

**RÜZGAR HIZ VE POTANSİYELİNİN STOKASTİK
SÜREÇLERLE MODELLENEREK KARABÜK
İLİNDE UYGULANMASI**

**2018
DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

BAYRAM KÖSE

**RÜZGAR HIZ VE POTANSİYELİNİN STOKASTİK SÜREÇLERLE
MODELLENEREK KARABÜK İLİNDE UYGULANMASI**

Bayram KÖSE

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında

Doktora Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

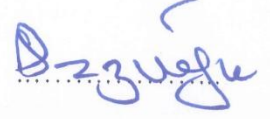
KARABÜK

Temmuz 2018

Bayram KÖSE tarafından hazırlanan “RÜZGAR HIZ VE POTANSİYELİNİN STOKASTİK SÜREÇLERLE MODELLENEREK KARABÜK İLİNDE UYGULANMASI” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ziyaddin RECEBLİ

Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 12/ 07/ 2018

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Kurtuluş BORAN (GÜ)



Üye : Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK(KBÜ)



Üye : Prof. Dr. Ziyaddin RECEBLİ (KBÜ)



Üye : Prof. Dr. Mehmet ÖZALP (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Fatih Emre BORAN (GÜ)

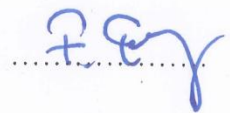


...../...../2018

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü V.





“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Bayram KÖSE

ÖZET

Doktora Tezi

RÜZGAR HIZ VE POTANSİYELİNİN STOKASTİK SÜREÇLERLE MODELLENEREK KARABÜK İLİNDE UYGULANMASI

Bayram KÖSE

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Ziyaddin RECEBLİ

Temmuz 2018, 123 sayfa

Ülkemizin enerji kaynakları potansiyelinin araştırılması ve kullanımını sağlayacak, yerli ve yeni teknolojilerin üretilmesi, bunun yanında yerli üretimin yaygınlaşması gerekmektedir. Yerli ve güneş kaynaklı yenilenebilir enerji kaynaklarımızdan biri de rüzgâr enerjisidir. Tüm elektrik üreten yenilenebilir enerji santralleri, kurulduğu bölgenin meteorolojik veri kalitesine, zaman değişkenine bağlı olarak güvenilir, geçerli ve uygun modellerle tasarlanıp planlanmalıdır. Gözlemlenen saatlik, günlük, haftalık, aylık ve yıllık rüzgâr verilerinin hızın zaman serisi olarak ve frekans dağılımı olarak tahmin edilmesi önemlidir.

Bu çalışmada, rüzgar enerjisi ile ilgili genel tahmin çalışmaları incelenmiş ve tahmin çalışmaları sınıflandırılmıştır. Tahmin çalışmaları üç gruba; yatırım tahminleri, üretim tahminleri ve talep tahminleri olarak ayrılmıştır.

Bu çalışmada özellikle rüzgar hızının tahminlenmesi ile ilgili olarak zaman bazlı tahmin çalışmalarında bulunulmuştur. İlk olarak stokastik süreç içeren ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average: Otoregresif / Özbağımlı tümleşik hareketli ortalama) modelleriyle Karabük rüzgar hızları modellenerek tahminlenmiş, Karabük iline ait ARIMA modelleri oluşturulmuştur. Ayrıca, zamana göre ortalama rüzgar hızları yapay sinir ağları kullanılarak tahmin edilmiştir. Ancak, Karabük rüzgar hızlarını günlük ve saatlik ortalama olarak öngörmek için yeni bir analitik yaklaşım önerilmiştir. Model performansı YSA (Yapay Sinir Ağları) ile karşılaştırılmıştır. Rüzgar potansiyelini hesaplamak ve rüzgar hızını karakterize etmek için kullanılan yatırım amaçlı kullanılan olasılıksal dağılım modelleri incelenmiştir. Karabük rüzgar verileri özellikle Weibull ve Burr dağılım modeli ile incelenmiştir. Burr dağılım modelinin parametreleri, literatürde ilk kez farklı bir yaklaşımla en küçük kareler yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, Karabük verilerine göre ARIMA modelleri oluşturulmuş ve analitik modelin saatlik ve günlük ortalama değerlerini hesaplaması önerilmiştir. Olasılık dağılım modelleri ve Karabük rüzgar hızı karakterizasyonu analiz edilmiş ve tahmin edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Yenilenebilir enerji, rüzgar enerjisi, tahmin, stokastik süreç, ARIMA, yapay sinir ağları, analitik model, rüzgar hız dağılımı, olasılık dağılım fonksiyonu.

Bilim Kodu : 928.1.233

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

MODELLING OF WIND SPEED AND POTENTIAL WITH STOCHASTIC PROCESS; A CASE APPLICATION OF KARABUK

Bayram KÖSE

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Energy Systems Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Ziyaddin RECEBLİ

July 2018, 123 pages

It is necessary to ensure the utilization and research of the energy resources potential of our country, to produce domestic and new technologies, and to make widespread utilization of domestic production. One of our domestic and solar renewable energy sources is wind energy. Renewable power plants that produce all electricity should be designed and planned with reliable, valid and appropriate models depending on the time variable to the meteorological data quality of the region in which they are installed. It is important that the observed hourly, daily, weekly, monthly and annual wind data are estimated as time series and frequency distribution.

In this study, general estimating studies on wind energy were investigated and estimation studies were classified. Estimation trials are three groups; investment forecasts, production forecasts and demand forecasts.

In this study, a time-based forecasting study was carried out, especially regarding the estimation of wind speed. Firstly, the ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) models containing the stochastic process were estimated by modeling the Karabük wind speeds and the ARIMA models of Karabük province were established. In addition, time-averaged wind velocities were estimated using artificial neural networks. However, a new analytical approach has been proposed to predict Karabük wind speeds as daily and hourly average. Model performance is compared with ANN. Probabilistic distribution models used for investment purposes, which are used to calculate the wind potential and characterize the wind speed, have been examined. Karabük wind data have been examined with the Weibull and Burr distribution model in particular. The parameters of the Burr distribution model have been obtained by using the least squares method for the first time in the literature with a different approach. As a result, ARMA models were constructed in accordance with the Karabük data and the analytical model was proposed to estimate the hourly and daily mean values. The probability distribution models and the Karabük wind velocity characterization were analyzed and estimated.

Key Word : Renewable energy, wind energy, estimation, stochastic process, ARIMA, artificial neural networks, analytical model, wind speed distribution, probability distribution function.

Science Code : 928.1.233

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Ziyaddin RECEBLİ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım ve akademik çalışmalarımda büyük özveri göstererek birlikte yayın hazırladığımız, çalışmaların ingilizce dil yönünden ve bilimsel olarak incelenmesinde katkıda bulunun, hiç bir aramama olumsuz dönmeyen Dr. Öğretim Üyesi Muhammet Tahir GÜNEŞER ile Dr. Öğretim Üyesi Murat DÜZ'e ve Öğretim Görevlisi Ahmed Zahid KÜÇÜK'e çok teşekkür ederim.

Uluslar arası ve ulusal standartlarda bir ölçüm sisteminin kurulmasında ve üniversitemize kazandırılmasında çok büyük emekleri olan Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi öğretim üyesi Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK, Elektrik Mühendisi ve İş Adamı Basri GÜMÜŞ Bey'e ve KARES AVM yönetimine ayrıca teşekkür ederim.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımı esirgemediğim yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1. ENERJİ.....	3
1.2. DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE RÜZGAR ENERJİSİ KULLANIMI	6
BÖLÜM 2	15
RÜZGAR ENERJİSİ TEMEL BİLGİLERİ	15
2.1. RÜZGAR ENERJİSİ SİSTEMLERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER.....	15
2.1.1. Rüzgar Hızının Enerji Üretimine Etkisi	19
2.1.2. Rüzgar Hızının Yükseklikle Değişiminin Enerji Üretimine Etkisi	24
2.1.3. Rüzgar EsmeYönünün Enerji Üretimine Etkisi.....	25
2.1.4. Hava Yoğunluğu ve Sıcaklığının Enerji Üretimine Etkisi	27
2.1.5. Yerel Coğrafi Şartların Rüzgar Enerjisi Üretimine Etkisi.....	29
2.1.6. Rüzgar Türbinlerinin Enerji Üretimine Etkisi	32
2.1.7. Rüzgar Hızı Esme Süresi ve Zamanın Enerji Üretimine Etkisi.....	34
2.2. RÜZGAR İSTATİSTİĞİ.....	38
2.2.1. Tanımlayıcı Rüzgar İstatistikleri	38
2.2.2. Rüzgar Hızının Değişkenlik Ölçüsü; Türbülans Yoğunluğu.....	39
2.2.3. Rüzgar Karakteristiği ve Rüzgar Hızlarının Olasılıksal Dağılımları.....	41

2.2.4. Ortalama Rüzgar Güç Yoğunluğu	42
2.2.5. Hata Ölçütleri ve Modeller İçin Bilgi Kriterleri	44
BÖLÜM 3	47
MATERYAL VE METODLAR	47
3.1. RÜZGAR VERİLERİ	47
3.1.1. Karabük Kahyalar Gözlem İstasyonu	47
3.1.2. Kahyalar Gözlem İstasyonu Verileri	49
3.2. TAHMİN MODELLERİ	52
3.2.1. Rüzgar Enerjisi Tahmin Yöntemleri	56
3.2.2. Güç Potansiyeli Tahmini Çalışmaları	58
3.2.3. Zamana Bağlı Süreli Rüzgar Hızı Tahmin Çalışmaları	61
3.3. STOKASTİK SÜREÇ MODELLERİ	62
3.3.1. Otoregresyon (Auto Regression) Modelleri AR (p)	64
3.3.2. Hareketli Ortalama (Moving Average) Modelleri MA (q)	65
3.3.3. Otoregresyon ve Kayan Ortalama Modelleri ARMA (p,q)	66
3.3.4. Stokastik Süreç Modelini Oluşturma Adımları	66
3.3.4.1. Modelin Belirlenme Adımı	66
3.3.4.2. Model Parametreleri Tahmini Adımı	67
3.3.4.3. Modelin Uygunluk Test Edilme Adımı	67
3.4. YAPAY SİNİR AĞI (YSA) MODELİ	68
3.5. ÖNERİLEN ANALİTİK YAKLAŞIM MODELLERİ	72
3.5.1. Rüzgar Hızı Günlük Ortalama Tahmin Yöntemi	73
3.5.2. Rüzgar Hızı Saatlik Ortalama Tahmin Yöntemi	74
3.6. RÜZGAR HIZ DAĞILIMI TAHMİN MODELLERİ	76
3.6.1. Weibull Dağılımı ve Parametre Kestirim Formülleri	77
3.6.1.1. Maksimum Olabilirlik Metodu (MOM)	77
3.6.1.2. Modifiye Maksimum Olabilirlik Metodu (MMOM)	78
3.6.1.3. WasP Metodu	78
3.6.1.4. En Küçük Kareler Metodu	78
3.6.1.5. Moment (Ortalama ve Standart Sapma) Metodu	79
3.6.1.6. Moment (Empirik /Yaklaşım) Metodu	79

3.6.1.7. Güç Yoğunluğu Metodu (GYM)	80
3.6.2. Üç Parametrelili Genelleştirilmiş Gamma Dağılımı.....	80
3.6.3. İki Parametrelili Genelleştirilmiş Gamma Dağılımı	81
3.6.4. Bir Parametrelili Rayleigh Dağılımı	82
3.6.5. İki Parametrelili Karakök Normal dağılımı	83
3.6.6. İki parametrelili Normal Kesik Dağılım	83
3.6.7. İki Parametrelili Lognormal Dağılım.....	84
3.6.8. İki Parametrelili Ters Gausyen Dağılım	85
3.6.9. İki Bileşenli Karışık Weibull Dağılımı.....	86
3.6.10. Maksimum Entropi Olasılık Dağılımı	87
3.6.11. Burr Olasılık Dağılımı	88
3.6.11.1. Enküçük Kareler Yöntemi	88
3.6.11.2. Maksimum Olabilirlik Metodu	90
3.6.12. Diğer Bazı Olasılık Dağılım Fonksiyonları.....	91
 BÖLÜM 4	92
BULGULAR.....	92
4.1. STOKASTİK MODEL UYGULAMA VE BULGULAR	92
4.2. YSA UYGULAMA VE BULGULAR.....	96
4.3. ANALİTİK YAKLAŞIM MODELİ UYGULAMA VE BULGULAR.....	99
4.4. OLASILIK DAĞILIM MODELLERİ UYGULAMA VE BULGULAR....	102
 BÖLÜM 5	108
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	108
5.1. SONUÇLAR	108
5.2. ÖNERİLER	112
KAYNAKLAR	113
 EK AÇIKLAMALAR A.	121
BURR DAĞILIM FONKSİYONU İKİNCİ TÜREV DENKİMLERİ.....	121
 ÖZGEÇMİŞ	123

