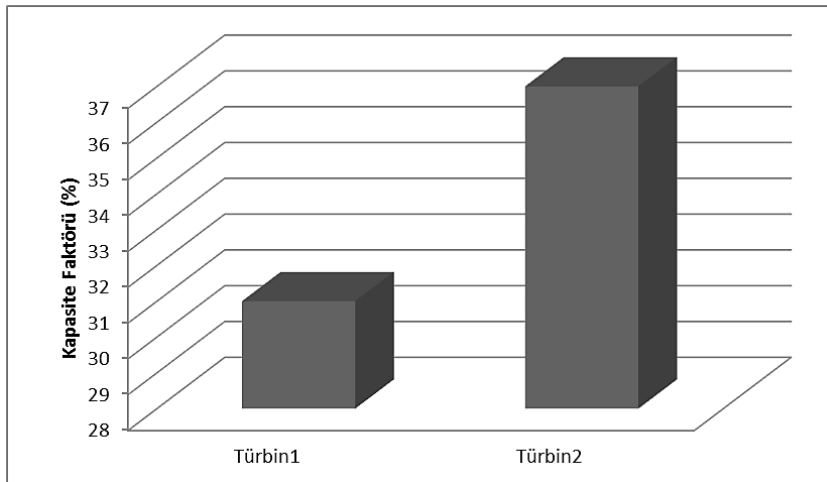
**Çizelge 3.12.** Enercon E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbini ekonomiklik analizine ait sonuçlar

	Banka borcu yıllık geri ödeme miktarı (ABD doları/yıl)	Öz kaynak yıllık geri ödeme miktarı (ABD doları/yıl)	Yıllık işletme ve bakım masrafları (ABD doları/yıl)	Yıllık Toplam Borç Ödeme Miktarı (ABD doları/yıl)
Türbin	80.928	42.000	33.600	156.528

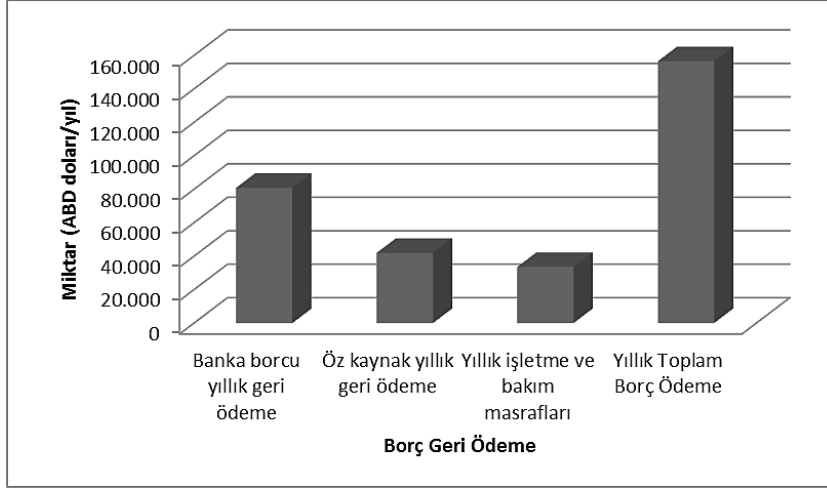
E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbinlerinin 60 metre kule yüksekliğindeki ortalama rüzgar hızı verileri için yıllık enerji üretim miktarı (kWh) grafiği Şekil 3.60'da, türbin kapasite faktörleri grafiği Şekil 3.61'de, yıllık toplam borç ödeme miktarı (ABD doları/yıl) grafiği Şekil 3.62'de, türbinlerin yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı (ABD doları/kWh) grafiği Şekil 3.63'de gösterilmiştir.



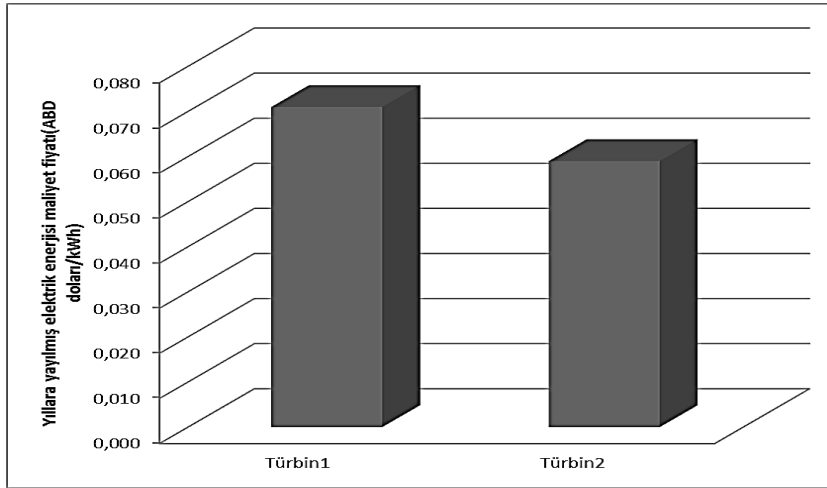
**Şekil 3.60.** Enercon E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbini yıllık enerji üretim miktarı (kWh) grafiği



**Şekil 3.61.** Enercon E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbini kapasite faktörleri grafiği



**Şekil 3.62.** Enercon E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbini yıllık toplam borç ödeme miktarı (ABD doları/yıl) grafiği



**Şekil 3.63.** Enercon E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbini yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı (ABD doları/kWh) grafiği

### 3.4. Datça 2010 Yılı Rüzgar Hızı Verilerinin Geliştirilen Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Uygulama Programı ve Deneysel Seti ile Simülasyonu

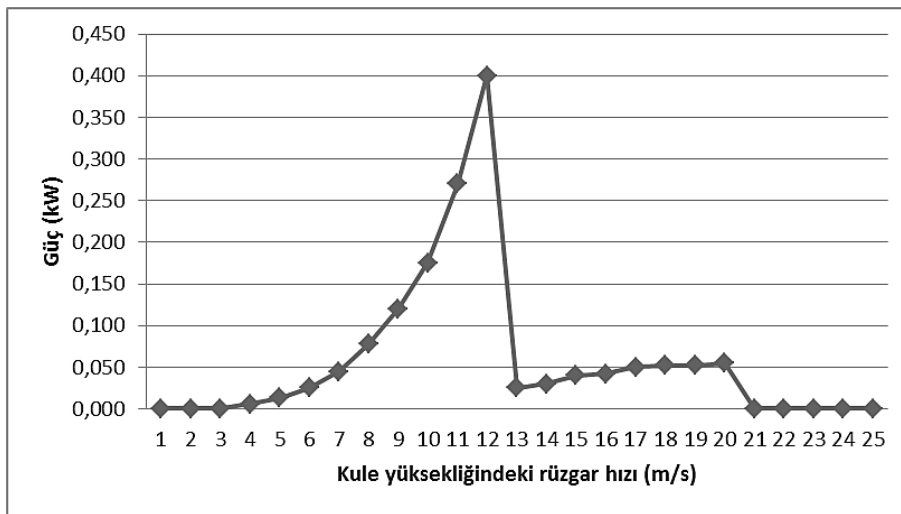
Profilab-Expert 4.0 yazılımında geliştirilen program ile Datça ilçesi için rüzgar enerjisi potansiyeli analizinde deneysel setine ait türbinin teknik değerleri ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü Muğla ili Datça ilçesi 2010 yılı günlük ortalama

rüzgar hızı verileri kullanılmıştır. Deney setindeki türbinin farklı kule yüksekliğindeki rüzgar hızları simüle edilerek enerji üretimi, verimlilik ve ekonomiklik analizi yapılmıştır. Deney setine ait rüzgar türbininin teknik özelliklerinin bir kısmı Çizelge 3.13’de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.13.** Deney setine ait rüzgar türbininin teknik özellikleri

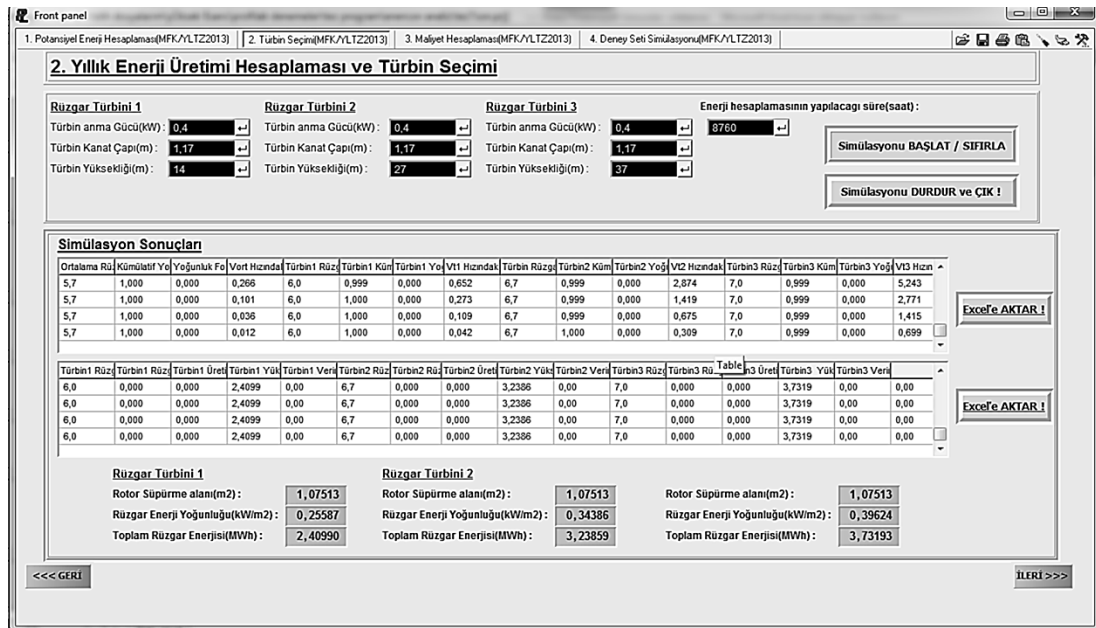
Anma Gücü (kW)	0,4
Rotor kanat çapı (m)	1,17
Kule yüksekliği (m)	10 / 14 / 18 / 27 / 37 / 46
Rotor süpürme alanı (m <sup>2</sup> )	1,075
Başlama rüzgar hızı (m/s)	3,6
Anma rüzgar hızı (m/s)	12,5
Durma rüzgar hızı (m/s)	14 - 22

Deney setine ait rüzgar türbinin kule yüksekliğindeki rüzgar hızlarında ürettiği güç değerleri Ek 3’de görülmektedir. Deney setine ait rüzgar türbinin güç eğrisi Şekil 3.64’de görülmektedir.



**Şekil 3.64.** Deney setine ait rüzgar türbinin güç eğrisi

Deney setine ait rüzgar türbini ile 14, 27 ve 37 metre kule yükseklikleri için Rayleigh dağılımı fonksiyonları ve enerji üretimi analizi yapılmıştır. Profilab-Expert 4.0 yazılımında geliştirilen programın deney setine ait rüzgar türbini ile 14, 27 ve 37 metre kule yüksekliklerindeki Rayleigh dağılımı fonksiyonları ve enerji üretimi analizi sonuçlarının ön panel ekranı Şekil 3.65’de gösterilmiştir. Farklı kule yüksekliklerindeki Rayleigh dağılımı fonksiyonlarına ait sonuçlar Çizelge 3.14’de gösterilmiştir.



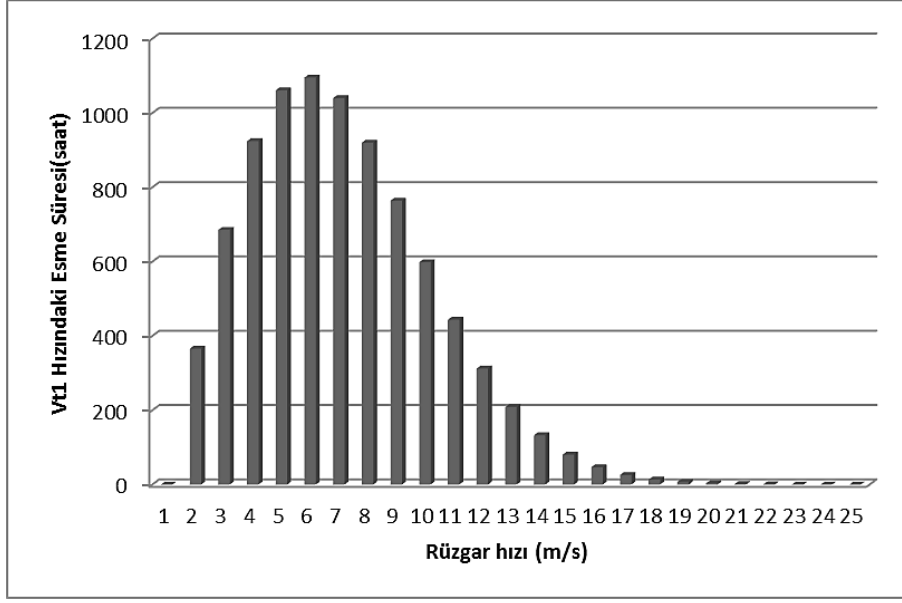
Şekil 3.65. Deney setine ait rüzgar türbini Rayleigh dağılımı fonksiyonları ve enerji üretimi analizi sonuçları ön panel ekranı

14 metre kule yüksekliğindeki aylık ortalama rüzgar hızı verileri için  $V_{t1}$  hızındaki esme süresi (saat) grafiği Şekil 3.66’da, Türbin1 olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(V_{t1})$  grafiği Şekil 3.67’de, Türbin1 kümülatif yoğunluk fonksiyonu  $F(V_{t1})$  grafiği Şekil 3.68’de gösterilmiştir.