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1.	Enerji santrallerinin kaynaklara göre birim enerji maliyetleri.	6
Şekil 1.2.	Türkiye rüzgar enerjisi santralleri kümülatif kurulum kapasiteleri. ...	11
Şekil 1.3.	Türkiye enerji kaynakları kurulu güç kapasite dağılımı (Ekim 2017).	12
Şekil 1.4.	Zamana göre türbin güç ve büyüklüklerindeki artışlar.....	13
Şekil 1.5.	Yıllara göre birim kW türbin maliyetlerindeki değişim.	13
Şekil 1.6.	Dünya Enerji Ajansına göre 2014 dünya rüzgar enerjisi potansiyeli.	14
Şekil 1.7.	Avrupa ülkeleri 2017 yılı rüzgar enerjisi kurulu güç kapasiteleri.	14
Şekil 2.1.	Basınçlar arası hava hareketi.	15
Şekil 2.2.	Dünya basınç kuşakları ve rüzgarlar.	16
Şekil 2.3.	Kara ve deniz meltemlerinin oluşumu.....	18
Şekil 2.4.	Dağ ve vadi meltemleri oluşumu.....	18
Şekil 2.5.	Fön rüzgarları oluşumu.....	18
Şekil 2.6.	Türkiyede esen yerel rüzgarların isimleri ve yön açıları.	19
Şekil 2.7.	Rüzgar türbin kanadının süpürdüğü alandan geçen rüzgar temsili. ...	20
Şekil 2.8.	Rüzgar hızının yükseklikle değişimi.	25
Şekil 2.9.	Rüzgar gülü grafikleri.....	26
Şekil 2.10.	Hava yoğunluğunun sıcaklık ve yükseklikle değişim grafikleri.	29
Şekil 2.11.	Bazı alanların pürüzlülük sınıfı ve pürüzlülük uzunluğu değerleri. ...	31
Şekil 2.12.	Engelin rüzgar profiline yatay ve dikey etkisi.....	31
Şekil 2.13.	Enercon E-82 model türbininin güç eğrisi ve güç faktörü değerleri. .	33
Şekil 2.14.	Karabük 2010, 6 aylık kış dönemi 24 saatlik ortalama hız değişimi..	35
Şekil 2.15.	Karabük 2010, 6 aylık yaz dönemi 24 saatlik ortalama hız değişimi.	35
Şekil 2.16.	Karabük 2011 Şubat ayı günlük ortalama olarak hız değişimi.....	36
Şekil 2.17.	Karabük 2011-2012-2013 yılı günlük ortalama rüzgar hız değişimi. ..	36
Şekil 2.18.	Karabük 2010 yılı 365 günün, günlük ortalama hız değişimleri.	37
Şekil 2.19.	Karabük Kahyalar gözlemlenen türbülans yoğunluğu grafiği.....	40

Şekil 2.20.	Karabük Kahyalar hesaplanan türbülans yoğunluğu grafiği.	41
Şekil 2.21.	Rüzgar güç yoğunluğu spektrumu çeşitli periyotlar için.	43
Şekil 3.1.	Kahyalar gözlem istasyonundan bir enstantane.	48
Şekil 3.2.	Karabük Kahyalar Rüzgar Gözlem İstasyonu (RGİ) uydu fotoğrafı..	49
Şekil 3.3.	Aylık ortalama rüzgar hızları.	49
Şekil 3.4.	Karabük Kahyalar rüzgar gülü.	50
Şekil 3.5.	Karabük Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA).	51
Şekil 3.6.	Rüzgar enerji kapasitesini gösteren REPA Haritası.	51
Şekil 3.7.	Tahmin metotları genel sınıflandırma şeması.	52
Şekil 3.8.	Yapay sinir hücresi.	69
Şekil 3.9.	Çok katmanlı YSA yapısı.	69
Şekil 4.1.	Karabük ili rüzgar verileri ile SPSS ARIMA(1,1,9) model tahminleri.	92
Şekil 4.2.	Hesaplanan parametrelerle yapılan 24 saatlik tahmin grafiği.	94
Şekil 4.3.	YSA ile Karabük için günlük tahminler.	97
Şekil 4.4.	YSA ile Karabük Kahyalar için günlük tahminler.	97
Şekil 4.5.	YSA ile İzmir Çeşme Mersinkoy için günlük tahminler.	97
Şekil 4.6.	YSA ile Karabük için saatlik tahminler.	98
Şekil 4.7.	YSA ile Karabük Kahyalar için saatlik tahminler.	98
Şekil 4.8.	YSA ile İzmir Çeşme Mersinkoy için saatlik tahminler.	98
Şekil 4.9.	Analitik model ile Karabük için günlük tahminler.	99
Şekil 4.10.	Analitik model ile Karabük Kahyalar için günlük tahminler.	99
Şekil 4.11.	Analitik model ile İzmir Çeşme Mersinköy için günlük tahminler..	100
Şekil 4.12.	Analitik model ile Karabük için saatlik tahminler.	100
Şekil 4.13.	Analitik model ile Karabük Kahyalar için saatlik tahminleri.	101
Şekil 4.14.	Analitik model ile İzmir Çeşme Mersinköy için saatlik tahminler. .	101
Şekil 4.15.	Model grafikleri ve ölçüm verileri histogramı.	103
Şekil 4.16.	Karabük merkez için Weibull ve Burr dağılım fonksiyonları grafikleri.	106
Şekil 4.17.	Karabük Kahyalar için Weibull ve Burr dağılım fonksiyonları grafikleri.	107

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1.	Tükenebilirliğine göre enerji türleri.	3
Çizelge 1.2.	Enerji kaynaklarının sınıflandırması.	4
Çizelge 1.3.	Türkiye'nin 2010 itibari ile tesbit edilen enerji kaynakları rezervleri. .	5
Çizelge 1.4.	Yenilenebilir enerji kaynaklarının amortisman süreleri.	5
Çizelge 1.5.	Seçilmiş bazı ülkeler için elektrik tüketimi (2003-2008).	5
Çizelge 1.6.	Türkiyenin enerji kaynaklarını göre toplam kurulu gücü.	10
Çizelge 1.7.	Dünyada bazı ülkelerin rüzgar enerjisi kurulu güç kapasitesi.	11
Çizelge 2.1.	Dünyada görülen rüzgarların sınıflandırılması.	17
Çizelge 2.2.	Yerel rüzgarların genel sınıflandırılması.	17
Çizelge 2.3.	Rüzgar yönleri ve isimleri (Açısal değerleri).	26
Çizelge 2.4.	Çeşitli alanların pürüzlülük sınıfları ve pürüzlülük uzunlukları.	32
Çizelge 2.5.	Rüzgar kaynağı örnekleme raporu temel istatistikleri.	38
Çizelge 2.6.	Güç yoğunluğu değerlerine göre standart rüzgar güç sınıfları.	44
Çizelge 3.1.	Karabük Kahyalar gözlemlenen aylık ortalama rüzgar hız verileri.	50
Çizelge 3.2.	Kahyalar gözlem verilerinin tanımlayıcı istatistik değerleri.	50
Çizelge 3.3.	Rüzgar güç tahmini modelleri.	54
Çizelge 3.4.	Rüzgar potansiyeli hesaplama modelleri ve bilgisayar programları. .	55
Çizelge 3.5.	Rüzgar türbin işletme ve hız ile güç tahmini programları.	55
Çizelge 3.6.	Tahmin yöntemleri genel sınıflandırması.	57
Çizelge 4.1.	SPSS ARIMA (1,1,9) modelinin katsayıları.	93
Çizelge 4.2.	Excel de hazırlanan ARIMA (16,0,0) model parametreleri.	93
Çizelge 4.3.	Excel de hazırlanan ARIMA (14,0,0) model parametreleri.	94
Çizelge 4.4.	Excel de hazırlanan ARIMA (5,0,0) model parametreleri.	95
Çizelge 4.5.	Modellerin tahmin performansı için hata değerleri.	95
Çizelge 4.6.	ARIMA modellerinin uygunluğu için bilgi kriteri sonuçları.	95
Çizelge 4.7.	RGİ'lerin rüzgâr hız ortalaması, standart sapması ve çarpıklıkları. ...	96
Çizelge 4.8.	YSA ve önerilen model tahminleri ve gerçek verilerin korelasyon ve performans değerleri.	102
Çizelge 4.9.	Eskipazar için model parametrelerin metotlara göre değerleri.	102

Sayfa

Çizelge 4.10. Ölçüm verileri ve modeller için hesaplanan güç yoğunlukları.....	103
Çizelge 4.11. Eskipazar rüzgar hız ölçümleri ve parametre tahmin metotlarına göre model frekans değerleri.	104
Çizelge 4.12. Karabük ve Kahyalar RGI gözlemlenen rüzgar güç yoğunluğu değerleri.....	105
Çizelge 4.13. Karabük ve Kahyalar'ın Weibull ve Burr fonksiyonları parametre tahmin metotlarına göre dağılım parametreleri.	105
Çizelge 4.14. Karabük ve Kahyalar için Weibull ve Burr dağılım modelleri performans ölçümleri.....	105
Çizelge 4.15. Karabük ve Kahyalar RGI ölçülen ve modellerle hesaplanan güç yoğunlukları.....	106
Çizelge 4.16. Karabük ve Kahyalar'ın ölçülen ve tahminlenen rüzgar hız ortalamaları.....	106

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

v	: Rüzgar hızı
k	: Şekil parametresi (Rüzgâr hızı dağılım şeklini gösteren parametre)
c	: Ölçek parametresi
$f(v)$	: Rüzgâr hızı olasılık fonksiyonu
$\Gamma(x)$	: Gama fonksiyonu
μ	: Ortalama
V_r	: Rüzgar hızı (m/s)
m	: Kütle (kg)
m'	: Kütlesel debi (kg/s)
ρ	: Hava yoğunluğu (kg/m ³)
A	: Alan (m ²)
C_p	: Güç faktörü
P_t	: Türbin Gücü (W)
P_r	: Rüzgar Gücü (W)
E	: Enerji (Wh)
F	: Kuvvet (N)
T_T	: Döndürme kuvveti, tork
C_T	: Tork katsayısı
R	: Türbin kanat yarıçapı (m)
Ω	: Açısal hız
λ	: Uç hız oranı
$\bar{V}_{LT}$	: Uzun süreli hız ölçüm ortalaması
$\bar{V}_{LT_hub}$	: Türbin göbek yüksekliği hız ortalaması
$\bar{V}_{M1}$	: Birinci ölçüm noktası hız ortalaması
$\bar{V}_{M2}$	: İkinci ölçüm noktası hız ortalaması

α	: Prüzlölük katsayısı, Hellman Yükseltme katsayısı
h_1, h_2	: Birinci ve ikinci ölçüm yüksekliği
h_3	: Üçüncü ölçüm yüksekliği
P	: Mutlak basınç
n	: Kütle (mol)
V	: Hacim(m ³)
R	: İdeal gaz sabiti=8.2056.10 ⁻⁵
T	: Mutlak sıcaklık(K:Kelvin)
κ	: Von Karman sabiti (0,4)
Z, z	: Rakım yüksekliği (m)
z_o	: Zemine ait pürüzlölük uzunluğu(m)
$E(x)$	: Matematiksel olarak x'in beklenen değer işlemcisi
σ	: Standart sapma
TI	: Türbülans yoğunluğu
F_i	: Tahminin kümülatif dağılım değeri
P_i	: Gözlemlenen kümülatif frekans değeri
y_{mi}	: Model tahminin değerleri
y_i	: Gerçek gözlemlenen değerler
R^2	: Determinasyon katsayısı
χ^2	: Ki kare istatistiksel uyum testi
I_{ref}	: 15 m/s 'deki türbülans yoğunluğunun ortalama değeri
ζk	: Çarpıklık katsayısı (Skewness)
BSk	: Basıklık-Sivrilik katsayısı (Kurtosis)
$\psi(.)$	: Digamma fonksiyonu

KISALTMALAR

AR	: AutoRegressive (özbağımlı) model
ARIMA	: AutoRegressive Integrated Moving Average (Oto regresif / Özbağımlı tümleşik hareketli ortalama)
ARMA	: AutoRegressive Moving Average (Oto regresif / Özbağımlı hareketli ortalama) model
AWEA	: American Wind Energy Association (Amerika Rüzgar Enerjisi Birliği)
AVM	: Alışveriş Merkezi
ÇKA	: Çok Katmanlı Ağ
DSİ	: Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü
EARGED	: Eğitim Araştırma ve Geliştirme Dairesi
EİEİ	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
EÜAS	: Elektrik Üretim A.Ş.
GW	: Giga Watt
HES	: Hidroelektrik Enerji Santrali
IEA	: International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)
IEC	: International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
IRENA	: International Renewable Energy Agency (Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı)
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standardizasyon Örgütü)
LIDAR	: Laser Imaging Detection and Ranging (Lazer Görüntüleme Algılama ve Ölçümleme)
MA	: Moving Average (Hareketli Ortalama)
MEASNET	: Measuring Network of Wind Energy Institutes (Rüzgar Enerjisi Enstitülerinin Ölçme Ağı)
MEB	: Milli Eğitim Bakanlığı
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü

MM5	: Meteorolojik Hava Tahmin Modeli
MOS	: Model Output Statistics
Mtep	: Milyon ton eşdeğeri petrol
MW	: Mega Watt
OECD	: Organization for Economic Co-Operation and Development (Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü)
REPA	: Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası
RES	: Rüzgar Enerji Santrali
RGİ	: Rüzgar Ölçüm İstasyonu
SA	: Serbest Atmosfer
SHT	: Sayısal Hava Tahmini
SODAR	: Sonic Detection and Ranging (Ses Algılama ve Ölçümleme)
TEDAS	: Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TEK	: Türkiye Elektrik Kurumu
TEP	: Ton Eşdeğer Petrol
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TÜREB	: Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği
WAsP	: The Wind Atlas Analysis and Application Program (Rüzgar Atlası Analizi ve Uygulama Programı)
WRF	: Weather Research & Forecasting Model (Hava Tahmin Modeli)
WWEA	: World Wind Energy Association (Dünya Rüzgâr Enerjisi Birliği)
YEGM	: Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü
YEK	: Yenilenebilir Enerji Kaynağı
YİD	: Yap İşlet Devret
YSA	: Yapay Sinir Ağları

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Dünyamızın hızla kirlendiği ve doğal kaynakların hızla yok olduğu, çağımızda, enerji bütün ülkelerin en önemli ihtiyacıdır. Petrol, doğal gaz ve kömür gibi enerji kaynaklarının rezervlerinin sınırlılığı, ayrıca bu kaynaklarda sürekli fiyat değişkenliği dünyamızın en büyük problemidir. Bununla birlikte enerjinin verimsiz ve bilinçsiz kullanımı üst düzeylerde dir. Alternatif enerji kaynakları araştırılmakta, mevcut enerjiyi en yüksek verimle kullanabilecek teknolojiler geliştirilmekte ve insanlara etkin ve verimli enerji kullanma bilinci verilmeye çalışılmaktadır.