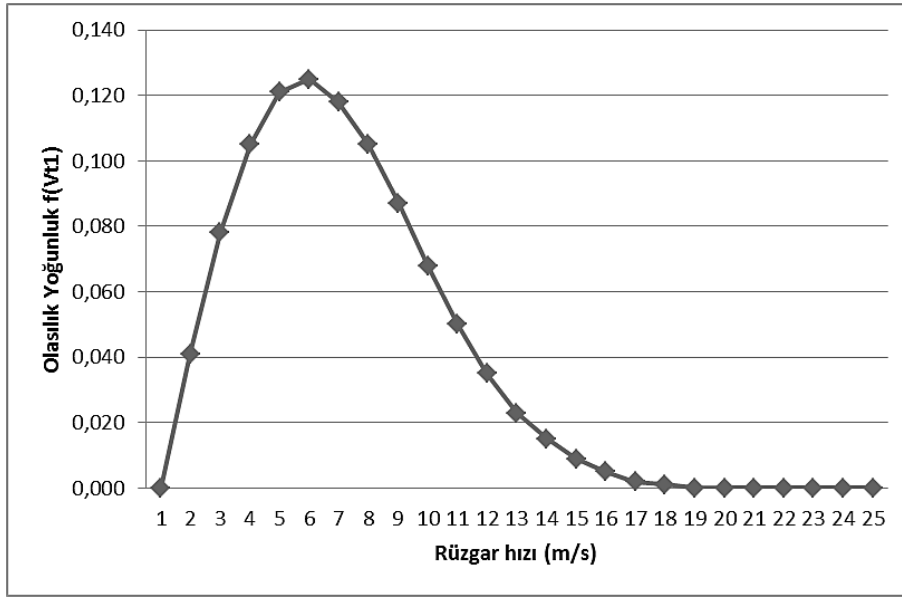


**Çizelge 3.14.** Deney setine ait rüzgar türbini Rayleigh dağılımı fonksiyonlarına ait sonuçlar

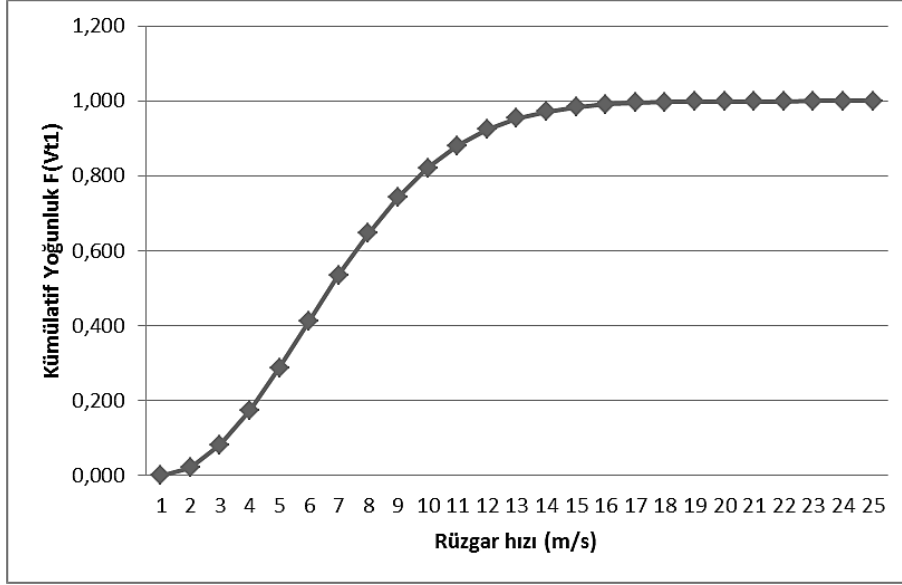
Rüzgar Hızı $V_r$ (m/s)	Ortalama Rüzgar Hızı Vort (m/s)	Kümülatif Yoğunluk Fonksiyonu F(Vort)	Yoğunluk Fonksiyonu f(Vort)	Vort Hızındaki Esme Süresi (saat)	Türbin1 Rüzgar Hızı V11 (m/s)	Türbin1 Kümlatif Yoğunluk Fonksiyonu F(V11)	Türbin1 Yoğunluk Fonksiyonu f(V11)	V11 Hızındaki Esme Süresi (saat)	Türbin Rüzgar Hızı V12 (m/s)	Türbin Kümlatif Yoğunluk Fonksiyonu F(V12)	Türbin2 Yoğunluk Fonksiyonu f(V12)	V12 Hızındaki Esme Süresi (saat)	Türbin3 Rüzgar Hızı V13 (m/s)	Türbin3 Kümlatif Yoğunluk Fonksiyonu F(V13)	Türbin3 Yoğunluk Fonksiyonu f(V13)	V13 Hızındaki Esme Süresi (saat)
0	5.7	0	0	0	6	0	0	0	6.7	0	0	0	7	0	0	0
1	5.7	0.023	0.046	403.2	6	0.021	0.041	365.3	6.7	0.017	0.034	301.1	7	0.015	0.031	274.4
2	5.7	0.089	0.085	751.3	6	0.081	0.078	685.4	6.7	0.067	0.065	571.4	7	0.061	0.059	523.2
3	5.7	0.191	0.114	1001	6	0.174	0.105	924.2	6.7	0.145	0.089	785.4	7	0.133	0.082	724.8
4	5.7	0.314	0.129	1132	6	0.288	0.121	1061	6.7	0.244	0.105	926.5	7	0.224	0.098	864.5
5	5.7	0.445	0.13	1145	6	0.412	0.125	1095	6.7	0.354	0.113	989.5	7	0.328	0.106	936.4
6	5.7	0.571	0.121	1060	6	0.535	0.118	1040	6.7	0.467	0.111	979.5	7	0.436	0.107	943.3
7	5.7	0.684	0.104	910.8	6	0.647	0.105	919.8	6.7	0.575	0.103	910.4	7	0.541	0.102	894.8
8	5.7	0.778	0.083	731	6	0.744	0.087	763.7	6.7	0.673	0.091	800.3	7	0.638	0.092	805.5
9	5.7	0.851	0.062	550.9	6	0.821	0.068	598.2	6.7	0.757	0.076	668.7	7	0.724	0.078	691.4
10	5.7	0.905	0.044	391.2	6	0.881	0.05	443.4	6.7	0.826	0.06	532.9	7	0.796	0.064	567.7
11	5.7	0.942	0.03	262.3	6	0.924	0.035	311.8	6.7	0.879	0.046	406	7	0.854	0.051	447.1
12	5.7	0.966	0.019	166.4	6	0.953	0.023	208.4	6.7	0.919	0.033	296.2	7	0.898	0.038	338.2
13	5.7	0.981	0.011	100	6	0.972	0.015	132.5	6.7	0.948	0.023	207.2	7	0.932	0.028	246.1
14	5.7	0.99	0.006	57.03	6	0.984	0.009	80.33	6.7	0.967	0.015	139.1	7	0.955	0.019	172.5
15	5.7	0.995	0.003	30.85	6	0.991	0.005	46.4	6.7	0.98	0.01	89.79	7	0.972	0.013	116.5
16	5.7	0.997	0.001	15.85	6	0.995	0.002	25.57	6.7	0.988	0.006	55.68	7	0.983	0.008	75.87
17	5.7	0.998	0	7.74	6	0.997	0.001	13.45	6.7	0.993	0.003	33.22	7	0.989	0.005	47.68
18	5.7	0.999	0	3.592	6	0.999	0	6.759	6.7	0.996	0.002	19.07	7	0.994	0.003	28.92
19	5.7	0.999	0	1.585	6	0.999	0	3.244	6.7	0.998	0.001	10.53	7	0.996	0.001	16.94
20	5.7	0.999	0	0.665	6	0.999	0	1.488	6.7	0.999	0	5.607	7	0.998	0.001	9.589
21	5.7	1	0	0.266	6	0.999	0	0.652	6.7	0.999	0	2.874	7	0.999	0	5.243
22	5.7	1	0	0.101	6	1	0	0.273	6.7	0.999	0	1.419	7	0.999	0	2.771
23	5.7	1	0	0.036	6	1	0	0.109	6.7	0.999	0	0.675	7	0.999	0	1.415
24	5.7	1	0	0.012	6	1	0	0.042	6.7	1	0	0.309	7	0.999	0	0.699



Şekil 3.66. Deney setine ait rüzgar türbini  $V_{t1}$  hızındaki esme süresi (saat) grafiği

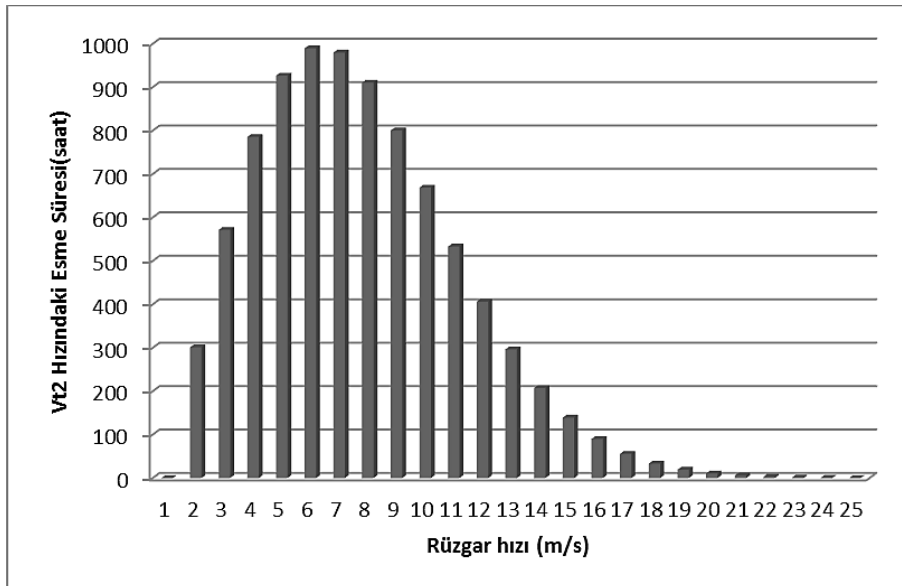


Şekil 3.67. Deney setine ait rüzgar türbini Türbin1 olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(V_{t1})$  grafiği

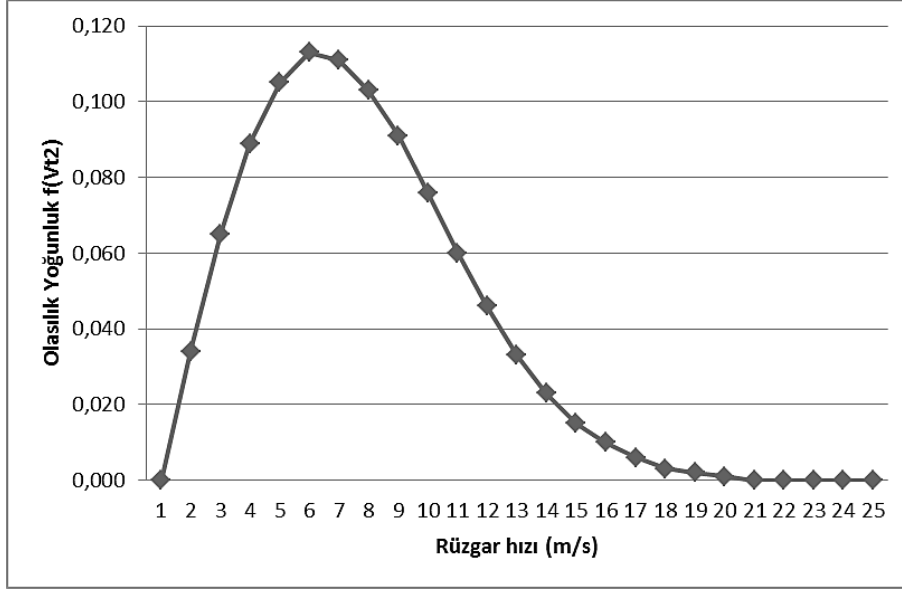


**Şekil 3.68.** Deney setine ait rüzgar türbini Türbin1 kümülatif yoğunluk fonksiyonu  $F(V_{t1})$  grafiği

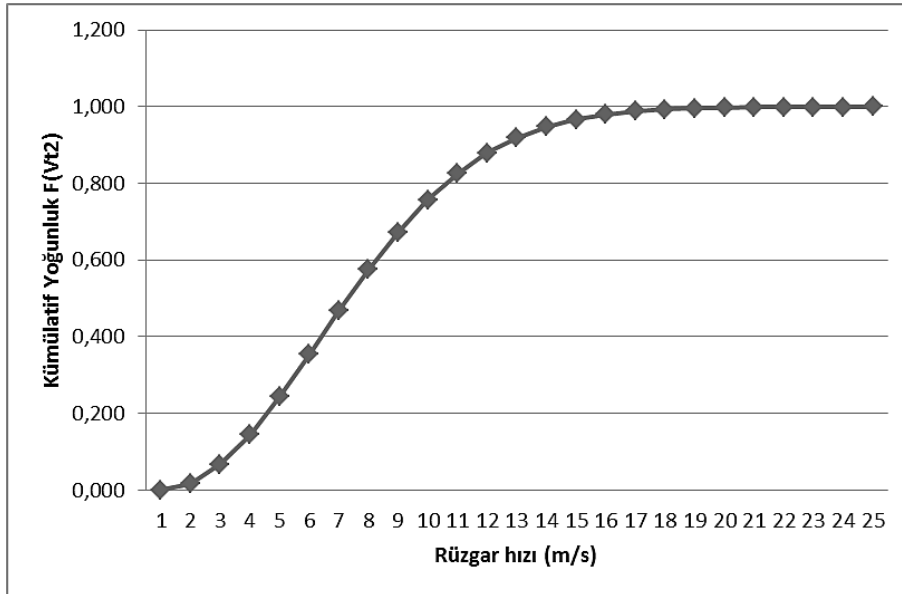
27 metre kule yüksekliğindeki aylık ortalama rüzgar hızı verileri için  $V_{t2}$  hızındaki esme süresi (saat) grafiği Şekil 3.69'da, Türbin2 olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(V_{t2})$  grafiği Şekil 3.70'de, Türbin2 kümülatif yoğunluk fonksiyonu  $F(V_{t2})$  grafiği Şekil 3.71'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.69.** Deney setine ait rüzgar türbini  $V_{t2}$  hızındaki esme süresi (saat) grafiği



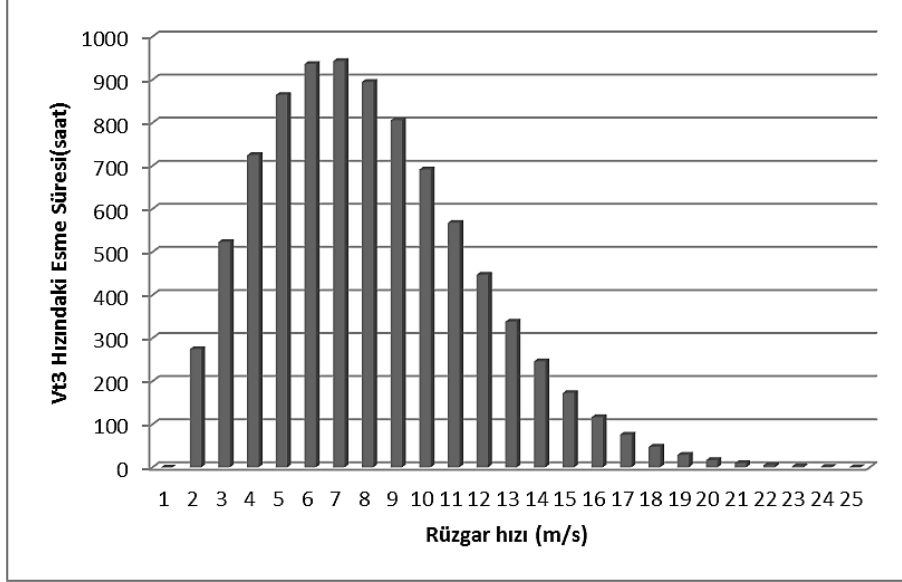
**Şekil 3.70.** Deney setine ait rüzgar türbini Türbin2 olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(V_{t2})$  grafiği



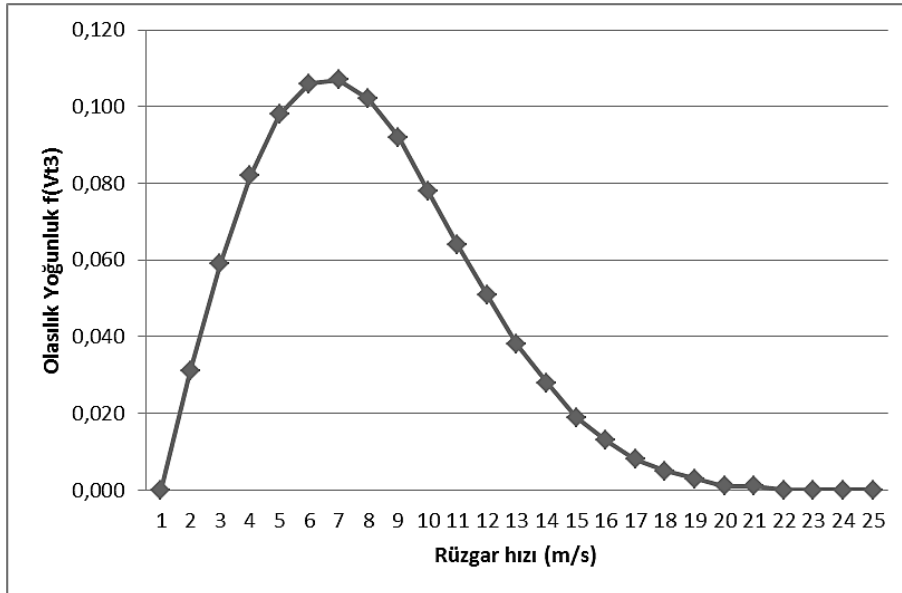
**Şekil 3.71.** Deney setine ait rüzgar türbini Türbin2 kümülatif yoğunluk fonksiyonu  $F(V_{t2})$  grafiği

37 metre kule yüksekliğindeki aylık ortalama rüzgar hızı verileri için  $V_{t3}$  hızındaki esme süresi (saat) grafiği Şekil 3.72'de, Türbin3 olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(V_{t3})$

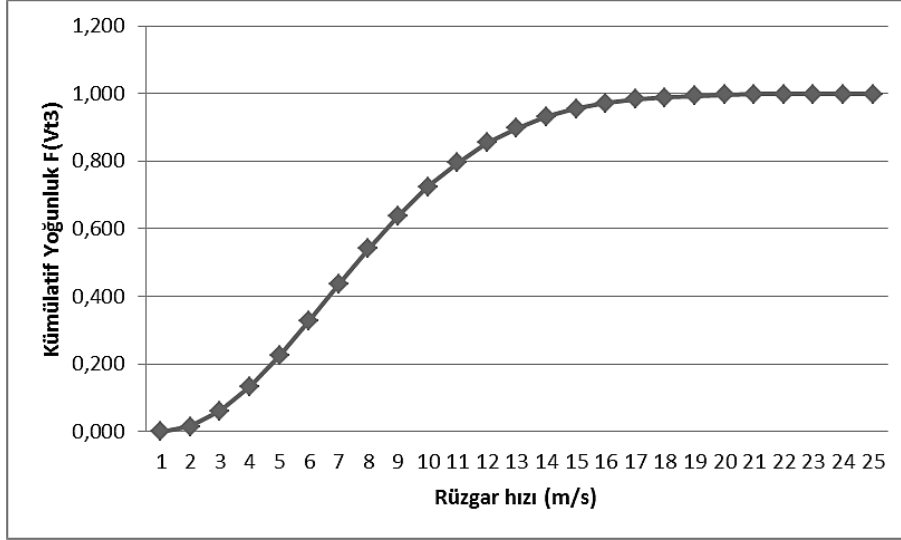
grafığı Şekil 3.73, Türbin3 kümülatif yoğunluk fonksiyonu  $F(V_{t3})$  grafığı Şekil 3.74'de gösterilmiştir.



Şekil 3.72. Deney setine ait rüzgar türbini  $V_{t3}$  hızındaki esme süresi (saat) grafığı



Şekil 3.73. Deney setine ait rüzgar türbini Türbin3 olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(V_{t3})$  grafığı



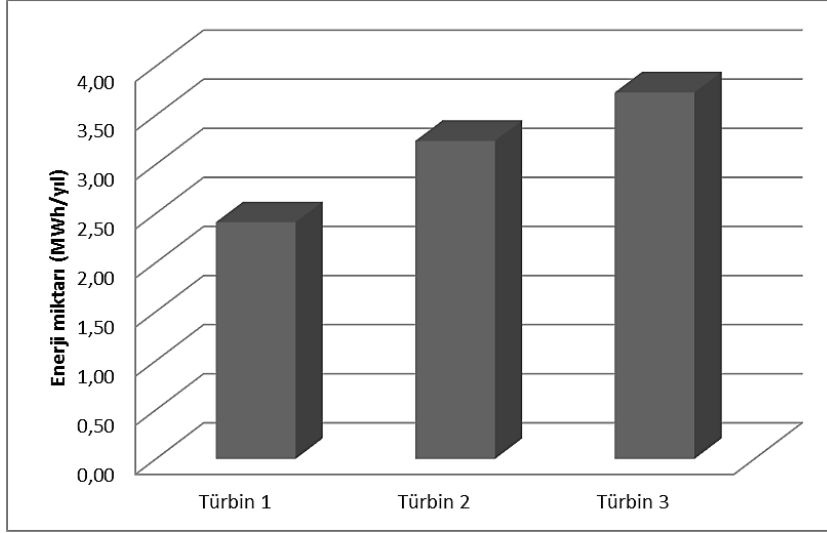
**Şekil 3.74.** Deney setine ait rüzgar türbini Türbin3 kümülatif yoğunluk fonksiyonu  $F(V_{13})$  grafiği

Deney setine ait rüzgar türbini ile 14, 27 ve 37 metre kule yüksekliklerindeki enerji üretimi analizine ait sonuçlar Çizelge 3.15’de gösterilmiştir.

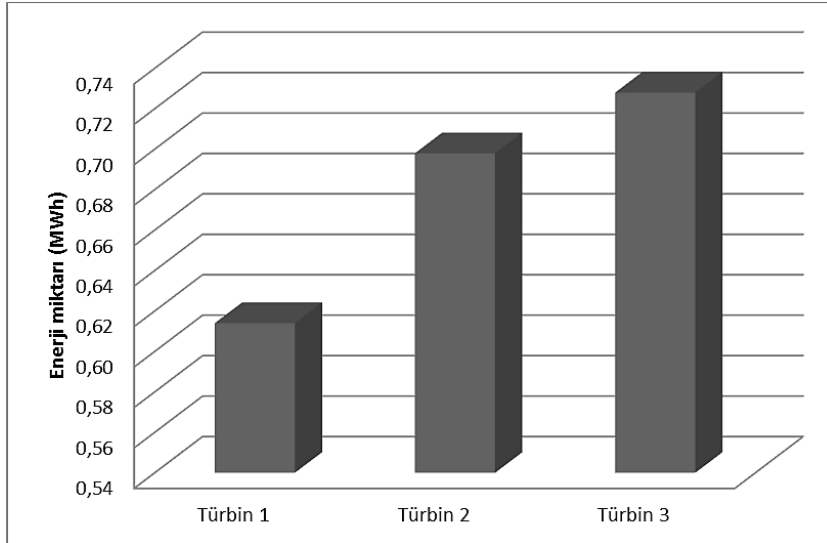
14, 27 ve 37 metre kule yüksekliğindeki ortalama rüzgar hızı verileri için türbin yüksekliğindeki yıllık rüzgar enerjisi potansiyeli (MWh) grafiği Şekil 3.75’de, türbinlerin üretilebileceği yıllık enerji (MWh) grafiği Şekil 3.76’da, ortalama türbin verimi (%) grafiği Şekil 3.77’de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.15.** Deney setine ait rüzgar türbini enerji üretimi analizine ait sonuçlar