Ülkemizin enerji kaynakları potansiyelinin kullanımını sağlayacak yerli ve yeni teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir. Yerli, doğal ve güneş kaynaklı yenilenebilir enerji kaynaklarımızın en önemlilerinden biri rüzgâr enerjisidir. Rüzgar enerjisi yatırımları ve üretimi 2007 yılından sonra her yıl artarak devam etmektedir [1].

Son zamanlarda rüzgâr enerjisi ve değişkenleri ile ilgili yapılan çalışmalarda yoğunluk kazanmıştır. Rüzgâr enerjisi santrallerinde kontrol ve üretim planlama, rüzgarın stokastik yapısı nedeniyle tamamıyla insanoğlunun elinde değildir. Rüzgârın hangi zamanda kaç şiddetinde ve hangi yönlerde esmesi gerektiğinin insanlar tarafından belirlenmesi pek mümkün olmaz [2]. Özellikle elektrik üreten yenilenebilir enerji santrallerinin, kurulduğu coğrafik alanın meteorolojik verilerinin kalitesine, zaman değişkenine bağlı olarak, değişimin uygun ve güvenilirliği yüksek modellerle ortaya konarak, yatırım ve üretim planlaması yapılmalıdır [3].

Rüzgâr gözlem sonuçlarının çok iyi analiz edilmesi ve bütün karakteristik özelliklerinin detaylarıyla tespit edilip bilinmesi gerekir. Rüzgar enerjisi yatırımlarının kurulum maliyetleri yüksek olduğu için rüzgar hızının tahminlenmesi ve karakterizasyonu bu açıdan çok büyük öneme sahiptir [3].

Rüzgâr enerjisini alanında yatırımların yaygınlaşması, etkin kullanabilmesi için tüm dünya ülkelerinde ve Türkiye’de yoğun olarak araştırma geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Sistem geliştirmede kullanılan yaklaşımlardan biri sistemin matematiksel modeli ile birlikte bilgisayar simülasyonları kullanarak tasarım ve planlamaların yapılmasıdır [4].

Yenilenebilir enerji santralinin üretimi, meteorolojik veriler gibi değişken faktörlere göre, doğru olarak saptanmalı ve üretim kapasitesi ile santral ekipmanları doğru seçilmelidir. Üretim ve yatırım faaliyetlerinde hata olmaması ve kaynakların etkin kullanılması için verilerin güvenilir, doğru ölçülmesi, iyi analiz edilmesi, iyi planlanması ve iyi tahmin edilmesi gerekmektedir [5].

Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ) enerji dağıtımında rüzgar enerjisi üreticilerinden, 24 saatlik rüzgar enerjisi üretim tahminlerini zorunlu olarak istemektedir. Rüzgar enerjisi üreten işletmelerde yurtdışı kaynaklı şirketlerin Türkiye’de kurdukları modeller ve programlar ile bu ihtiyaçlarını gidermeye çalışmaktadırlar. Sonuçta Türkiyede yapılabilecek üretilebilecek model ve programlar için dışarıya kaynak aktarılmaktadır. Bu konuda rüzgar enerjisi üretiminin merkezi olarak izlenmesi; teknoloji, model üretilmesi ve kaynak planlamasının yapılması için Enerji Ve Tabi Kaynaklar Bakanlığın (ETKB), Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM) tarafından Ritim projesi hayata geçirilmiştir [6].

Enerji alanında tahminleri, tahminin kullanım amacına göre, talep, yatırım ve üretim tahminleri olarak üç kategoriye ayrılabilir. Talep tahminleri [7], genelde geçmiş yıllardaki tüketim veriler ve tüketim alışkanlıklarına dayalı olarak yapılmaktadır. Yatırım tahminleri ise yatırım yapılacak lokasyon veya konumun potansiyeline ve fizibilite çalışmasına bağlıdır [4]. Üretim tahminleri ise kaynak potansiyeli ve teknik potansiyele bağlı olarak gerçekleştirilebilir [3,5,7].

Bu çalışmada, bu bölümde: enerji, enerji çeşitleri, enerji kaynaklarının sınıflandırılması ve rüzgar enerjisinin Dünya ile Türkiyede yeri ve önemi anlatılmıştır. İkinci bölümde rüzgar enerjisi ile ilgili temel kavramlar ve rüzgar enerjisine etki eden faktörler hesaplama formülleri ile sunulmuştur. Üçüncü bölüm, Materyal ve Metod

bölümünde ise Karabük Kahyalar'da kurulan Rüzgar Ölçüm İstasyonu (RGİ) ve elde edilen verilerle ilgili bilgiler sunulmuştur. Daha sonra tahmin metodları sınıflandırılması ve yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Aynı zamanda bu çalışmada kullanılan metodlar ve önerilen metodlar tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde ise yapılan hesaplama sonuçları tablo ve şekillerle sunulmuş böylece bulgular değerlendirilmiştir. Son bölümde elde edilen genel sonuçlarla birlikte önerilere yer verilmiştir.

1.1. ENERJİ

Enerji, iş yapabilme yeteneği, maddede var olan çeşitli dönüşüm teknikleri ve işlemleriyle ortaya çıkan güç olarak da tanımlanmaktadır. Enerji kaynakları dünyanın yaratılışından günümüze tükenme veya tekrar elde edilebilmelerine göre; yenilenebilir ve yenilenemez (tükenen) enerji kaynakları olmak üzere ikiye ayrılır (Çizelge 1.1) [8].

Çizelge 1.1. Tükenebilirliğine göre enerji türleri.

Tükenebilen Enerji Kaynakları	Tükemeyen Enerji Kaynakları (Yenilenebilir)
Petrol, Doğal Gaz, Kömür, Linyit, Atom Enerjisi (rezervleri ile sınırlıdır) Konvansiyonel enerji kaynaklarıdır.	Güneş, Hidrolik, Rüzgar, Dalga, Gelgit, Jeotermal, Biyokütle Enerjisi

Enerji kaynakları oluşması açısından; ana kaynağına göre: güneş, dünya ve ay kaynaklı enerji olarak üç gruba ayrılır [9]. Buna göre enerji kaynakları, dönüşüm teknikleri ve son kullanım enerji türü olarak Çizelge 1.2'de bir sınıflandırması verilmiştir [8,9].

Rüzgâr enerjisi temiz ve yenilenebilir enerji kaynağı olarak, rüzgâr gücünü elektrik enerjisine dönüştürmede çok hızlı teknolojik gelişmeler kaydetmiştir. Atmosferin alt tabakalarını kirleten fosil kökenli enerji kaynaklarına alternatif olarak, en hızlı gelişen yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Rüzgâr enerjisi potansiyeli de diğer kaynaklarda olduğu gibi doğal, teknik ve ekonomik potansiyel olarak ifade edilmektedir [10].

Rüzgâr enerjisi dönüşümünde, uygulama yapılmadan doğal olarak sahip olduğu potansiyele **doğal potansiyel** olarak isimlendirilirken, tabii potansiyelin mevcut teknolojik cihaz ve santraller sayesinde enerjiye dönüşebilecek bölümü ise **teknik**

potansiyel olarak adlandırılmakta ve yine teknik potansiyelin başka enerji kaynaklarına göre minimum maliyet ile maksimum enerji üretilebilecek olan kısmı da **ekonomik potansiyel** şeklinde tanımlanmaktadır [10]. Bu tanımlara göre türkiyenin sahip olduğu enerji kaynaklarının rezerv dağılımı ETKB raporlarına göre Çizelge 1.3’de verilmiştir [11].

Çizelge 1.2. Enerji kaynaklarının sınıflandırması.

Ana Kaynak	Kullanılabilir Enerji Kaynağı	Doğal Enerji Dönüşümü	Teknik Enerji Dönüşümü	Kullanım Enerjisi
Güneş	Su	Buharlaşıma, Yağış	Hidroelektrik Santralleri	Elektrik Enerjisi
	Rüzgar	Atmosferdeki Hava Hareketi	Rüzgar Enerjisi Tesisleri	Elektrik, Mekanik Enerji,
		Dalga Hareketi	Dalga Enerjisi Tesisleri	Elektrik, Mekanik Enerji
	Güneş Işını	Yer ve Atmosfer Isınması	Isı Pompaları	Isı Enerjisi
		Güneş Işımları	Kollektörler Solar Hücreler(Fotovoltaik)	Isı Enerjisi Elektrik Enerjisi
	Biyo mas	Biyomas	Isı Güç Tesisleri	Isı, Elektrik Enerjisi
Dünya	Çekirdek Isısı	Jeotermal Enerji	Dönüşüm Tesisleri	Yakıt Enerjisi
			Jeotermal Enerji Tesisleri	Isı, Elektrik Enerjisi
Ay	Ay Çekim Gücü	Gel-Git Olayı	Gel-Git Güç Santralleri	Elektrik Enerjisi

Yatırım açısından enerji kaynaklarının amortisman süresi önemli bir parametredir. Çeşitli enerji kaynaklarının amortisman süreleri kayaslama açısından Çizelge 1.4 de verilmiştir [9]. Rüzgar hızının uygun olduğu, yani 6 m/s ve daha yüksek olduğu yerlerde; diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının amortisman süresi yada geri ödeme süresi en kısa olanı rüzgar enerjisidir (Çizelge 1.4).

Çizelge 1.3. Türkiye'nin 2010 itibari ile tesbit edilen enerji kaynakları rezervleri.

Kaynak	Rezerv	Açıklama
Rüzgar	8.000 MW; Çok verimli 40.000 MW; Orta verimli 88 000 MW, Verimli	Son veriler ve değerlendirmeler ışığında 48 000 MW ekonomik 88000 MW teknik potansiyel.
Kömür	Linyit:12;4 milyar ton Taşkömürü:1,33 milyar ton	2009 itibariyle 12,4 milyar ton.
Jeotermal	650 MW	Elektrik Üretim Amaçlı Jeotermal Enerji potansiyeli 31500 MW (2009)
Su	130 Milyar KWh/yıl	
Güneş	33 Mtep/yıl	Bazı Uzmanlarca 80 Mtep
Doğal gaz	8 milyar m3	
Asfaltit	82 milyon ton	
Petrol	43 milyon ton	
Biyokütle	8,6 Mtep/yıl	

Çizelge 1.4. Yenilenebilir enerji kaynaklarının amortisman süreleri.

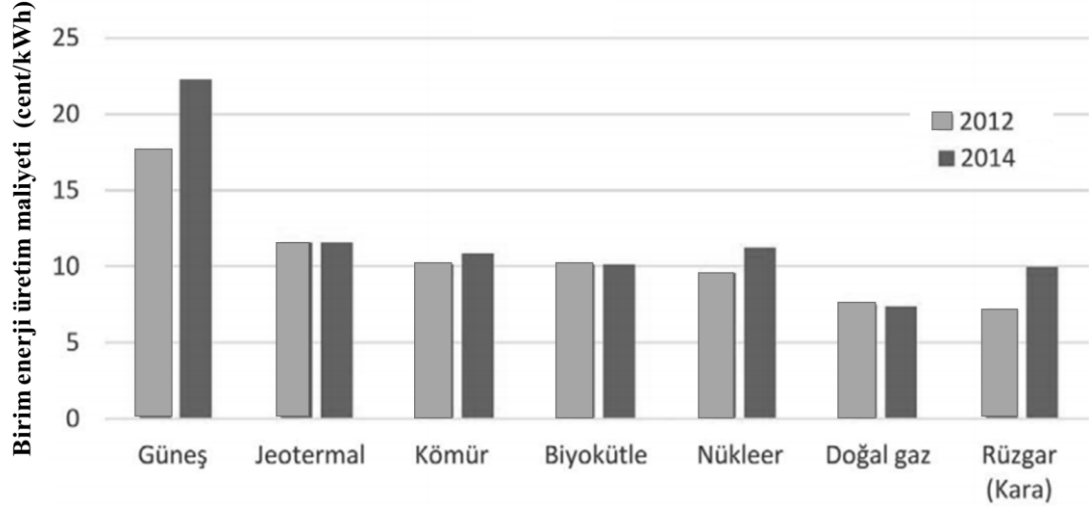
Amortisman Süresi (Ay)	Rüzgar Enerjisi			Güneş Enerjisi			Hidrolik Enerji		
	4,5 m/s	5,5 m/s	6,5 m/s	Mono	Multi	Amorph	Büyük	Küçük	Mikro
	6-20	4-13	2-8	28-55	19-38	14-28	5-6	8-9	9-11

Çizelge 1.5. Seçilmiş bazı ülkeler için elektrik tüketimi (2003-2008).

Ülke	Nüfus 2008	Elektrik Tüketimi 2008	Yıllık Kişi Başı Tüketim 2008	Nüfus büyüme oranı 2003-2008	Elektrik Tüketimi Artış Oranı 2003-2008
	Milyon	TWh/yıl	kWh/kişi	%	%
Türkiye	71	198,161	2791	%1,8	7,55
Almanya	82,1	587,0	7150	-0,10	0,62
ABD	304,5	4155,9	13648	0,92	1,85
Çin	1325,6	3252,3	2453	0,58	15,84
Hindistan	1140,0	645,3	566	1,42	7,85

Ülkelerin gelişmişlik düzeyleri kişi başı tüketilen enerji miktarına göre belirlenmektedir. Bunun nedeni tüketilen enerjinin aynı zamanda üretebilme potansiyelini ifade etmesidir. Türkiye ve bazı dünya ülkelerinin 2003-2008 yılları nüfus ve kişi başı elektrik tüketimleri Çizelge 1.5 verilmiştir [9]. Ayrıca birim enerji üretim maliyetleri önemli bir parametredir. Birim enerji üretim maliyeti 2012

verilerine göre, en fazla olan santralin güneş enerji santrali (2012 yılı 17,65 cent/kWh), en az olanın ise rüzgar enerji santrali (2012 yılı 7,15 cent/ kWh) olduğu Şekil 1.1’de görülmektedir [12].



Şekil 1.1. Enerji santrallerinin kaynaklara göre birim enerji maliyetleri.

1.2. DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE RÜZGAR ENERJİSİ KULLANIMI

İnsanlar binlerce yıldır rüzgarın gücünden faydalanmaktadırlar. Rüzgar gücünün ilk bilinen kullanımı yelkenli gemilerde olmuştur. Yaklaşık beşbin yıl önce mısırd, yelkenli teknelerle Nil nehrinde yukarı aşağı seyahat edildiği bilinmektedir. Bundan birkaç bin yıl sonra İranda, rüzgar enerjisi düşey eksenli yel değirmenlerini un öğütmek gibi hassas işler için kullanılırlardı. Türklerin ve İranlıların Mezopotamya, Maveraünnehir ve İran çevresinde ilk yel değirmenlerini M.S. 7. yüzyılda kullandıkları bilinmektedir. Bununla birlikte yel değirmenleri, haclı seferleri sırasında Avrupalılar tarafından ilk defa görülmüş ve 11-12 yüzyıllarda Fransa ve İngiltere’de kullanılmaya başlandığı tespit edilmiştir. Batı Avrupa’da yel değirmenleri dikey eksenli konfigürasyondan daha verimli yatay eksenli konfigürasyonuna çevrilmiştir [13]. Daha sonra Almanlar yel değirmenlerini su pompalamak için modifiye etmişler, denizden su pompalamak için kullanmışlar ve Hollanda tipi olarak isimlendirmişlerdir. Hollanda’da çatısı dönen ilk rüzgar milleri 18. yüzyılda kullanılmaya başlanmıştır. Elektrik enerjisi üretmek için ilk rüzgâr türbinini 1891 yılında, Danimarkalı Profesör La Cour üretmiştir. Paul La Cour, yaptığı çalışmada elektroliz yöntemiyle hidrojen gazı elde etmiş ve böylece rüzgar enerjisinin depolanabileceğini de göstermiştir.

Birinci dünya savaşından (1918) sonra büyük şehirlere elektrik verilmeye başlanmış ve dizel yakıtların ucuzluğu sebebiyle rüzgar enerjisi alanında yapılan çalışmalar ilk maliyetlerin yüksek olması ve mevcut teknolojik şartlar sebebiyle atıl kalmıştır [8].

Çok kanatlı çiftlik yel değirmenleri, 19. Yüzyılın ikinci yarısı boyunca Amerika'da icat edilmişlerdir. Bu ailesel kırsal yel değirmenleri, küçük ölçekteki besi hayvanlarının su tanklarına yer altı suyu pompalamak için kullanılmıştır. 1930'lar ve 1940'larda çiftliklere ait olan güç hatlarına elektrik sağlamak için Amerika'da elektrik üreten türbinler imal edilmiştir. Bununla birlikte 1950'lerin başlarında, aşağı yukarı her Amerikalının evine merkezi elektrik güç dağıtım ağının genişlemesiyle, rüzgar türbinleri gereksiz hale gelmiştir.

Rüzgar çiftlikleri ve rüzgar sistemleri için yeni bir pazarın oluşması ve fosil yakıt haricinde alternatif güç kaynakları kullanımı artışı 1980'lerin başında başladı. Bunun sebebi, 1970'lerde! Arap-İsrail savaşlarından dolayı petrol fiyatlarının artması ve enerji kaynaklarında arz güvenliği ile sürdürülebilirliğinin sağlanması için federal kanunlarla teşvik edilmesinin gündeme gelmesidir. Tüm dünyada ve ülkemizde, Filistin ve Kudus'un İsrail tarafından işgali, Arap-İsrail savaşı (1973) sebebiyle ortaya çıkan dünya petrol krizinden sonra rüzgâr ve yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili çalışmalar artmaya ve önem kazanmaya başlamıştır. Özellikle 1990-1991 sonrası yıllarda rüzgâr enerjisi teknolojileri ve bileşenleri ile ilgili yapılan çalışmalar çok daha yoğunluk kazanmıştır. Rüzgar enerjisi alanı akademik bilgi birikimi, yapılan çalışmalar sonucunda sanayide uygulanmaya başlanmış ve diğer enerji kaynakları ile rekabet edebilecek düzeye gelmiştir.

Ülkemizde RES (Rüzgar Enerji Santrali) kurulması amacıyla çeşitli bölgelerde 1990'dan beri Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİEİ) yeni adı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM) tarafından rüzgar hız ve yön ölçümleri yapılmaktadır. Türkiye'de özellikle Ege, Marmara, Doğu Akdeniz kıyı bölgelerinin rüzgâr enerjisi potansiyelinin yüksek olduğu tesbit edilmiştir. EİEİ ve Devlet Meteoroloji İşleri Müdürlüğü (DMİ) tarafından yapılan gözlemlere dayalı gerçekleştirilen Türkiye Rüzgâr Haritası, ülkemizin teknik rüzgar enerjisi potansiyelini yaklaşık 88 GW olarak göstermektedir

[14]. Tespit edilen rüzgar enerjisi potansiyelinin kullanılabilir hale getirilmesi çok önemlidir.

DMİ tarafından 2002 yılında yapılan çalışmada, istasyonlardan alınan 1970 – 1980 yılları rüzgar verileri kullanılarak Türkiye geneli, rüzgâr enerjisi dağılımı belirlenmiştir. Karadeniz hariç, deniz kıyılarımız rüzgâr enerjisi açısından verimli görülmektedir. Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesinin 2002 yılı raporuna göre, DMİ GenelMüdürlüğü'nün 113 gözlem istasyonunun rüzgar hızı verilerini baz alan EİE Genel Müdürlüğünce gerçekleştirilen çalışmada ülkemizin ortalama rüzgâr hızı 2.5m/s, ve yıllık ortalama rüzgâr güç yoğunluğu 24 W/m² olarak hesaplanmıştır. Türkiye'nin rüzgâr enerjisi kaynağı potansiyeli; teknik 88 000 MW, ekonomik 10 000 MW civarında hesaplanmıştır [11].

Rüzgar çiftlikleri tipik olarak düzinelerce rüzgar türbinine sahiptir. Potansiyel rüzgar türbini için yaklaşık olarak bir dekar (1 dönüm veya 1000 m²) arazinin yarısına ihtiyaç vardır. Bir rüzgar çiftliği, güvenilir ve rüzgar hızı ideal olan bir yere kurulur. Rüzgar kaynak haritaları ve ölçümler bir rüzgar çiftliği için en iyi bölgeyi tanımlamak için kullanılır.

Evlere ve işyerlerine elektrik taşıyabilen güç hatlarına yakın yerlere rüzgar çiftliklerinin yerleştirilmesi gerekmektedir. Rüzgar çiftlikleri, izole bölgelerde olduğunda elektronik araçlarla, rüzgar hızı gibi, üretilen gücün miktarı, çalışma sıcaklığı ve dişli kutusu yağ seviyesi gibi bilgiler uzaktan izlenir. Bakım onarım maliyetlerinden kaçınmak ve bozulmaları önlemek için izlenen her türbinin problemleri tanımlanır, tahminleme sistemleri kullanılır.

Yerden onlarca metre hatta 100 metreden daha yüksek kulelerin tepesine yerleştirilen türbinler ile rüzgar; ağaç, tepeler veya binalar gibi engeller tarafından engellenmeksizin yakalanır. Bir rüzgar türbini yerden ne kadar yüksekse, o kadar yüksek rüzgar hızlarını yeterince alabilir. Rüzgar hızı ne kadar çok süratli ise (özellikle 6 m/s ile 25 m/s arasında), o kadar çok elektrik üretilebilir.

Evlerimizin aydınlatılmasından ısıtılmasına; sosyo ekonomik alanlardan, iletişim ve eğitime kadar, enerji; hayatımızın her alanında kullandığımız vazgeçilmez bir faktördür. Dünyada ve ülkemizde hayatın sürdürülebilirliği için enerji her zaman gerekli olan bir unsurdur. Ülkelerin ekonomisine baktığımızda enerji, bütcenin ana kalemlerinden biridir. Özellikle ülkemizde enerji kaynaklarına baktığımızda % 60-70’lik kısmı ithal edildiği düşünüldüğünde sürdürülebilirlik açısından yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeli ve bu kaynakları hayata geçirilmelidir. Geçtiğimiz bir kaç yıl için, ülkemiz kurulu enerji kapasitesinin kaynaklara göre dağılımı incelendiğinde özellikle termik enerji kaynağının ithal edildiği dikkatimizi çeker [15]. Olumlu olan gelişme şu ki 10 yıl önce ülkemiz kurulu enerji kaynakları arasında yenilenebilir enerji kaynaklarının payı % 1 den bile küçükken şimdi bu pay % 8-10 civama yaklaşmıştır.

Ayrıca bu kurulu kapasitenin artması ile birlikte, ülkemizde, yerlilik mevzuatıyla rüzgar endüstrisi gelişmeye başlamıştır. Özellikle kanat ve kule olmak üzere, rüzgar türbini bileşenlerinin yüzde 50’si yerli olarak imal edilebilmektedir. Bu günlerde, kule üreticisi sayısı 7, kanat üretici sayısı 3, jeneratör üreten sayısı 2 dişli kutusu üreten sayısı 2, ankaraj ve bağlantı elemanları üreten firma sayısı 1 tane olmak üzere son 10 yıllık süreçte 15 adet Rüzgar Endüstrisi oluşmuştur. Kule ve kanat üretiminde, ürünlerin yaklaşık yüzde 30’luk bölümü iç piyasaya verilirken, yüzde 70’lik bölümü ihraç edilmektedir [16].

Yasayla, yenilenebilir enerji kaynağına dayalı elektrik üretim tesisleri için belirlenen fiyatlar 'dolar sent' olarak karar verilmiştir. YEK destekleme mekanizması çerçevesinde karar alınan fiyatlar aşağıdaki gibi olmuştur.

- Hidroelektrik üretimi için 7,3 dolar sent/kW,
- RES elektrik üretim için 7,3 dolar sent/kW,
- Jeotermal enerjisi elektrik üretimi için 10,5 dolar sent/kW,
- Biyokütle elektrik üretimi için 13,3 dolar sent/kW,
- Güneş enerjisi elektrik üretimi için 13,3 dolar sent/kW.

Uygulamaya yönelik olan kanun, 18 Mayıs 2005 tarihi ile 31 Aralık 2015 tarihi arasında işletmeye girmiş ya da girecek YEK üretim lisansı bulunan firmalar için alım fiyatlarının 10 yıllığına uygulanacağını garanti etmektedir.

En son durumda Rüzgar sanayi ve yerlilik mevzuatı, 31 Aralık 2020’de biteceğinden sonrası için yerli teşviklerin sürekliliği belirsizliğini korumaktadır. Milli ve yerli enerji politika çerçevesinde bu dönemde yerli sanayinin gelişmesi için mevzuat en kısa zamanda düzenlenerek güncellenmelidir.