Türbin1 Rüzgar Hızı V1(m/s)	Türbin1 Rüzgar Hızı Güç (kW)	Türbin1 Üretilen Enerji (MWh)	Türbin1 Yüksekliğindeki Rüzgar Enerjisi Potansiyeli (MWh)	Türbin1 Verim (%)	Türbin2 Rüzgar Hızı V2(m/s)	Türbin2 Rüzgar Hızı Güç (kW)	Türbin2 Üretilen Enerji (MWh)	Türbin2 Yüksekliğindeki Rüzgar Enerjisi Potansiyeli (MWh)	Türbin2 Verim (%)	Türbin3 Rüzgar Hızı V3(m/s)	Türbin3 Rüzgar Hızı Güç (kW)	Türbin3 Üretilen Enerji (MWh)	Türbin3 Yüksekliğindeki Rüzgar Enerjisi Potansiyeli (MWh)	Türbin3 Verim (%)
6	0	0	2,4099	0	6,7	0	0	3,2386	0	7	0	0	3,7319	0
6	0	0	2,4099	0	6,7	0	0	3,2386	0	7	0	0	3,7319	0
6	0	0	2,4099	0	6,7	0	0	3,2386	0	7	0	0	3,7319	0
6	0,006	0,005	2,4099	2,18	6,7	0,006	0,004	3,2386	1,62	7	0,006	0,004	3,7319	1,4
6	0,013	0,013	2,4099	4,72	6,7	0,013	0,012	3,2386	3,51	7	0,013	0,011	3,7319	3,05
6	0,025	0,027	2,4099	9,08	6,7	0,025	0,024	3,2386	6,76	7	0,025	0,023	3,7319	5,86
6	0,045	0,046	2,4099	16,3	6,7	0,045	0,044	3,2386	12,1	7	0,045	0,042	3,7319	10,5
6	0,078	0,071	2,4099	28,3	6,7	0,078	0,071	3,2386	21	7	0,078	0,069	3,7319	18,3
6	0,12	0,091	2,4099	43,6	6,7	0,12	0,096	3,2386	32,4	7	0,12	0,096	3,7319	28,1
6	0,175	0,104	2,4099	63,6	6,7	0,175	0,117	3,2386	47,3	7	0,175	0,121	3,7319	41
6	0,27	0,119	2,4099	98,1	6,7	0,27	0,143	3,2386	73	7	0,27	0,153	3,7319	63,3
6	0,4	0,124	2,4099	145	6,7	0,4	0,162	3,2386	108	7	0,4	0,178	3,7319	93,8
6	0,025	0,005	2,4099	9,08	6,7	0,025	0,007	3,2386	6,76	7	0,025	0,008	3,7319	5,86
6	0,03	0,004	2,4099	10,9	6,7	0,03	0,006	3,2386	8,11	7	0,03	0,007	3,7319	7,04
6	0,04	0,003	2,4099	14,5	6,7	0,04	0,005	3,2386	10,8	7	0,04	0,006	3,7319	9,38
6	0,042	0,001	2,4099	15,2	6,7	0,042	0,003	3,2386	11,3	7	0,042	0,004	3,7319	9,85
6	0,05	0,001	2,4099	18,1	6,7	0,05	0,002	3,2386	13,5	7	0,05	0,003	3,7319	11,7
6	0,052	0	2,4099	18,9	6,7	0,052	0,001	3,2386	14	7	0,052	0,002	3,7319	12,2
6	0,052	0	2,4099	18,9	6,7	0,052	0,001	3,2386	14	7	0,052	0,001	3,7319	12,2
6	0,055	0	2,4099	19,9	6,7	0,055	0	3,2386	14,8	7	0,055	0	3,7319	12,9
6	0	0	2,4099	0	6,7	0	0	3,2386	0	7	0	0	3,7319	0
6	0	0	2,4099	0	6,7	0	0	3,2386	0	7	0	0	3,7319	0
6	0	0	2,4099	0	6,7	0	0	3,2386	0	7	0	0	3,7319	0
6	0	0	2,4099	0	6,7	0	0	3,2386	0	7	0	0	3,7319	0
6	0	0	2,4099	0	6,7	0	0	3,2386	0	7	0	0	3,7319	0
6	0	0	2,4099	0	6,7	0	0	3,2386	0	7	0	0	3,7319	0
6	0	0	2,4099	0	6,7	0	0	3,2386	0	7	0	0	3,7319	0

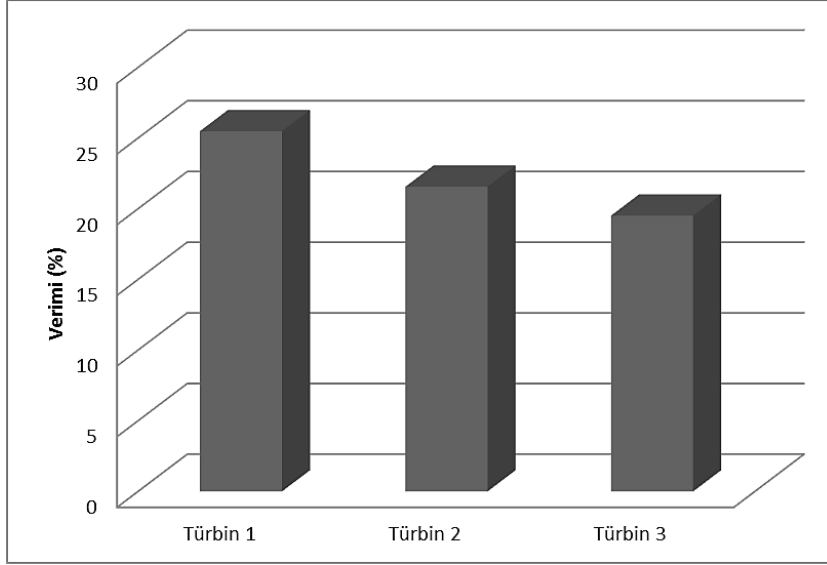


**Şekil 3.75.** Deney setine ait rüzgar türbini türbin yüksekliğindeki yıllık rüzgar enerjisi potansiyeli (MWh) grafiği



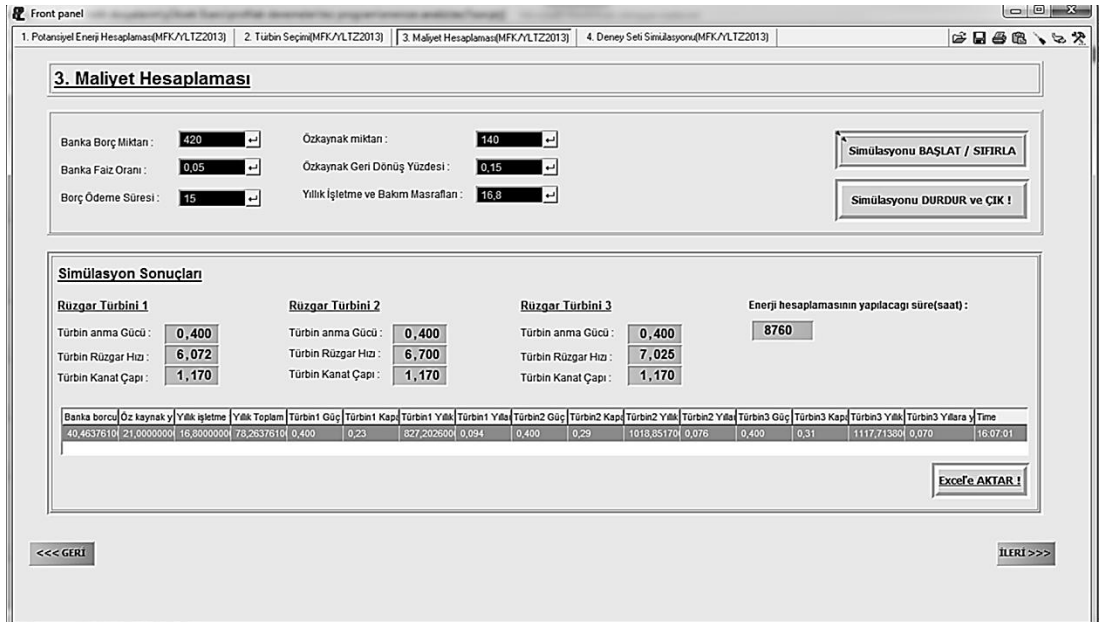
**Şekil 3.76.** Deney setine ait rüzgar türbini kule yüksekliğinde üretilebileceği yıllık enerji (MWh) grafiği





Şekil 3.77. Deney setine ait rüzgar türbini ortalama türbin verimi (%) grafiği

Profilab-Expert 4.0 yazılımında geliştirilen programın deney setine ait rüzgar türbini ile 14, 27 ve 37 metre kule yüksekliklerindeki ekonomiklik analizi sonuçlarının ön panel ekranı Şekil 3.78’de gösterilmiştir.



Şekil 3.78. Deney setine ait rüzgar türbini ekonomiklik analizi sonuçlarının ön panel ekranı

Deney setine ait rüzgar türbini ile 14, 27 ve 37 metre kule yüksekliklerindeki enerji üretimi ve ekonomiklik analizine ait sonuçlar Çizelge 3.16 ve Çizelge 3.17’de gösterilmiştir.

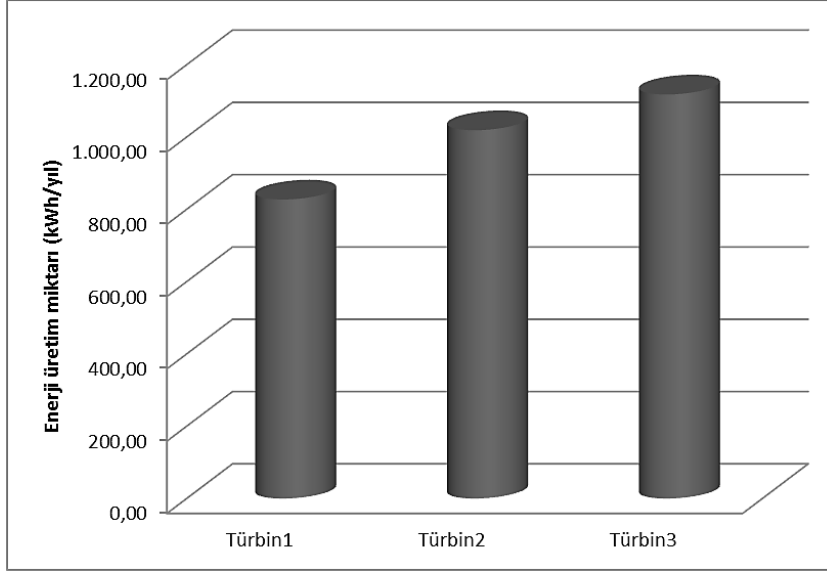
**Çizelge 3.16.** Deney setine ait rüzgar türbini enerji üretimi analizine ait sonuçlar

	Güç (kW)	Kapasite Faktörü	Yıllık enerji üretim miktarı (kWh)	Yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı (ABD doları/kWh)
Türbin1	0,4	% 23,0	827	0,094
Türbin2	0,4	% 29,0	1.019	0,076
Türbin3	0,4	% 31,0	1.118	0,070

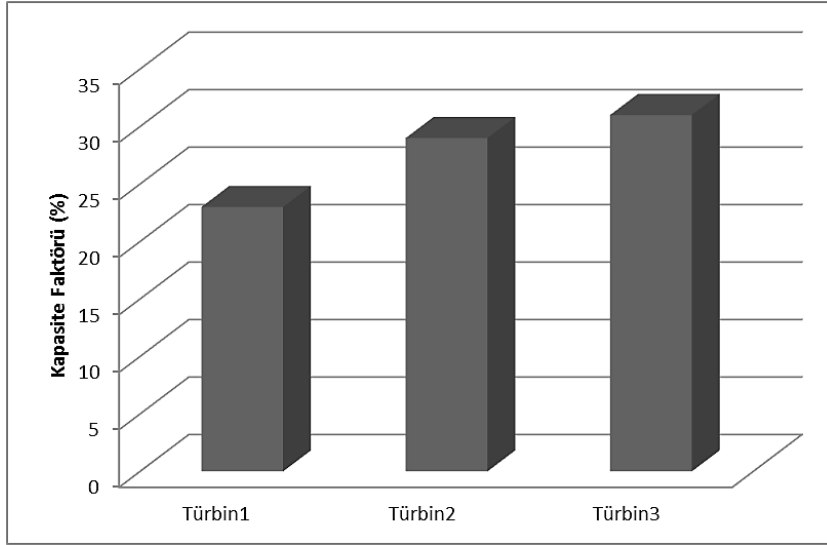
**Çizelge 3.17.** Deney setine ait rüzgar türbini ekonomiklik analizine ait sonuçlar

	Banka borcu yıllık geri ödeme miktarı (ABD doları/yıl)	Öz kaynak yıllık geri ödeme miktarı (ABD doları/yıl)	Yıllık işletme ve bakım masrafları (ABD doları/yıl)	Yıllık Toplam Borç Ödeme Miktarı (ABD doları/yıl)
Türbin	40	21	17	78

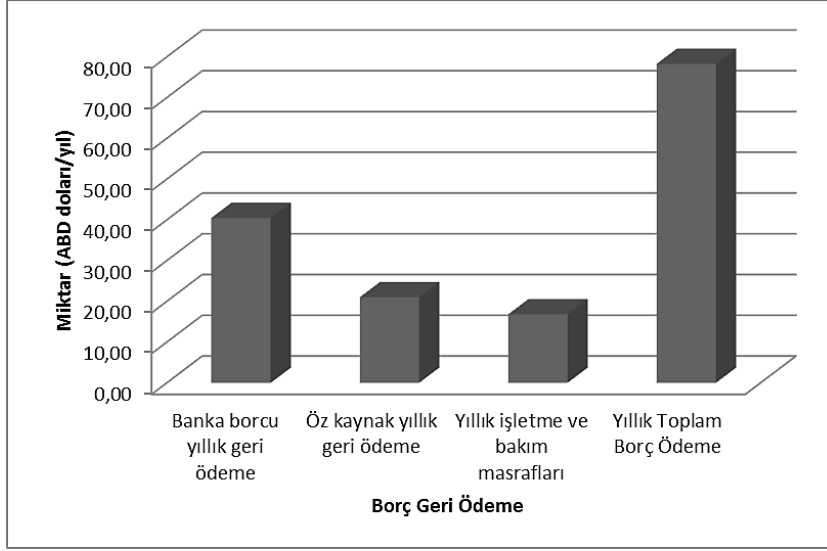
14, 27 ve 37 metre kule yüksekliğindeki rüzgar türbinlerinin ortalama rüzgar hızı verileri için kule yüksekliğindeki yıllık enerji üretim miktarı (kWh) grafiği Şekil 3.79’da, türbin kapasite faktörleri grafiği Şekil 3.80’de, yıllık toplam borç ödeme miktarı (ABD doları/yıl) grafiği Şekil 3.81’de, türbinlerin yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı (ABD doları/kWh) grafiği Şekil 3.82’de gösterilmiştir.