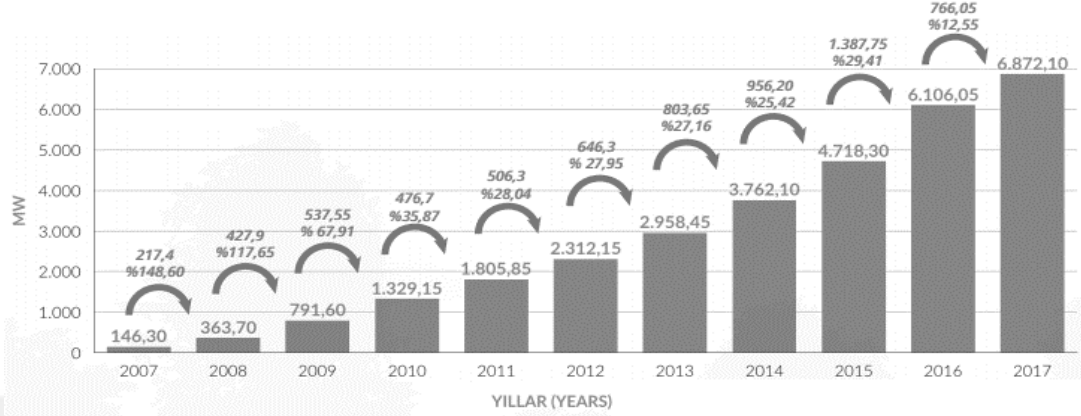
Ülkemizde 2017 yılı sonunda, rüzgar enerjisi ile elektrik üretmek için 6.516 MW toplam kurulu güç ve 207 tane çalışır durumda Rüzgâr Enerji Santraliyle (RES) Türkiye toplam kurulu gücünün % 7,6’sını teşkil etmektedir. Geride bıraktığımız 2017 senesi boyunca rüzgar enerjisi kaynaklı 17 909 GWh elektrik üretildiği ve üretilen bu enerji değerinin toplam üretimin % 6,06’sına karşı geldiği Enerji ve Tabii Kaynaklar bakanlığı raporlarında yer almaktadır. Ekim 2017 için son durum Şekil 1.2 de verilmiştir. Raporlar incelendiğinde her yıl yaklaşık % 6-8 arasında enerji kurulu gücünde talebe bağlı artış gerçekleşmektedir [17]. Türkiye’nin enerji kaynaklarını göre toplam kurulu gücünün yıllara göre değişimi için Çizelge 1.6 incelenmelidir.

Çizelge 1.6. Türkiye’nin enerji kaynaklarını göre toplam kurulu gücü.

Kurulu Güç Kapasitesi	2012(MW)	2013(MW)	2014(MW)	2015(MW)	2016(MW)	2017(MW)
Termik Enerji	35027.2	38648	41800.7	41848.6	44411	46 926
Hidrolik Enerji	19609.4	22289	23640.9	26137.2	26681	27 273
Rüzgar Enerjisi	2260.5	2759.60	3629.7	4561.4	5751	6 516
Jeotermal Enerji	162.2	310.80	404.9	979.8	821	1 063
Güneş Enerjisi	--	--	40.18	327.6	833	3420
Toplam :	57059.4	64.007.5	69516.4	73854.6	78497	85 200

Dünya’da ve Türkiye’de rüzgar enerjisi ile elektrik üretimi alanında yatırımlar devam etmektedir. 2016-2017 yıllarına ait rüzgar enerjisi toplam kurulu gücü açısından değerlendirme yapmak için Çizelge 1.7 incelenmelidir [18,19], Avrupanın ve Türkiye’nin rüzgar enerjisi güncel kurulu gücü ise Şekil 1.6’da verilmiştir. Rüzgâr şu anda Avrupa Birliği (AB)’nin enerji talebinin % 11’ini ve birçok ülkede daha fazlasını karşılamaktadır: Rüzgar enerjisi kurulu gücünün toplam elektrik enerjisi kurulu gücü

içindeki payları; Danimarka'da % 37; İrlanda % 27; Portekiz % 25; İspanya % 19; Almanya % 16 ve Türkiye'de % 6,9 ile yer almaktadır [19].



Şekil 1.2. Türkiye rüzgar enerjisi santralleri kümülatif kurulum kapasiteleri.

Çizelge 1.7. Dünyada bazı ülkelerin rüzgar enerjisi kurulu güç kapasitesi.

Country	MW (2016)	% Pay	MW (2017)	% Pay
Çin	168,732	34.7	188,232	35
ABD	82,184	16.9	89,077	17
Almanya	50,018	10.3	56,132	10
Hindistan	28,700	5.9	32,848	6
İspanya	23,074	4.7	23,17	4
İngiltere	14,543	3.0	18,872	3
Fransa	12,066	2.5	13,759	3
Birazilya	10,740	2.2	12,763	2
Kanada	11,900	2.4	12,239	2
İtalya	9,257	1.9	9,479	2
TÜrkiye	6,081	1.5	6,857	1
Rest of the world	75,576	14.5	76,151	14
Dünya Toplam	486,790	100	539,581	100

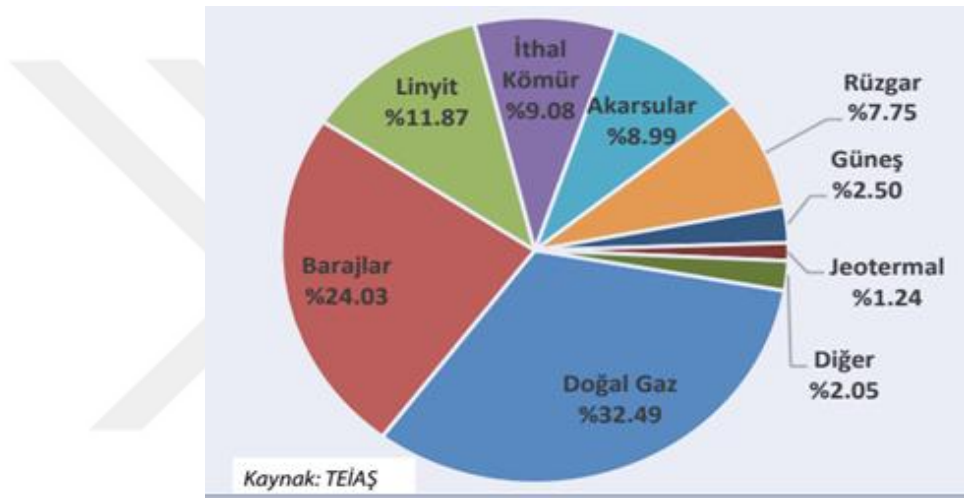
Dünya Enerji Ajansı (International Energy Agency:IEA) rüzgar enerjisinin 2030'dan kısa bir süre sonra Avrupa'da birinci enerji kaynağı olmasını beklemektedir. Rüzgar enerjisi raporuna göre rüzgar enerjisi 2030'a kadar Avrupa enerji talebinin yaklaşık % 30'unu karşılayabilir. Ancak bu;

- Doğru politikaları gerektirir,
- Enerji sisteminin verim artımı,
- Teknoloji geliştirme,
- Ulaşım ve ısıtma elektrifikasyonunda ilerleme,

- Rüzgar çiftliklerinin ömür süresinin uzatılması,
- Rüzgar çiftliklerinin yenilenmesinde önemli yatırımlar gerektirir.

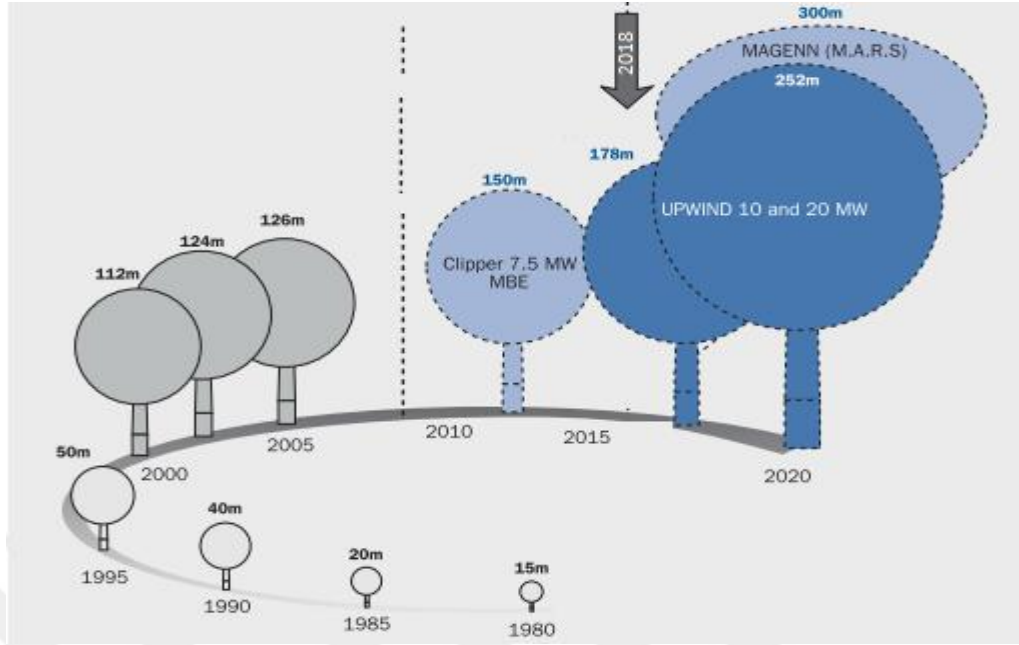
Avrupa'nın mevcut rüzgar çiftliklerinin yaklaşık yarısı, 2030 yılına kadar normal işletme ömürlerinin sonuna ulaşacaktır [19].

Rüzgar Türbinlerinde ticari olarak üretilen rüzgar türbinlerinde büyüklük olarak bir artış göstermektedir (Şekil 1.4) [21]. Bununla birlikte birim enerji üretim ücretleride gelişen teknoloji ile birlikte azalma eğilimi göstermektedir (Şekil 1.5).

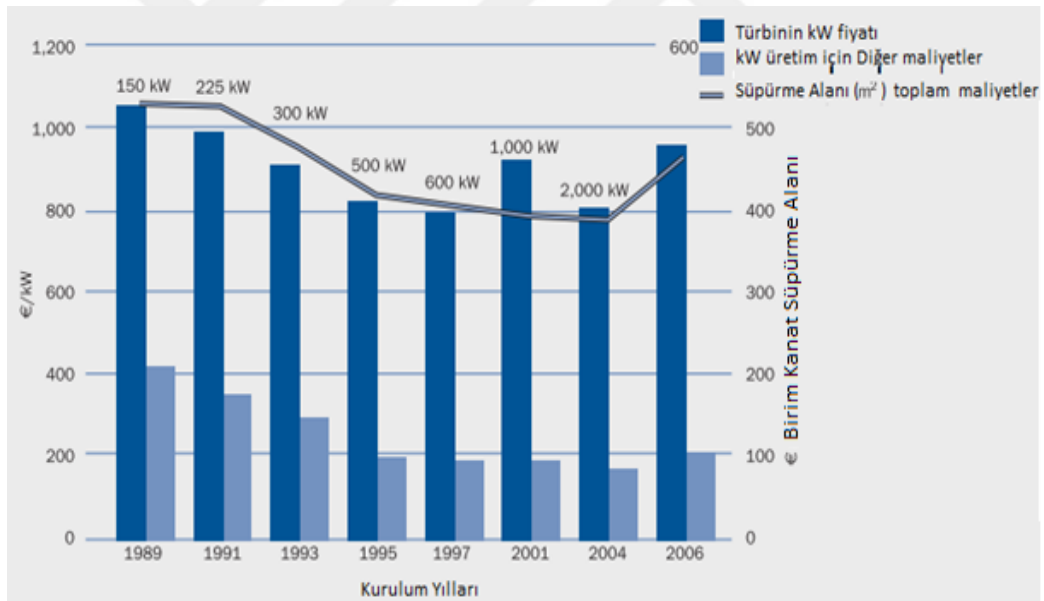


Şekil 1.3. Türkiye enerji kaynakları kurulu güç kapasite dağılımı (Ekim 2017).

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tüm dünyanın sahip olduğu rüzgâr enerji potansiyelini belirleyebilmek amacıyla bazı araştırma çalışmaları yaptırmıştır. Bu çalışmalarda, 5,1 m/s üzerinde rüzgâr hız potansiyeli olan bölgelerin, uygulamaya dönük olan ve toplumsal zorunluluklar (tarım / askeri arazi) sebebiyle % 4'ünün kullanılacağı varsayımı ile yeryüzünün teknik rüzgâr enerjisi potansiyelini 53000 TWh/yıl olabileceği hesaplanmıştır. Rüzgâr enerji bakımından yüksek potansiyeli sahip kıtalar/bölgelerin sıralanması Şekil 1.5'de verilmiştir. Verilere göre, rüzgâr enerji bakımından Kuzey Amerika, Afrika, Doğu Avrupa ve Rusya'nın potansiyeli, dünyanın % 66'sına sahiptir [22].