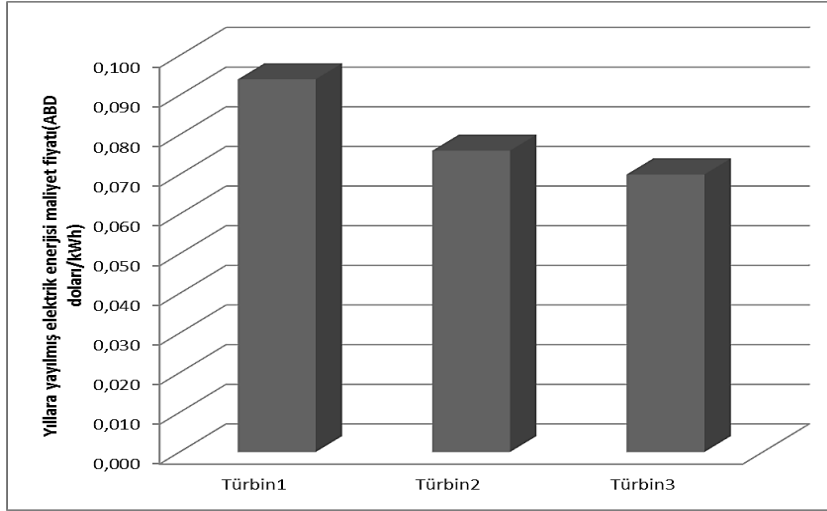
**Şekil 3.79.** Deney setine ait rüzgar türbini kule yüksekliğindeki yıllık enerji üretim miktarı (kWh) grafiği



**Şekil 3.80.** Deney setine ait rüzgar türbini kule yüksekliğindeki türbin kapasite faktörleri grafiği

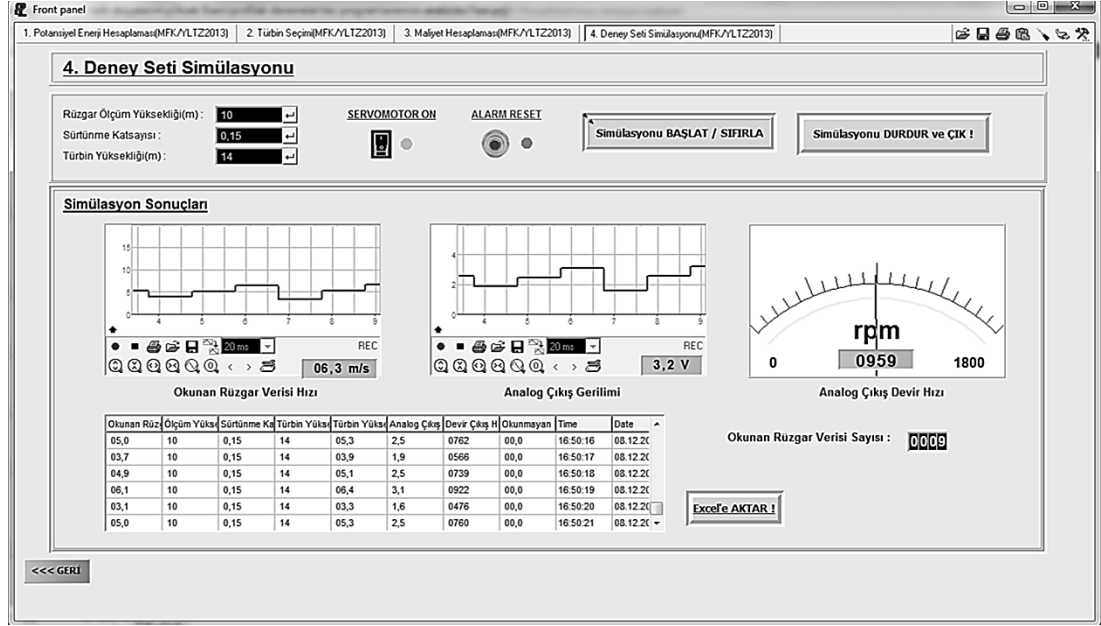


**Şekil 3.81.** Deney setine ait rüzgar türbini yıllık toplam borç ödeme miktarı (ABD doları/yıl) grafiği



**Şekil 3.82.** Deney setine ait rüzgar türbini yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı (ABD doları/kWh) grafiği

Teorik analiz tamamlandıktan sonra Profilab-Expert 4.0 yazılımında geliştirilen program ile 14, 27 ve 37 metre kule yüksekliklerindeki rüzgar hızları deney setinde simüle edilerek türbin çıkış akımının ölçülmesi yöntemiyle uygulama yapılmıştır. Profilab-Expert 4.0 yazılımında geliştirilen programın ön paneli Şekil 3.83'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.83.** Deney setine ait rüzgar türbini için geliştirilen uygulama programının ön panel ekranı

Profilab-Expert 4.0 yazılımında geliştirilen program ile 14, 27 ve 37 metre kule yüksekliklerindeki rüzgar hızları deney setinde simüle edilerek türbin çıkış akımının ölçülmesi yöntemiyle yapılan uygulamanın sonuçları sırasıyla Çizelge 3.18, Çizelge 3.19 ve Çizelge 3.20'de gösterilmiştir.

Deney sonuçlarına göre hesaplanan rüzgar türbininin 14, 27 ve 37 metre kule yüksekliklerindeki rüzgar hızlarında üretebileceği aylık enerji üretim miktarı sırasıyla Çizelge 3.21, Çizelge 3.22 ve Çizelge 3.23'de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.18.** Deney setine ait rüzgar türbini ile yapılan uygulamanın sonuçları (h=14 metre)

Ay	Gerilim (V)	Akım (I)	Devir (rpm)	Güç(watt)
Ocak	12,00	4,00	958	48
Şubat	12,50	6,40	1132	80
Mart	12,50	4,80	983	60
Nisan	12,00	2,00	776	24
Mayıs	12,00	0,60	579	7,2
Haziran	12,00	1,80	754	21,6
Temmuz	12,00	3,50	928	42
Ağustos	12,00	0,00	480	0
Eylül	12,00	2,20	775	26,4
Ekim	12,50	4,40	965	55
Kasım	12,00	2,80	814	33,6
Aralık	12,50	5,20	1044	65

**Çizelge 3.19.** Deney setine ait rüzgar türbini ile yapılan uygulamanın sonuçları (h=27 metre)

Ay	Gerilim (V)	Akım (I)	Devir (rpm)	Güç(watt)
Ocak	12,50	5,20	1058	65
Şubat	12,50	8,20	1248	102,5
Mart	12,50	6,20	1085	77,5
Nisan	12,00	3,00	846	36
Mayıs	12,00	1,00	639	12
Haziran	12,00	2,60	821	31,2
Temmuz	12,50	5,00	1024	62,5
Ağustos	12,00	0,20	537	2,4
Eylül	12,00	2,80	844	33,6
Ekim	12,50	5,30	1065	66,25
Kasım	12,50	3,60	898	45
Aralık	12,50	7,00	1152	87,5

**Çizelge 3.20.** Deney setine ait rüzgar türbini ile yapılan uygulamanın sonuçları (h=37 metre)

Ay	Gerilim (V)	Akım (I)	Devir (rpm)	Güç(watt)
Ocak	12,50	5,80	1110	72,5
Şubat	13,00	9,00	1309	117
Mart	12,50	7,00	1137	87,5
Nisan	12,50	4,00	887	50
Mayıs	12,00	1,20	669	14,4
Haziran	12,00	3,00	860	36
Temmuz	12,50	5,60	1074	70
Ağustos	12,00	0,40	563	4,8
Eylül	12,00	3,20	884	38,4
Ekim	12,50	6,20	1116	77,5
Kasım	12,50	4,20	941	52,5
Aralık	12,50	7,80	1209	97,5

**Çizelge 3.21.** Deney setine ait rüzgar türbini ile yapılan uygulamanın aylık enerji üretim miktarı sonuçları (h=14 metre)

Ay	Gerilim (V)	Akım (I)	Güç(kW)	Süre(saat)	Enerji (kWh)
Ocak	12,00	4,00	0,048	744	35,712
Şubat	12,50	6,40	0,080	744	59,520
Mart	12,50	4,80	0,060	744	44,640
Nisan	12,00	2,00	0,024	744	17,856
Mayıs	12,00	0,60	0,007	744	5,357
Haziran	12,00	1,80	0,022	744	16,070
Temmuz	12,00	3,50	0,042	744	31,248
Ağustos	12,00	0,00	0,000	744	0,000
Eylül	12,00	2,20	0,026	744	19,642
Ekim	12,50	4,40	0,055	744	40,920
Kasım	12,00	2,80	0,034	744	24,998
Aralık	12,50	5,20	0,065	744	48,360

**Çizelge 3.22.** Deney setine ait rüzgar türbini ile yapılan uygulamanın aylık enerji üretim miktarı sonuçları (h=27 metre)

Ay	Gerilim (V)	Akım (I)	Güç(kW)	Süre(saat)	Enerji (kWh)
Ocak	12,50	5,20	0,065	744	48,360
Şubat	12,50	8,20	0,103	744	76,260
Mart	12,50	6,20	0,078	744	57,660
Nisan	12,00	3,00	0,036	744	26,784
Mayıs	12,00	1,00	0,012	744	8,928
Haziran	12,00	2,60	0,031	744	23,213
Temmuz	12,50	5,00	0,063	744	46,500
Ağustos	12,00	0,20	0,002	744	1,786
Eylül	12,00	2,80	0,034	744	24,998
Ekim	12,50	5,30	0,066	744	49,290
Kasım	12,50	3,60	0,045	744	33,480
Aralık	12,50	7,00	0,088	744	65,100

**Çizelge 3.23.** Deney setine ait rüzgar türbini ile yapılan uygulamanın aylık enerji üretim miktarı sonuçları (h=37 metre)

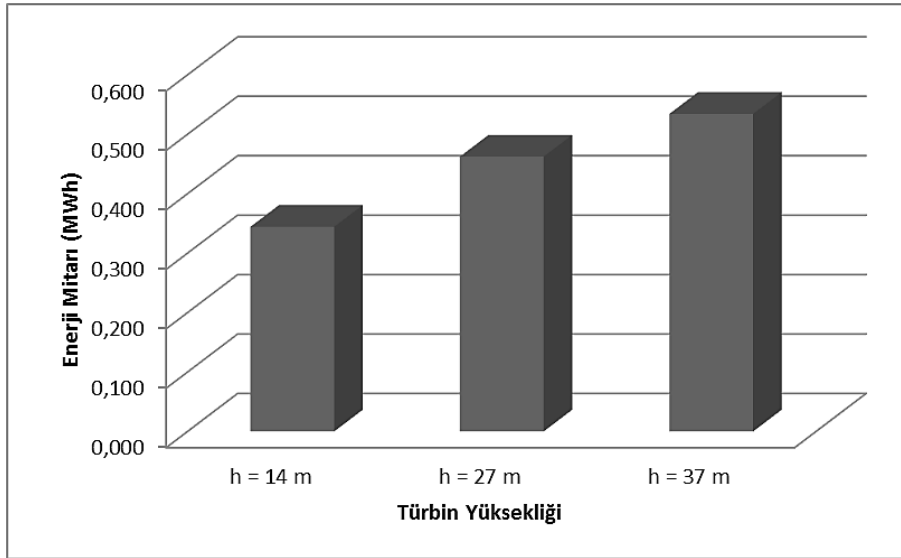
Ay	Gerilim (V)	Akım (I)	Güç(kW)	Süre(saat)	Enerji (kWh)
Ocak	12,50	5,80	0,073	744	53,940
Şubat	13,00	9,00	0,117	744	87,048
Mart	12,50	7,00	0,088	744	65,100
Nisan	12,50	4,00	0,050	744	37,200
Mayıs	12,00	1,20	0,014	744	10,714
Haziran	12,00	3,00	0,036	744	26,784
Temmuz	12,50	5,60	0,070	744	52,080
Ağustos	12,00	0,40	0,005	744	3,571
Eylül	12,00	3,20	0,038	744	28,570
Ekim	12,50	6,20	0,078	744	57,660
Kasım	12,50	4,20	0,053	744	39,060
Aralık	12,50	7,80	0,098	744	72,540



Deney sonuçlarına göre hesaplanan rüzgar türbininin 14, 27 ve 37 metre kule yüksekliklerindeki rüzgar hızlarında üretebileceği yıllık enerji üretim miktarı Çizelge 3.24’de ve yıllık enerji üretim miktarı grafiği Şekil 3.84’de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.24.** Deney setine ait rüzgar türbini ile yapılan uygulamanın yıllık enerji üretim miktarı sonuçları

Yükseklik	Üretilebilecek Yıllık Enerji Miktarı (MWh)
h = 14 m	0,344
h = 27 m	0,462
h = 37 m	0,534