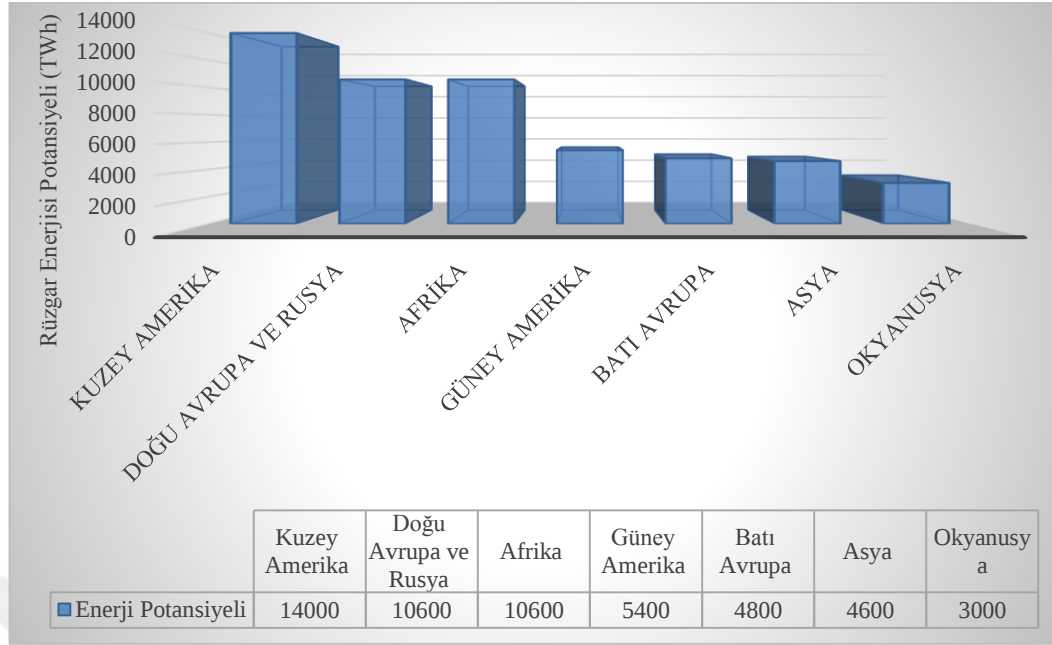


Şekil 1.4. Zamana göre türbin güç ve büyüklüklerindeki artışlar.

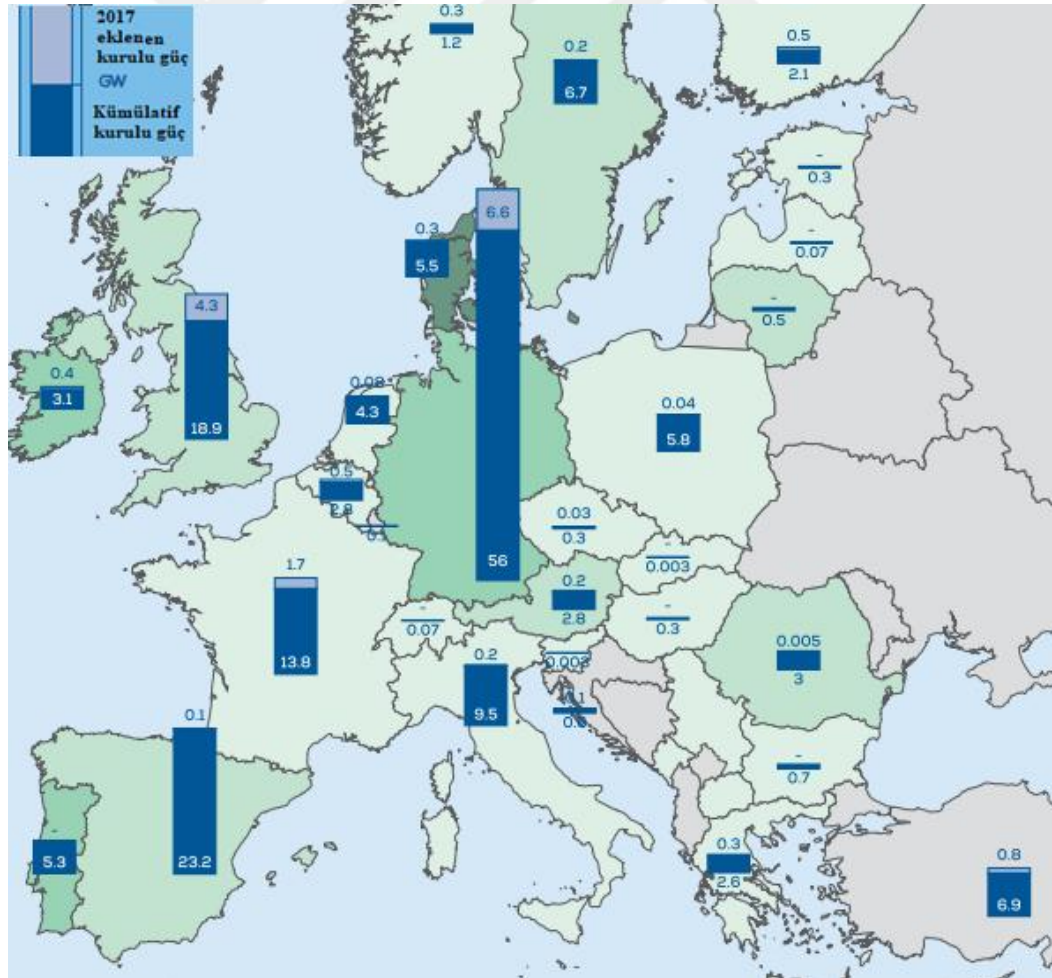


Şekil 1.5. Yıllara göre birim kW türbin maliyetlerindeki değişim.

Sonuçta 2015 istatistiklerine göre dünyanın 53 000 TWh/yıl rüzgar enerji potansiyeli, yine aynı yılın dünya toplam elektrik tüketimi olan 24 097,7 TWh/yıl miktarın iki katına eşittir [15]. Türkiye'nin ise 88 GW lık potansiyeli 2017 toplam kurulu gücü olan 85,2 GW değerinden daha fazladır. Dolayısı ile rüzgar enerjisi alanında türbin bileşenlerinin yerli olmasından başlayarak yazılım, control, işletme ve tahmin sistemlerinin yerli, yeni ve dünya ile rekabet edebilir düzeyde olması gerekmektedir.



Şekil 1.6. Dünya Enerji Ajansına göre 2014 dünya rüzgar enerjisi potansiyeli.



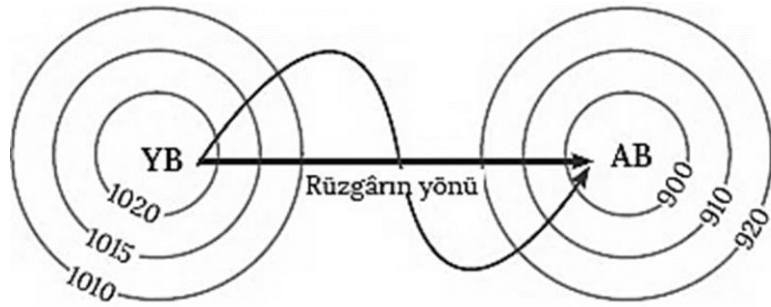
BÖLÜM 2

RÜZGAR ENERJİSİ TEMEL BİLGİLERİ

Bu bölümde; rüzgarın doğasını anlamaya yarayacak temel bilgiler, rüzgar enerjisi hesaplamalarında kullanılan temel eşitlikler, tanım ve kavramlara yer verilmiştir. Bölüm iki alt parçadan oluşmaktadır. İlk olarak rüzgarın doğası, oluşması, yön bilgisi ve sınıflandırılmasından bahsedilmiştir. İkinci olarak rüzgar enerjisi alanında kullanılan istatistiksel kavramlar ve eşitlikler verilmiştir.

2.1. RÜZGAR ENERJİSİ SİSTEMLERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

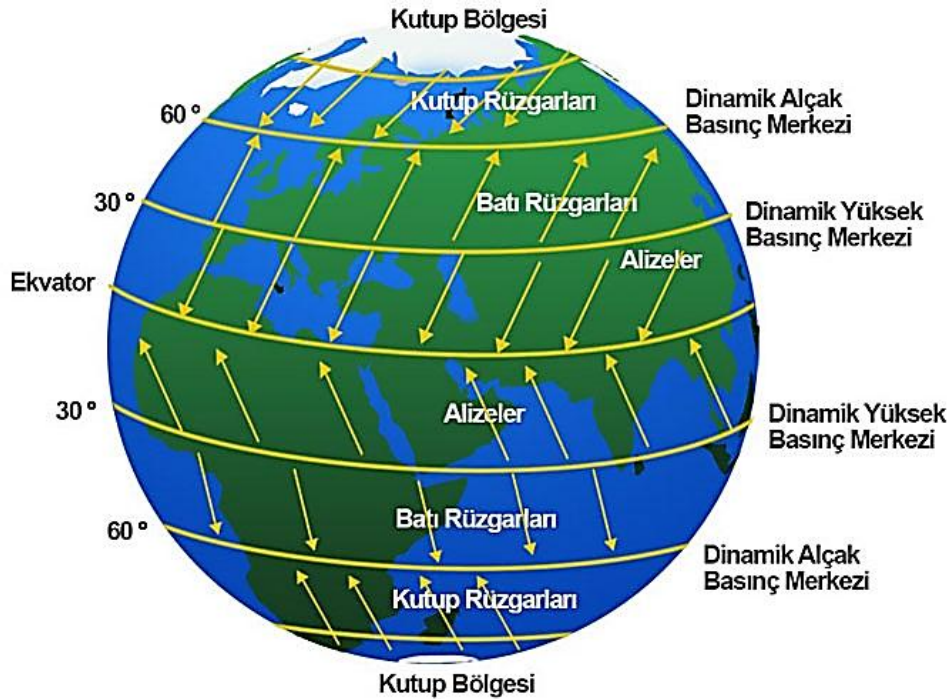
Güneş ışığı ve ısı yeryüzüne farklı açılarla ve farklı şartlarda gelir. Farklı ısınma, coğrafi ve atmosferik şartlar dolayısıyla, hava kütleleri, soğuk ve yüksek basınç alanı bir noktadan, sıcak ve alçak basınç alanı durumunda olan başka bir noktaya hareket eder, bu hava hareketine (Şekil 2.1) rüzgar adı verilir [8].



Şekil 2.1. Basınçlar arası hava hareketi.

Havanın dünya yüzeyi üzerinde hareket edebilmesi için, atmosfer içinde belli kuvvetler vardır. Bunların birincisi basınç gradyan kuvveti, ikinci en önemli kuvvet Coriolis kuvveti, (yer dönmesinin saptırıcı kuvveti de denir.) üçüncü olarak merkezkaç kuvveti, dördüncü olarak sürtünme kuvveti ve diğer coğrafik faktörlerdir.

Yeryüzüne gelen Güneş ışınları, dünyanın 0° derece enlemi dolaylarını (tropik alanlar) dünyanın geri kalanından daha fazla ısıtır. Sıcak hava, soğuk havaya göre daha hafif olduğu için gökyüzünde 10 km (6 mil) yüksekliğe kadar yükselir ve oradan Kuzey ve Güney yönlerine dağılır. Eğer dünya dönmemiş olsaydı, bu yükselen sıcak hava kutuplara kadar gider, oradan aşağıya doğru çökerek ekvatora geri dönerdi. Üç hücre modeli olarak da açıklanan, ekvator bölgesindeki ısınan hava yükselerek yayılarak kutuplara doğru yönelir. Ekvatordan, ısınmış yükselen hava kutuplara yayılırken 30° enlemlerine geldiğinde soğur ve çökmeye başlar. Tekrar yere doğru çöken hava, yayılarak 60° enlemlerinde, yer seviyesinde ekvatora doğru yayılan soğuk hava ile karşılaşır ve yükselmeye zorlanır. Bu dolaşım nedeniyle; Ekvator bölgesinde alçak basınç kuşağı (intertropical convergence zone) , 30° enlemlerinde sub-tropikal yüksek basınç kuşağı (alt enlemleri), 60° enlemlerinde sub-polar alçak basınç kuşağı ve Kutuplarda yüksek basınç takkeleri oluşur [5,23].



Şekil 2.2. Dünya basınç kuşakları ve rüzgarlar.

Dünyanın dönüşüyle oluşan ‘Coriolis Kuvveti’ nedeniyle hava kütlelerinin hareketi olan ve yer üzerinde oluşan rüzgarlar; genel olarak Kuzey–Doğu karakterli olurlar.

Oluşan basınç kuşakları Şekil 2.2 gösterilmiştir. Dünyada görülen genel ve yerel rüzgarlar Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Dünyada görülen rüzgarların sınıflandırılması.

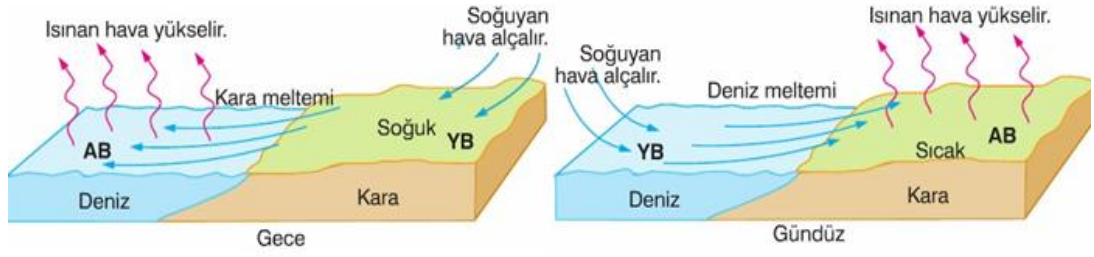
Rüzgar Çeşitleri			
Sürekli Rüzgarlar	Mevsimlik Rüzgarlar	Yerel Rüzgarlar	Tropikal Rüzgarlar
a)Alizeler	Muson Rüzgarları	a)Meltem Rüzgarları	Tayfun(Asya Denizleri)
b)Batı Rüzgarları	a)Yaz Musonu	b)Sıcak Yerel Rüzgarlar	Tonado(Brezilya)
c)Kutup Rüzgarları	b)kış Musonu	c)Soğuk Yerel Rüzgarlar	Kasırğa(Büyük Okyanus, Orta Amerika)
			Hurrican(Orta Amerika)

Çizelge 2.2. Yerel rüzgarların genel sınıflandırılması.