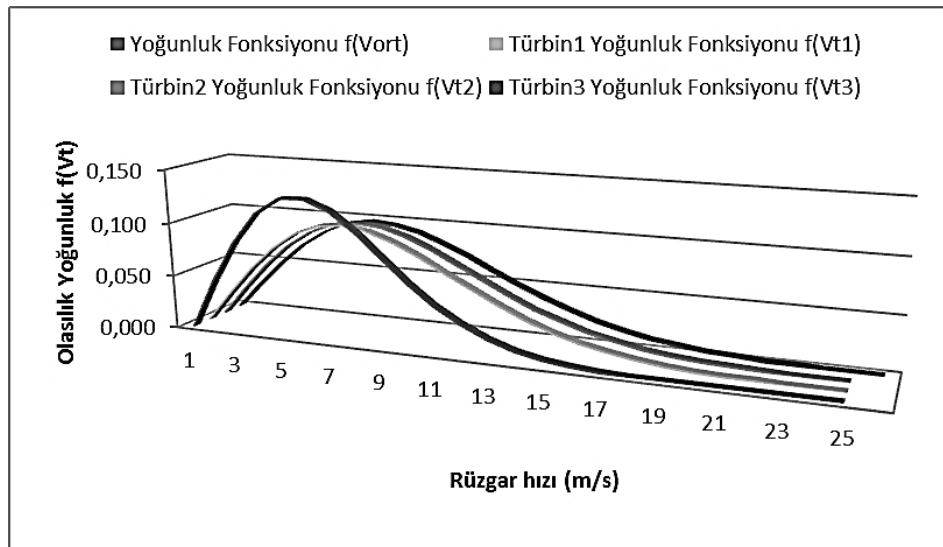


**Şekil 3.84.** Deney setine ait rüzgar türbini ile yapılan uygulamanın enerji üretim miktarı grafiği

#### 4. SONUÇLAR

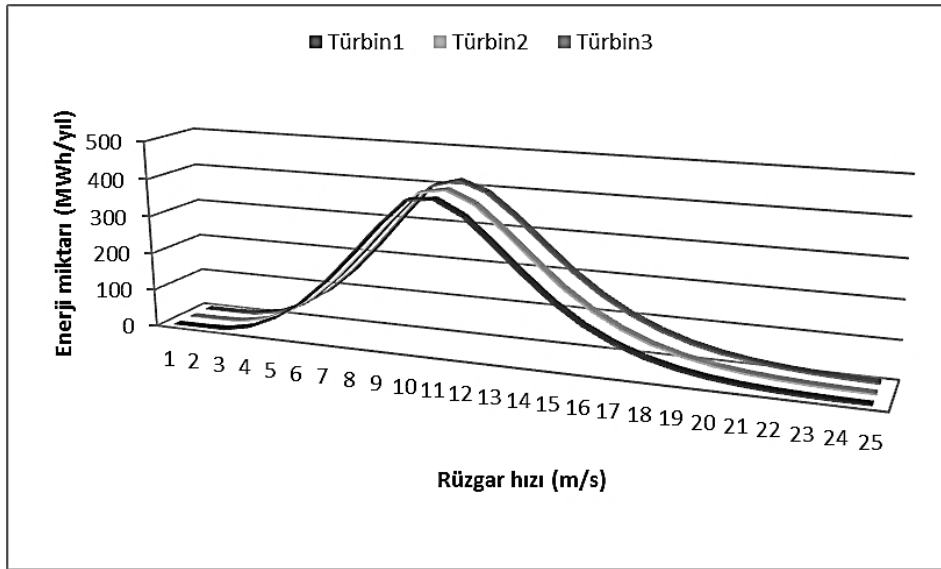
Profilab-Expert 4.0 yazılımında dört aşamalı rüzgar enerjisi analiz programı hazırlanmış ve Enercon marka farklı türbin modelleri için simülasyon yapılmıştır. Profilab-Expert 4.0 yazılımının çeşitli donanım aygıtlarını kontrol etmeye imkan vermesi nedeniyle, geliştirilen programın Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler biriminin 2012/111 numaralı proje kapsamında satın aldığı deney seti ile uygulama yapılmıştır.

Profilab-Expert 4.0 yazılımında hazırlanan program ile yapılan analizin ilk bölümünde Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbini ile 50, 60 ve 76 metre kule yüksekliklerindeki ve ölçüm yüksekliğindeki rüzgar enerjisi potansiyeli hesaplanmıştır. Sonuçlara ait Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonları bir arada Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Şekil 4.1'den de görüleceği üzere türbin yüksekliği arttıkça Rayleigh dağılımı fonksiyonu  $c$  ölçü parametresi değerinin büyüdüğü ve ortalama rüzgar hızının arttığı görülmüştür. Ortalama rüzgar hızının artışına paralel olarak rüzgar esme süresinin de değiştiği görülmüştür.



**Şekil 4.1.** Enercon E-48 rüzgar türbini 50, 60 ve 76 metre kule yüksekliğindeki ve ölçüm yüksekliğindeki Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonları

Analizin ikinci bölümünde Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbini ile 50, 60 ve 76 metre kule yüksekliklerindeki yıllık enerji üretim miktarı Rayleigh yöntemi ile türbin güç eğrilerinin eşleştirilmesiyle hesaplanmıştır. Rayleigh yöntemi ile yıllık rüzgar enerjisi potansiyelinin 50 metre kule yüksekliğinde 7.193 MWh, 60 metre kule yüksekliğinde 7.808 MWh, 76 metre kule yüksekliğinde 8.684MWh olduğu bulunmuştur. Türbinlerin üretebileceği yıllık enerji üretim miktarı 50 metre kule yüksekliğinde 3.068 MWh, 60 metre kule yüksekliğinde 3.189 MWh, 76 metre kule yüksekliğinde 3.345 MWh olduğu bulunmuştur. Türbinlerin üretebileceği yıllık enerji miktarı grafiği toplu halde Şekil 4.2’de görülmektedir. Maksimum yıllık enerji üretiminin 10m/s rüzgar hızında 76 metre kule yüksekliğindeki türbin tarafından üretileceği görülmüştür.



**Şekil 4.2.** Enercon E-48 rüzgar türbini 50, 60 ve 76 metre kule yüksekliğinde üretebileceği yıllık enerji miktarı grafiği

Analizin üçüncü bölümünde Rayleigh fonksiyonu ölçü parametresinin ortalama rüzgar hızı ile ilişkisinden dolayı kule yüksekliğinin kapasite faktörüne ve elektrik enerjisi maliyet fiyatına etkisi incelenmiştir. Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbininin 50 metre kule yüksekliğinde kapasite faktörü % 29, 60 metre kule

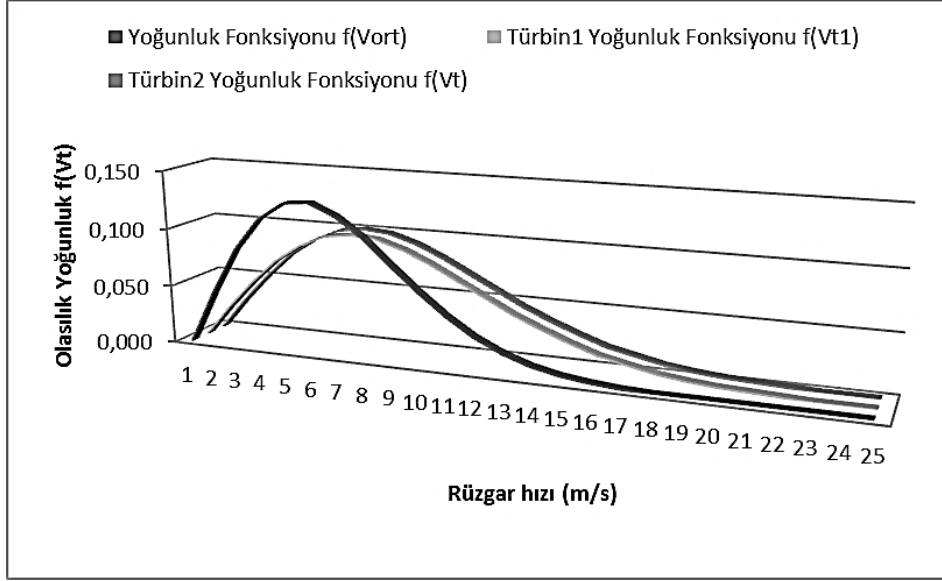
yüksekliğinde kapasite faktörü % 31 ve 76 metre kule yüksekliğinde kapasite faktörü % 33 olarak bulunmuştur. Yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı Çizelge 4.1’de görüldüğü üzere kapasite faktörü en yüksek olan 76 metre kule yüksekliğine sahip türbin için en düşük bulunmuştur.

**Çizelge 4.1.** Enercon E-48 rüzgar türbini 50, 60 ve 76 metre kule yüksekliğindeki kapasite faktörü ve elektrik maliyet fiyatı sonuçları

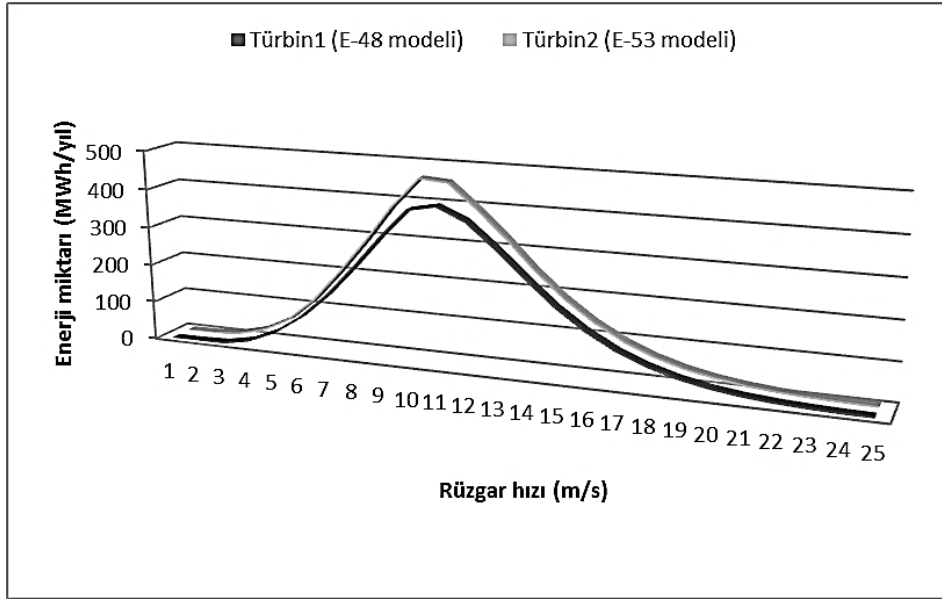
	Kapasite Faktörü (%)	Yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı (ABD doları/kWh)
Türbin1	29	0,076
Türbin2	31	0,072
Türbin3	33	0,066

Analizin dördüncü bölümünde rotor kanat çapı değişiminin Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonlarına etkisi incelenmiştir. Aynı güçteki farklı rotor kanat çaplarına sahip Enercon marka E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbinlerin 60 metre kule yüksekliğindeki Rayleigh dağılımı fonksiyonları Şekil 4.3’de görülmektedir. Rotor kanat çapı boyu değişiminin  $c$  ölçü parametresi üzerinde herhangi bir değişikliğe neden olmadığı gözlemlenmiştir.

Analizin beşinci bölümünde aynı kule yüksekliğinde 48 metre ve 52,9 metre rotor kanat çapına sahip aynı güçteki Enercon marka E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbini ile rüzgar enerjisi yıllık üretim miktarı Rayleigh istatistiksel yöntemi ile hesaplanmıştır. Rüzgar enerjisi üretimi miktarının 48 metre rotor kanat çapına sahip E-48 modeli türbin için 3.203 MWh, 53 metre rotor kanat çapına sahip E-53 modeli türbin için 3.546 MWh olduğu bulunmuştur. Türbinlerin üretebileceği yıllık enerji miktarı grafiği Şekil 4.4’de görülmektedir. Maksimum yıllık enerji üretiminin 10 m/s rüzgar hızında 53 metre rotor kanat çapına sahip E-53 modeli türbin tarafından üretildiği görülmüştür.



**Şekil 4.3.** Enercon E-48 ve E-53 rüzgar türbinleri 60 metre kule yüksekliğindeki Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonları



**Şekil 4.4.** Enercon E-48 ve E-53 rüzgar türbinleri 60 metre kule yüksekliğindeki üretebileceği yıllık enerji miktarı grafiği

Analizin altıncı bölümünde aynı kule yüksekliğindeki ve aynı güçteki Enercon marka 48 metre rotor kanat çapına sahip E-48 modeli rüzgar türbininin kapasite faktörü % 31, 52,9 metre rotor kanat çapına sahip E-53 modeli rüzgar türbininin kapasite faktörü % 37 olarak bulunmuştur. Yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı Çizelge 4.2’de görüldüğü üzere kapasite faktörü en yüksek olan 52,9 metre rotor kanat çapına sahip E-53 modeli rüzgar türbini için en düşük bulunmuştur.