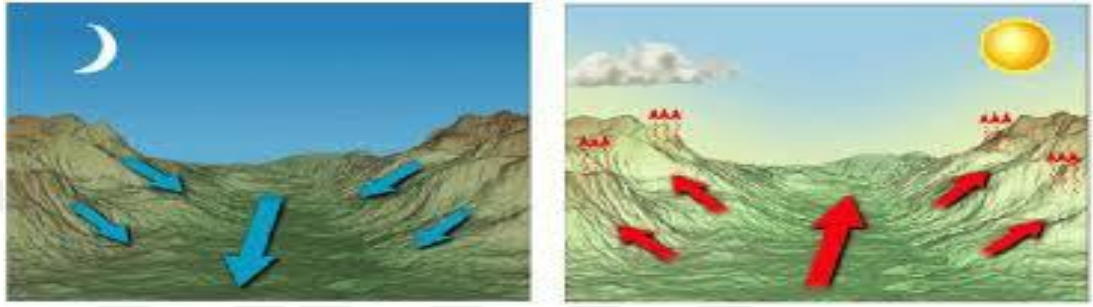
Yerel Rüzgarlar		
a)Meltem Rüzgarları	b)Sıcak Yerel Rüzgarlar	c)Soğuk Yerel Rüzgarlar
-Kara Meltemi	-Föhn(Fön)	-Bora
-Deniz Meltemi	-Sirokko	-Mistral
-Dağ Meltemi	-Hamsin	-Kriteviz
-Vadi Meltemi	-Samyeli	

Alizeler, tüm mevsimlerde kuzey ve güney yarıkürede 30° enlemlerde bulunan yüksek basınç kuşağından ekvator enlemi boyunca olan alçak basınç kuşağı tarafına doğru eserler. Kontralize rüzgarları da isminden de anlaşılacağı üzere Alize rüzgarlarının tersine, atmosferin üst tabakalarında ekvatorunda ısınan havanın yükselmesiyle ekvatorundan uzaklaşacak şekilde hareket etmesiyle oluşan rüzgârlardır.

Meltem rüzgârları, karaların denizlerden ve dağların vadilerden daha çabuk ısınıp soğuması sonucu, bu alanların üzerlerindeki hava kütlelerini etkileşimiyle oluşan rüzgârlardır. Gündüzleri; denizlerden çabuk ısınan kara parçalarına doğru deniz meltemleri (3-8 m/s), geceleri de; çabuk soğuyan kara parçalarından denizlere doğru olan hava hareketlerine (2-4 m/s) kara meltemleri denir (Şekil 2.3). Benzer şekilde gündüz erken ısınan dağlara doğru vadi meltemleri, çabuk soğuyan dağlardan vadilere ise dağ meltemleri eser (Şekil 2.4). Meltem rüzgarları güçlü olduğundan rüzgâr enerjisi kaynağı olarak kullanılabilirler.

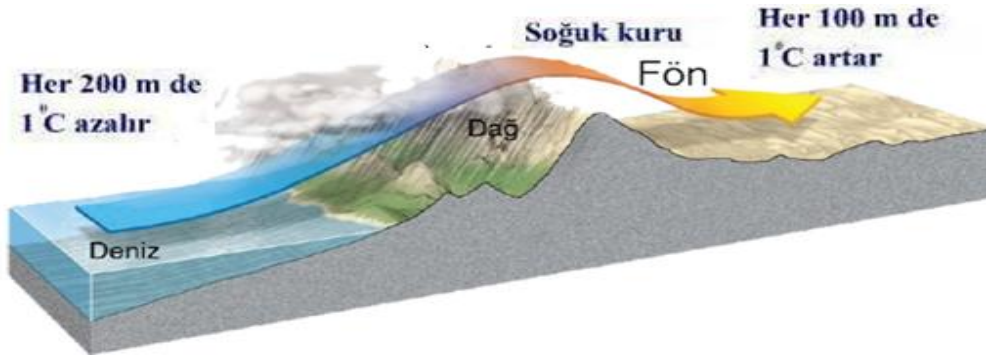


Şekil 2.3. Kara ve deniz meltemlerinin oluşumu.



Şekil 2.4. Dağ ve vadi meltemleri oluşumu.

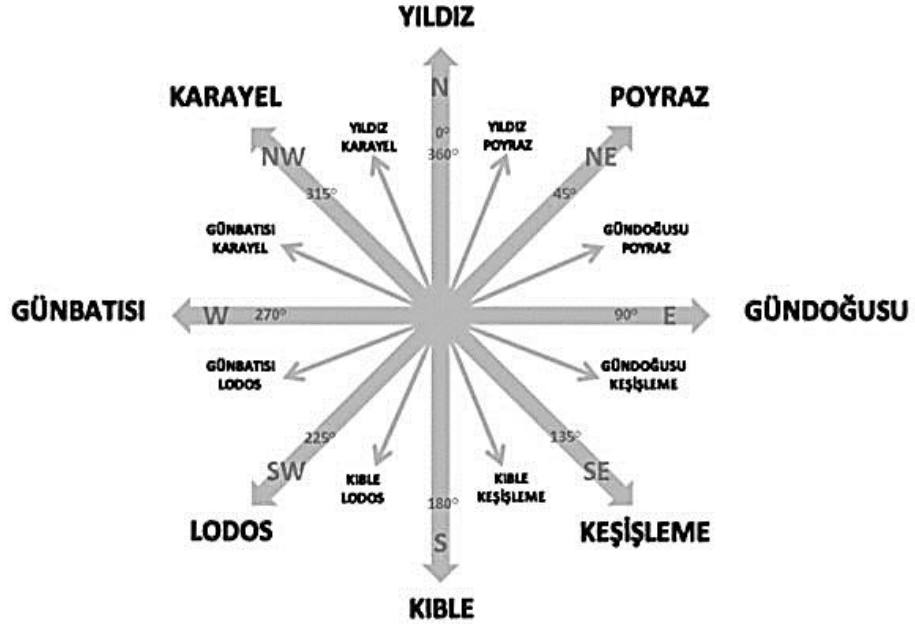
Fön (Föhn) rüzgarları: hava kütesinin ilerleme hareketi esnasında yüksek dağa/dağlara çarparak her 100 m. yükselmede $0,5^{\circ}\text{C}$ soğuyarak yükselmesi, daha sonrada dağın diğer yamacında alçalırken her 100 m de 1°C ısınarak inmesi sonucu oluşur. Şematik olarak Fön (Föhn) rüzgarları Şekil 2.5’de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Fön rüzgarları oluşumu.

Siklon (Cyclone) rüzgarları ise atmosferde belli bir alçak basınç alanı çevresinde hızla dönen rüzgârların esmesi sonucu oluşan şiddetli fırtınadır. Siklonlar yerkürenin güneyinde saat yönünde, kuzey kısmında ise saatin dönme yönü aksi istikamette eserler.

Her ülkenin coğrafyasına ve diline bağlı olarak bu rüzgarlar farklı isimlerle de anılırlar. Türkiye'de esen, yönlerine göre isimlendirilen belli başlı rüzgarlar Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Türkiye'de esen yerel rüzgarların isimleri ve yön açıları.

2.1.1. Rüzgar Hızının Enerji Üretimine Etkisi

Bir cismin iş yapabilme yeteneğine enerji denir. Bir nesne bir yerden başka bir yere giderken kuvvet harcayarak yol alır ve enerji harcar. Kütlesi m olan ve V_r hıza sahip hava akışkanının kinetik enerjisi Eşitlik 2.1 ile verilmektedir.

$$E = \frac{1}{2} m V_r^2 \quad (2.1)$$

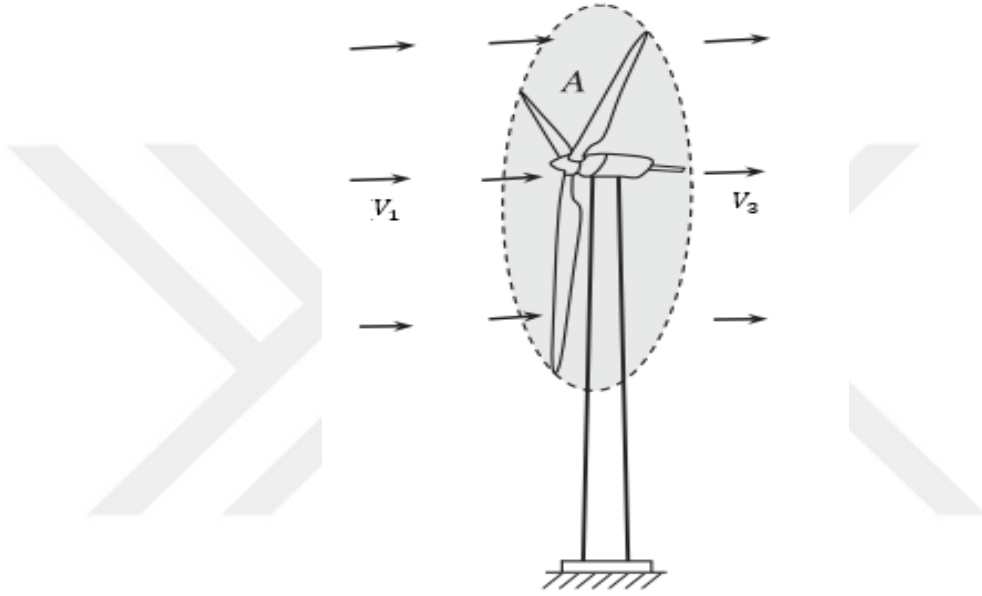
$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} m' (V_r^2) \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2 ile verilen enerjinin türevi, rüzgar gücü P_r 'ye eşitlenirse Eşitlik 2.3 elde edilir. Burada m' kütleli debi Eşitlik 2.4 ifadesi, Eşitlik 2.3 de yerine konulduğunda Eşitlik 2.5 elde edilir.

$$Pr = \frac{1}{2} m' (V_r^2) \quad (2.3)$$

$$m' = \rho A V_r \quad (2.4)$$

$$Pr = \frac{1}{2} \rho A V_r^3 \quad (2.5)$$



Şekil 2.7. Rüzgar türbin kanadının süpürdüğü alandan geçen rüzgar temsili.

Rüzgar türbininin taradığı A alandan geçen rüzgarın bir kısım enerjisi türbin kanatlarıyla ve düşli kutusu ile jeneratöre aktarılacaktır (Şekil 2.7). O zaman türbinin rüzgardan ürettiği güç; V_1 türbin öncesi rüzgar hızı ve V_3 türbin sonrası rüzgar hızı olmak üzere , Eşitlik 2.7 nin Eşitlik 2.6 yerine konmasıyla Eşitlik 2.8 ile elde edilir.

$$P_t = \frac{1}{2} m' (V_1^2 - V_3^2) \quad (2.6)$$

$$m' = \rho A \frac{1}{2} (V_1 + V_3) \quad (2.7)$$

$$Pr = \frac{1}{2} \rho A \frac{1}{2} (V_1 + V_3) (V_1^2 - V_3^2) \quad (2.8)$$

Eşitlik 2.8 de eşitliğin sağ tarafı V_1 parantezine alınır; Eşitlik 2.9 elde edilir. Burada parantez içindeki ifade güç faktörü C_p olarak tanımlanmaktadır. Bu denklemde parantez ifadesinin yerine C_p yazarak yeniden düzenlenirse Eşitlik 2.10 elde edilir.

$$Pr = \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{V_1}{V_1} + \frac{V_3}{V_1} \right) \left(\frac{V_1^2}{V_1^2} - \frac{V_3^2}{V_1^2} \right) \right\} \quad (2.9)$$

$$Pr = \frac{1}{2} \rho A V_1^3 C_p \quad (2.10)$$

Bu elde edilen bağıntıya göre rüzgârdan elde edilecek güç, rüzgar hızının küpüyle doğru orantılı olup, rüzgar hızındaki bir kat artışlık değişim güçte yedi kat artışa sebep olacaktır. Tersine azalma olduğunda ise, hızın yarıya düşmesi, gücün % 87,5 lik azalmasına karşılık gelir. Rüzgar gücünün türbinin süpürdüğü alanla (A) doğru orantılı olması, gücün rüzgar türbini kanat uzunluğunun karesi ile doğru orantılı olması demektir. Yani kanat büyüdükçe elde edilebilecek güçte artacaktır. Benzer şekilde Rüzgardan elde edilecek güç, hava yoğunluğu ve türbin güç faktörü C_p ile de doğru orantılıdır. Rüzgar gücünün büyüklüğü C_p 'ye bağlıdır.

$$C_p = \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{V_1}{V_1} + \frac{V_3}{V_1} \right) \left(\frac{V_1^2}{V_1^2} - \frac{V_3^2}{V_1^2} \right) \right\} \quad (2.11)$$