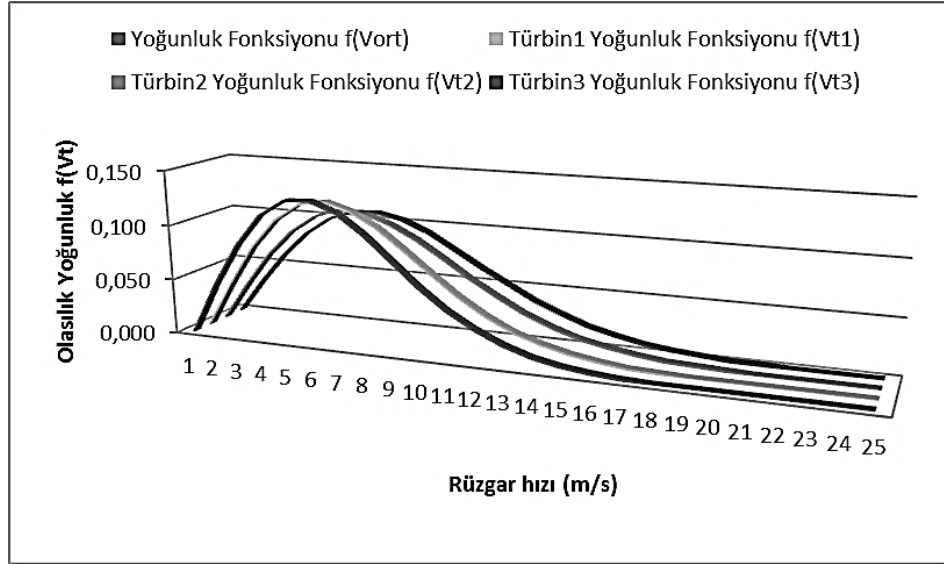
**Çizelge 4.2.** Enercon E-48 ve E-53 rüzgar türbinleri 60 metre kule yüksekliğindeki kapasite faktörü ve yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı sonuçları

	Kapasite Faktörü (%)	Yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı (ABD doları/kWh)
Türbin1	31	0,071
Türbin2	37	0,059

Enercon marka E-48 modeli rüzgar türbininin yıllık enerji üretim miktarı en fazla 76 metre kule yüksekliğinde 3.345 MWh, kapasite faktörü ise % 33 olarak bulunmuştur. Yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı 0,066 ABD doları/kWh bulunmuştur. Enercon marka E-53 modeli rüzgar türbininin yıllık enerji üretim miktarı 60 metre kule yüksekliğinde 53 metre rotor kanat çapı için 3.546 MWh, kapasite faktörü % 37 olarak bulunmuştur. Yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı 0,059 ABD doları/kWh bulunmuştur. Profilab-Expert 4.0 yazılımında geliştirilen rüzgar enerjisi analizi programında Enercon marka türbinler için farklı kule yüksekliği ve farklı rotor çapı için yapılan analiz sonucunda rotor çapı ve kule yüksekliğinin birlikte değişiminin yıllık enerji üretim miktarı ve elektrik enerjisi maliyet fiyatını çok hızlı bir şekilde değiştirdiği görülmüştür.

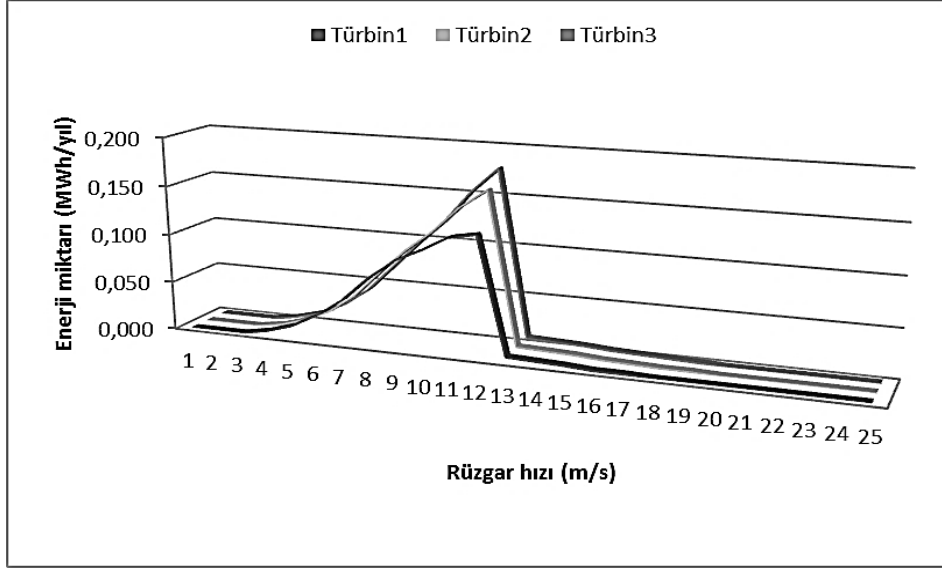
Analizin yedinci bölümünde deney setine ait rüzgar türbini ile 14, 27 ve 37 metre kule yüksekliklerindeki ve ölçüm yüksekliğindeki rüzgar enerjisi potansiyeli hesaplanmıştır. Sonuçlara ait Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonları bir arada

Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Şekil 4.5’den görüleceği üzere türbin yüksekliği arttıkça  $c$  ölçü parametresi değerinin büyüdüğü ve ortalama rüzgar hızının arttığı görülmüştür. Ortalama rüzgar hızının artışına paralel olarak rüzgar esme süresinin de değiştiği görülmüştür.



**Şekil 4.5.** Deney setine ait rüzgar türbininin 14, 27 ve 37 metre kule yüksekliğindeki ve ölçüm yüksekliğindeki Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonları

Analizin sekizinci bölümünde deney setine ait rüzgar türbini ile 14, 27 ve 37 metre kule yüksekliğindeki yıllık enerji üretim miktarı Rayleigh yöntemi ile türbin güç eğrilerinin eşleştirilmesiyle hesaplanmıştır. Türbinlerin üretebileceği yıllık enerji miktarı 14 metre kule yüksekliğinde 0,614 MWh, 27 metre kule yüksekliğinde 0,698 MWh, 37 metre kule yüksekliğinde 0,728 MWh bulunmuştur. Türbinlerin üretebileceği yıllık enerji miktarı grafiği Şekil 4.6’da görülmektedir. Maksimum yıllık enerji üretiminin 11 m/s rüzgar hızında 37 metre kule yüksekliğindeki türbin tarafından üretileceği görülmüştür.



**Şekil 4.6.** Deney setine ait rüzgar türbini 14, 27 ve 37 metre kule yüksekliğinde üretebilecek yıllık enerji miktarı grafiği

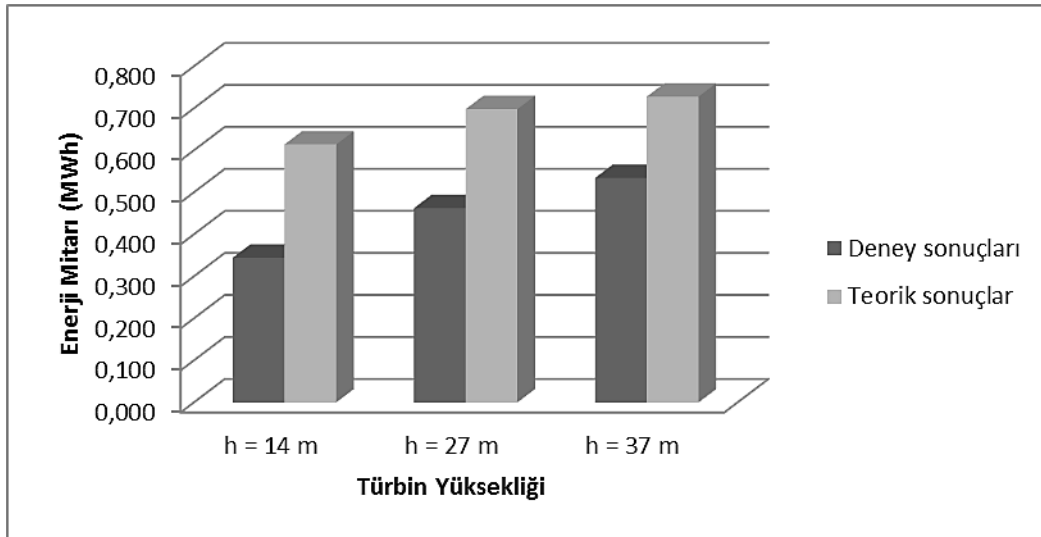
Analizin dokuzuncu bölümünde deney setine ait rüzgar türbininin 14 metre kule yüksekliğinde kapasite faktörü % 23, 27 metre kule yüksekliğinde kapasite faktörü % 29 ve 37 metre kule yüksekliğinde kapasite faktörü % 31 olarak bulunmuştur. Yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı Çizelge 4.3’de görüldüğü üzere kapasite faktörü en yüksek olan 37 metre kule yüksekliğine sahip türbin için en düşük bulunmuştur.

**Çizelge 4.3.** Deney setine ait rüzgar türbini 14, 27 ve 37 metre kule yüksekliğindeki kapasite faktörü ve yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı sonuçları

	Kapasite Faktörü (%)	Yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatı (ABD doları/kWh)
Türbin1	23	0,094
Türbin2	29	0,076
Türbin3	31	0,070



Analizin onuncu bölümünde Profilab-Expert 4.0 yazılımında geliştirilen program aracılığıyla rüzgar hızları simüle edilerek deney seti ile deney yapılmıştır. Deney seti ile yapılan deney sonuçları kullanılarak rüzgar türbininin 14, 27 ve 37 metre kule yüksekliklerindeki üretebileceği yıllık enerji miktarı hesaplanmıştır. Yapılan hesaplama sonucunda rüzgar türbininin üretebileceği yıllık elektrik enerjisinin 14 metre kule yüksekliğinde 0,344 MWh, 27 metre kule yüksekliğinde 0,462 MWh, 14 metre kule yüksekliğinde 0,534 MWh olduğu bulunmuştur. Deney setine ait rüzgar türbini için Rayleigh istatistiksel yöntemi ile yapılan teorik hesaplama sonucu ve deney sonuçlarına ait değerler kullanılarak yapılan hesaplama sonuçları Şekil 4.7’de görülmektedir. Deney sonuçları ile yapılan hesaplama sonucunda yıllık enerji üretim miktarı teorik hesaplama göre daha düşük bulunmuştur.



**Şekil 4.7.** Deney setine ait rüzgar türbini farklı kule yükseklikleri için deney sonuçları ve teorik hesaplamada üretebilecek yıllık enerji miktarı grafiği

Profilab-Expert 4.0 yazılımında geliştirilen bu program ile rüzgar enerjisi potansiyeli, enerji üretimi, kapasite faktörü, ekonomiklik analizi ve deney uygulaması Datça ilçesi 2010 yılı günlük ortalama rüzgar hızı verileri kullanılarak yapılmıştır. Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu ölçü parametresinin yüksekliğe bağlı değiştiği ve enerji

üretimi miktarı, kapasite faktörünü ve yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatını etkilediği gözlemlenmiştir. Rotor kanat çapı değişiminin Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu ölçü parametresini değiştirmedeği ancak enerji üretimi miktarını, kapasite faktörünü ve yıllara yayılmış elektrik enerjisi maliyet fiyatını kule yüksekliğinin değişimine göre daha fazla etkilediği gözlemlenmiştir.

Deney seti ile yapılan uygulama sonucunda hesaplanan enerji üretimi miktarı teorik hesaplama göre daha düşük bulunmuştur. Teorik hesaplama da standart rüzgar türbini güç eğrisini temel alınmıştır. Deney setine ait rüzgar türbinin güç eğrisi incelendiğinde standart güç eğrisi yapısından farklı olduğu ve ayrıca anma rüzgar hızı geçildikten sonra güç üretiminin sıfıra yakın bir değere indiği görülmektedir. Deney setine ait teknik özellikler incelendiğinde anma rüzgar hızı geçildikten sonra güç üretiminin sıfıra yakın bir değere inmesinin rüzgar türbinin içinde bulunan elektronik kartın korunması amacıyla uygulandığı görülmüştür. Teorik analiz Rayleigh yöntemi ile standart güç eğrisi eşleştirilmesine dayandığı için deney setine ait rüzgar türbini güç eğrisi bu yöntem ile yapılan hesaplama uyum sağlamamaktadır. Bu nedenle teorik hesaplamadaki değerler uygulamadakinin göre yüksek çıkmıştır. Bu deney seti ile gelecekte bu yöntemi kullanarak çalışma yapacakların deney seti rüzgar türbininin karakteristiğini göz önünde bulundurması sonuçları analiz etmeleri aşamasında faydalı olacaktır.

Profilab-Expert 4.0 yazılımında geliştirilen bu program ile Rayleigh dağılımı yöntemi temel alınarak rüzgar enerjisi potansiyeli, enerji üretimi, kapasite faktörü ve ekonomiklik analizi ve deney uygulaması yapılmaktadır. Geliştirilen bu program türbin standart güç eğrisi için hazırlanmış olup, kullanıcıların çalışma yaparken bu durumu göz önünde bulundurmaları faydalı olacaktır. Profilab-Expert 4.0 yazılımı kullanılarak hazırlanan rüzgar enerjisi analiz programı standart türbin karakteristiğinden farklı türbin karakteristiğine sahip rüzgar türbinleri ve/veya farklı istatistiksel yöntemler ile analiz yapmak için değiştirilebilir. Hazırlanan bu programın sunduğu ön panel özelliğinin kolay bir şekilde veri girişi yapıp sonuçların hızlı bir şekilde görülmesini sağlaması nedeniyle öğrenilen teorik bilginin simülasyonun yapılarak pekiştirilmesi için rüzgar enerjisinden enerji üretimi konusunda öğrenim görenler için eğitim amaçlı kullanılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Worldwide engagement for sustainable energy strategies 2013, International Energy Agency (IEA), 16s., 2013.
- [2] Anonim, Fasal 15 – Enerji, Sektörel Politikalar Başkanlığı, Türkiye Cumhuriyeti Avrupa Birliği Bakanlığı.  
<http://www.abgs.gov.tr/index.php?l=1&p=80> (Erişim tarihi: 09.11.2013)
- [3] Öztürk, H. H. Doç. Dr., Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Kullanımı. 14-23. Teknik Yayınevi, Ankara, 2008.
- [4] Enerji Raporu 2012, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi (WEC), ISSN:1301-6318, 288s., 2012.
- [5] World Energy Outlook 2012, International Energy Agency (IEA), 22s., 2012.
- [6] World Energy Outlook 2012 – Renewable Energy Outlook, International Energy Agency (IEA), 32s., 2012.
- [7] İklim Değişikliği-Kyoto-Türkiye, mdn Finansal Danışmanlık, 8s., 2010
- [8] Anonim, Kyoto Protokolü, İklim Değişikliği Şube Müdürlüğü, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı,  
<http://iklim.cob.gov.tr/iklim/AnaSayfa/Kyoto.aspx?sflang=tr> (Erişim tarihi: 22.11.2013)
- [9] The Impact of Wind Power on European Natural Gas Markets 2012, International Energy Agency (IEA), 54s., 2012.
- [10] Wind climate fact sheet 2012, International Energy Agency (IEA), 4s., 2012.

- [11] Global Wind Energy Outlook 2012, Global Wind Energy Council (GWEC), 52s., 2012.
- [12] Wind Energy Technology Roadmap 2013, International Energy Agency (IEA), 63s., 2013.
- [13] World Wind Energy Report 2012, The World Wind Energy Association (WWEA), 22s., 2013.
- [14] Medium Term Renewable Energy Market Report 2012, International Energy Agency (IEA), 182s., 2012.
- [15] World Wind Energy Half Year Report 2013, The World Wind Energy Association (WWEA), 7s., 2013.
- [16] Türkiye Elektrik Enerjisi 10 Yıllık Üretim Kapasite Projeksiyonu(2012 – 2021), Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ), 138s., 2012.
- [17] Enerji Yatırımcısı El Kitabı 2012, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), 33s., 2012.
- [18] Türkiye Rüzgar İstatistik Raporu Temmuz 2013, Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (TÜREB), 42s., 2013.
- [19] Lun, F.,Y., I., Lam, C., J., A study of Weibull parameters using long-term wind observations. *Renewable Energy*, 20: 145-153, 2000.
- [20] Çelik, N., A., Energy output estimation for small-scale wind power generators using Weibull-representative wind data. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Elsevier Science Ltd. 91: 693–707, 2003.

- [21] Akdağ, S. A., Güler, Ö., Calculation of wind energy potential and economic analysis by using Weibull distribution a case study from Turkey. Part 1: Determination of Weibull parameters. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*. 4:1–8. 2009a.
- [22] Kumaraswamy, B.G. ; Keshavan, B.K. ; Jangamshetti, S.H., A Statistical Analysis of Wind Speed Data in West Central Part of Karnataka Based on Weibull Distribution Function. *Electrical Power & Energy Conference (EPEC)*, 22-23 Oct. 2009, Montreal, QC,1-4, 2009.
- [23] Akdağ, S. A., Dinler, A., A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications. *Energy Conversion and Management*. Elsevier. 50:1761–1766, 2009.
- [24] Chang, P., T., Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application. *Applied Energy*. Elsevier Ltd. 88: 272–282, 2010.
- [25] Bagiorgas, S., H., Giouli, M., Rehman, S., Al-Hadhrami, M., L., Weibull Parameters Estimation Using Four Different Methods and Most Energy-Carrying Wind Speed Analysis. *International Journal of Green Energy*. Taylor & Francis Group. 8: 529–554, 2011.
- [26] Akdağ, S. A., Güler, Ö. A., Comparison of Wind Turbine Power Curve Models. *Energy Sources. Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 33:24, 2257-2263, 2011.
- [27] Akpınar, S., Akpınar, K. E., An Assessment of Wind Turbine Characteristics and Wind Energy Characteristics for Electricity Production. *Energy Sources. Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. Taylor & Francis Group. 28:941–953, 2006.

- [28] Ucar, A., Balo, F., A Seasonal Analysis of Wind Turbine Characteristics and Wind Power Potential in Manisa, Turkey. *International Journal of Green Energy*. Taylor & Francis Group. 5: 466–479, 2008.
- [29] Wang, L., Yeh, T., A Study on Generator Capacity for Wind Turbines Under Various Tower Heights and Rated Wind Speeds Using Weibull Distribution. *IEEE transactions on Energy Conversion*. 23(2): 592-602, 2008.
- [30] Akdağ, S. A., Güler, Ö., Calculation of wind energy potential and economic analysis by using Weibull distribution a case study from Turkey. Part 2: Economic analysis. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*. 4:9–16. 2009b.
- [31] Genç, S., M., Economic Analysis of Large-Scale Wind Energy Conversion Systems in Central Anatolian Turkey. *Clean Energy Systems and Experiences*. Kei Eguchi (Ed.). ISBN: 978-953-307-147-3, 2010.
- [32] Çelik, N., A., Kolhe, M., Generalized feed-forward based method for wind energy prediction. *Applied Energy*. Elsevier Ltd. 101: 582–588, 2012.
- [33] Ohunakin, S., O., Oyewola, M., O., Adaramola, S., M., Economic analysis of wind energy conversion systems using levelized cost of electricity and present value cost methods in Nigeria. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 4:2, 2013.
- [34] A. R. Gravdahl, S. Rorgemoen, M. Thogersen, Power prediction and siting - When the terrain gets rough. *The World Wind Energy Conference and Exhibition*, Berlin, 2002.
- [35] Benbouzid, M. E. H. and Diallo, D., Development of a Matlab/Simulink®-based wind turbine prototyping software through undergraduate student projects. *Computer Applications in Engineering Education*. 20: 78–87, 2012.

- [36] Bayindir, R., Kabalcı, E., Keven, G., Can, C., Development of MATLAB/GUI based analysis tool for wind turbines. The European Workshop on Renewable Energy Systems (EWRES), 17-28 Sep. 2012, Antalya, TURKEY, 2012.
- [37] Kennedy, S., Wind power planning: assessing long-term costs and benefits. Energy Policy. Elsevier Ltd. 33: 1661–1675, 2004.
- [38] Kurban, M., Mert, Y., Hocoğlu, O.F., Weibull Dağılımı Kullanılarak Rüzgar Hız ve Güç Yoğunluklarının İstatiksel Analizi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri D. 7, 205-218, 2009.
- [39] Yerebakan, M., Rüzgar Enerjisi. İstanbul Ticaret Odası, İstanbul, 2001.
- [40] Özdamar, A., Dünya ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisinden Yararlanılması Üzerine Bir Araştırma. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri D. 6, 133-145, 2000.
- [41] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., bossanyi, E., Wind Energy Handbook. 1-9, 41-65. John Wiley & Sons, England, 2001.
- [42] Tanrıöven, M., Rüzgar ve Güneş Enerjili Güç Sistemleri Ders Notu, Yıldız Teknik Üniversitesi
- [43] Luo, L., F., Design of Wind-Turbine Energy System. IPEC, 2010 Conference Proceedings, October 2010, Singapore, p.110-115, 2010.
- [44] NREL, Clean Energy Project Analysis: Engineering & Cases Textbook, Third Edition. Minister of Natural Resources Canada, Canada, 2005.
- [45] Bianchi, D., F., Battista, H., Mantz, J., R., Wind Turbine Control Systems. Principles, Modelling and Gain Scheduling Design. 7-28. Springer-Verlag London Limited, Germany, 2007.

- [46] Patel, R., M., Wind and Solar Power Systems. 40-65. CRC Press, USA, 1999.
- [47] Hau, E., Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics. 452-520. 751-760. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2005.
- [48] Mathew, S., Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics. 61-88. 145-164. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Netherlands, 2006.
- [49] Masters, M., G., Renewable and Efficient Electric Power Systems. 334-379. John Wiley & Sons, Inc., USA, 2004.
- [50] Wind Performance Characteristics. Wind Energy Series. National Wind Coordinating Committee (NWCC). Issue No. 10, January 1997.
- [51] Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series, International Renewable Energy Agency (IRENA), 64s., 2012
- [52] Rüzgar Enerjisi Yatırımı-Proje Fizibilitesi, mdn Finansal Danışmanlık, 8s., 2011.
- [53] Johnson, L., G., Wind Energy Systems. 8.1-25. Electronic Edition., USA, 2006.
- [54] Blanco, I., M., The economics of wind energy. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier. 13(6-7): 1151-1678, 2009.
- [55] The Economics of Wind Energy, The European Wind Energy Association (EWEA), 156s., 2009.
- [56] Renewable Power Generation Costs in 2012: An Overview, International Renewable Energy Agency (IRENA), 92s., 2013.



- [57] Fernandes, J., A., Oliveira, S., W., Cost-Effectiveness Analysis for Wind Energy Projects. *International Journal of Energy Science*. 2 (1): 15-21, 2012.
- [58] Anonim, ProfiLab-Expert 4.0, ABACOM,  
<http://www.abacom-online.de/uk/html/profilab-expert.html>  
(Erişim tarihi: 23.11.2013)
- [59] ENERCON product overview, ENERCON GmbH, 19s., 2013.

## EKLER

### EK 1

Rüzgar türbini teknik özellikleri şu şekildedir;

- Güç: 400 W (12.5 m/s anma rüzgar hızında)
- Gerilim: 12 VDC
- Kanat Çapı: 1.15 m
- Devir hızı: 1800 rpm
- Gövde: Döküm alüminyum
- Kanatlar: Karbon fiber birleşimi (3 adet)
- Direk çapı: 48mm
- Türbin kontrolleri: Mikro işlemcili dahili düzenleyici
- Aşırı hıza karşı koruma: Elektronik güç kontrolü

Rüzgar türbininin rotor kanatları yerine bağlanan servo motor teknik özellikleri şu şekildedir;

- Güç: 0,4 kW
- Devir hızı: 3000 rpm
- Servo motor sürücü

DA-AA evirici teknik özellikleri şu şekildedir;

- Aç/Kapa düğmesi
- 12 VDA akü girişi
- Çıkış gerilimi: 230V AA  $\pm\%10$
- Frekans: 50Hz  $\pm\%10$
- Güç: 275 VA
- Çalışma durumunu gösteren LED
- Hatalara karşı sesli uyarı

- Aşırı yük ve sıcaklık kontrolü
- Ters kutup koruması
- Kısa devre koruma

Batarya teknik özellikleri şu şekildedir;

- Gerilim: 12V
- Kapasite: 100Ah
- Şarj edilebilir
- 0-15VDC analog voltmetre, 0-10A analog ampermetre
- 4 mm'lik bağlantı soketleri

AA yük teknik özellikleri şu şekildedir;

- 220VAA gerilim girişi
- Tasarruflu lamba: 5W
- Parlaklık ayarlı lamba: 25W
- Halojen lamba: 18W
- Fan: 14W
- Her bir ünite için ayrı aç/kapa anahtarı

USB ara yüz modülü teknik özellikleri şu şekildedir;

- Model: BMCM / USB-AD
- Güç beslemesi: +4.5V...+5.5V
- Bağlantı şekli: USB aracılığıyla PC'ye, maksimum 100mA, USB 2.0 tam uyumlu
- Analog gerilim çıkışı: +5V
- Çözünürlük: 12 bit
- Sıcaklık aralığı: -25°C...+70°C

**EK 2**

Enercon marka E-48 ve E-53 modeli rüzgar türbinlerinin kule yüksekliğindeki rüzgar hızlarında ürettiği güç değerleri.

	Enercon E-48	Enercon E-53
Rüzgar hızı (m/s)	Güç (kW)	Güç (kW)
1	0	0
2	0	2
3	5	14
4	25	38
5	60	77
6	110	141
7	180	228
8	275	336
9	400	480
10	555	645
11	671	744
12	750	780
13	790	810
14	810	810
15	810	810
16	810	810
17	810	810
18	810	810
19	810	810
20	810	810
21	810	810
22	810	810
23	810	810
24	810	810
25	810	810

### EK 3

Deney setine ait rüzgar türbinin kule yüksekliğindeki rüzgar hızlarında ürettiği güç değerleri.

Rüzgar hızı (m/s)	Güç (kW)
1	0,000
2	0,000
3	0,000
4	0,006
5	0,013
6	0,025
7	0,045
8	0,078
9	0,120
10	0,175
11	0,270
12	0,400
13	0,025
14	0,030
15	0,040
16	0,042
17	0,050
18	0,052
19	0,052
20	0,055
21	0,000
22	0,000
23	0,000
24	0,000
25	0,000