Burada $\lambda = \frac{V_3}{V_1}$ yazılarak,

$$C_p = \left\{ \frac{1}{2} (1 + \lambda)(1 - \lambda^2) \right\} \quad (2.12)$$

Eşitlik 2.12 elde edilir. C_p 'ye rotor verimi veya türbin verimi de denir. Maksimum rotor verimini bulmak için bir matematiksel ilke olarak C_p 'nin, λ 'ya göre türevi alınıp sıfıra eşitlenirse; Eşitlik 2.13 elde edilir.

$$0 = 1 - 2\lambda - 3\lambda^2 \quad (2.13)$$

Burada denklemin $\lambda = -1$ ve $\lambda = 1/3$ değerleri için C_p maksimum veya minimum değerlerine ulaşır. C_p değeri, $\lambda = -1$ için $C_p = 0$ ve $\lambda = 1/3$ için $C_p = 0,5926$ değerinde maksimuma değerine ulaşır. Bunun anlamı rüzgarın sahip olduğu enerjinin en fazla % 59,26 kısmı türbinler tarafından insanların kullanımına aktarılacak olmasıdır. Bu değere aynı zamanda Betz limiti denir. Yorum olarak maksimum teorik verim % 59,26 dır. Bu verime “Betz” verimi yada “Betz kanunu” denilmekte olup bu değer pratikte 0,5 civarının altında kalmaktadır [23].

$$E = \frac{1}{2} m V_r^2 \quad (2.14)$$

$$E = \frac{1}{2} \rho A V V_r^2 \quad (2.15)$$

Bir rotor tarafından üretilen gerçek güç, rüzgardan rotora bu enerji aktarımının gerçekleştiği verimlilikle belirlenir. Bu verimlilik genellikle güç katsayısı (C_p) olarak adlandırılır. Böylece, rotorun güç katsayısı, rotor tarafından üretilen gerçek gücün rüzgarda mevcut olan teorik güce oranı olarak tanımlanabilir. Bundan dolayı (C_p);

$$C_p = \frac{2P_T}{\rho_a A_T V^3} \quad (2.16)$$

P_T 'nin türbin tarafından üretilen güç; C_p türbinin güç katsayısı, rotor kanatlarının profili, kanatların düzenlemesi ve ayarlar vb. gibi birçok faktöre bağlıdır. Bir tasarımcı, geniş bir rüzgar hızı aralığında maksimum C_p elde etmek için bu parametreleri optimum seviyesinde sabitlemeye çalışmalıdır [24].

Rotorun yaptığı itme kuvveti (F), Eşitlik 2.17'deki gibi ifade edilebilir.

$$F = \frac{1}{2} \rho A V_r^2 \quad (2.17)$$

Döndürme kuvveti olan, rotor torku (T)

$$T_T = \frac{1}{2} \rho A V_r^2 R \quad (2.18)$$

Eşitlik 2.18 ile verilir, burada R , rotorun yarıçapıdır. Bu maksimum teorik torktur ve pratikte rotor şaftı bu maksimum sınırın sadece bir kısmını geliştirebilir. Rotor tarafından üretilen gerçek tork ile teorik tork arasındaki oran tork katsayısı (C_T) olarak adlandırılır [24].

$$C_T = \frac{2T_T}{\rho A V_r^2 R} \quad (2.19)$$

Bir rotor tarafından belirli bir rüzgar hızında üretilen güç, büyük ölçüde rotor ucu ve rüzgar arasındaki nispi hıza bağlıdır. Örneğin, rotorun çok düşük bir hızda döndüğü ve rüzgarın rotora çok yüksek bir hızla yaklaştığı bir durumu düşünülürse bu koşullar altında, kanatlar, yavaş hareket ettikçe, rotora yaklaşan hava akımının bir kısmı, kanatlar ile etkileşime girmeden ve dolayısıyla enerji transferi olmaksızın içinden geçebilir. Benzer şekilde, rotor hızla dönüyorsa ve rüzgar hızı düşükse, rüzgar akımı türbinden sapabilir ve enerji türbülans ve vorteks boşluğundan dolayı kaybolabilir. Her iki durumda da, rotor ve rüzgar akışı arasındaki etkileşim etkili değildir ve bu nedenle zayıf güç katsayısına neden olur. Rotor ucunun hızı ve rüzgar hızı arasındaki oran, uç hız oranı (λ) olarak adlandırılır ve Eşitlik 2.20 ile hesaplanır [24].

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} = \frac{2\pi NR}{V} \quad (2.20)$$

Burada, Ω açısal hız ve N , rotorun dönme hızıdır. Bir rotorun güç katsayısı ve tork katsayısı, uç hız oranına göre değişir. Optimum enerji transferini yapabilmek maksadıyla güç katsayısının maksimum olduğu belirli bir rotor için (C_p maks) Eşitlik 2.21 ile tanımlanabilir [24].

$$C_p = \frac{2P_T}{\rho A V_r^3} = \frac{2T_T \Omega}{\rho A V_r^3} \quad (2.21)$$

Güç katsayısı ve uç hız oranı arasındaki ilişki incelendiğinde bu iki terimi, Eşitlik 2.21 ile Eşitlik 2.19 eşitlikleri oranlanırsa, Eşitlik 2.22 eşitliğine yani uç hız oranına ulaşılır.

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} = \frac{C_p}{C_T} \quad (2.22)$$

Böylece, uç hızı oranı, rotorun güç katsayısı ve tork katsayısı arasındaki oran ile verilebilir.

2.1.2. Rüzgar Hızının Yükseklikle Değişiminin Enerji Üretimine Etkisi

Meteorolojik veriler gösteriyor ki herhangi bir yükseklikteki hız ile diğer bir yükseklikteki hız farklıdır. Yer yüzeyine yaklaştıkça rüzgarın hızı azalmaktadır. Bu olay genelde rüzgar kesme olarak adlandırılır ve rotor tasarımında kullanılır. Yerden 5 km yükseklikte ise rüzgar hızı artık yüzey şekilleri ve hareketlerinden etkilenmemektedir (Şekil 2.8) [25].

Sahadaki rüzgar hızı ölçümleri tamamlandıktan sonra göbek yüksekliği ortalama rüzgar hızı, Eşitlik 2.23 ile $\bar{V}_{LT}$ (Uzun süreli hız ölçüm ortalaması) kullanılarak hesaplanır.

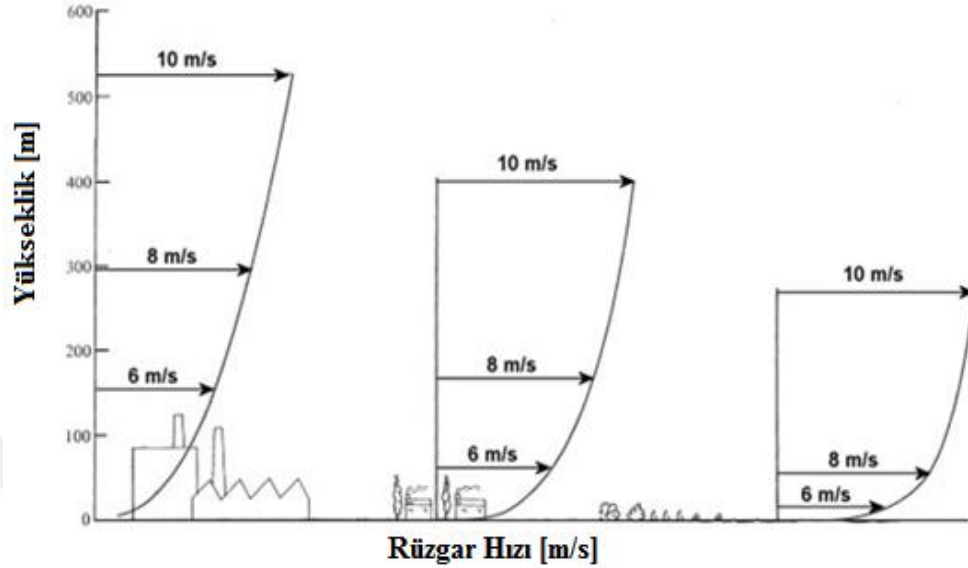
$$\bar{V}_{LT_hub} = \bar{V}_{LT} \left(\frac{h_3}{h_2} \right)^\alpha \quad (2.23)$$

Burada h_1 ve h_2 yüksekliklerinde yapılan hız ölçümleri ile pürüzlülük katsayısı (Helman yükseltme katsayısı) α Eşitlik 2.24 ile bulunup Eşitlik 2.23'te yerine konulursa Eşitlik 2.25 elde edilir.

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{\bar{V}_{M2}}{\bar{V}_{M1}}\right)}{\ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right)} \quad (2.24)$$

$$\bar{V}_{LT_hub} = \bar{V}_{LT} \left(\frac{h_3}{h_2} \right)^{\left(\frac{\ln\left(\frac{\bar{V}_{M2}}{\bar{V}_{M1}}\right)}{\ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right)} \right)} \quad (2.25)$$

Buradan Eşitlik 2.25 ile elde edilen hub yüksekliğindeki hızlar türbin gücü hesaplamalarında kullanılır.



Şekil 2.8. Rüzgar hızının yükseklikle değişimi.

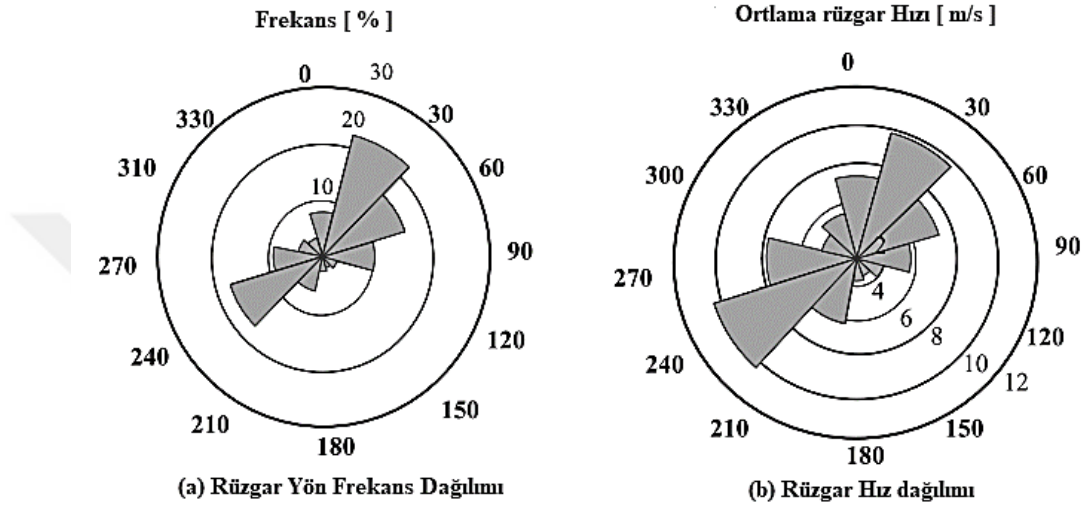
2.1.3. Rüzgar EsmeYönünün Enerji Üretimine Etkisi

Rüzgar yönlerinin ve hızlarının meteorolojik olarak gözlenmesine dayanan, rüzgar hız frekansı dağılımlarını ve rüzgar yönlerinin frekansını gösteren hakim rüzgar yönünü belirten rüzgar gülü grafikleri yapılır (Şekil 2.9). Bu grafikler, ölçüm istasyonu ve türbinlerin yerleşiminde önemlidir [26].

Rüzgârlar estikleri yöne göre isimlendirilir ve misal “Rüzgâr 45°’den” ifadesi, genel olarak coğrafik yön anlamında 45°’den 225°’ye doğru esen, doğrusal bir yön kastedilmektedir. Rüzgâr karakteri ve çevre etkilerinden dolayı ölçümlenmiş gibi doğrusal olarak tek bir yönden esmez. Bundan dolayı 30° derecelik 12 sektör veya 22,5° derecelik 16 sektör ismi kullanılarak hakim rüzgar yönleri ifade edilmektedir. Yani “Rüzgârın hakim yönü NE’den” açıklaması, coğrafik yön olarak 45°’den 225°’ye doğru esen rüzgârı kastetmektedir. Çizelge 2.3’te yönlerin ingilizce isimlerinin baş harfleri ve açıl değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.3. Rüzgar yönleri ve isimleri (Açısal değerleri).

Ana Yönler		Ara Yönler		Tali Yönler			
N (Kuzey)	000,0	NE	045,0	NNE	022,5	ENE	067,5
E (Doğu)	090,0	SE	135,0	ESE	112,5	SSE	157,5
S (Güney)	180,0	SW	225,0	SSW	202,5	WSW	247,5
W (Batı)	270,0	NW	315,0	WNW	292,5	NNW	337,5



Şekil 2.9. Rüzgar gülü grafikleri a) Rüzgar frekans gülü, b) Rüzgar hızı gülü.

Rüzgar hızı persistansı, bir istasyonun verilen bir zaman periyodu içerisindeki rüzgar hızının sürekliliği veya daimiliğinin bir ölçütü olarak bilinmektedir. Rüzgar hızı persistansının bulunurken atmosferin dağıtıcı olma düzeyi araştırılmaktadır [16]. Bu nedenle enerji potansiyeli hakkında bilgi vermesi açısından önemlidir [27].

Otokorelasyon analizinin uygulanabilmesi öncelikli olarak verilerin normal dağılıma sahip olması gerekmektedir. Verilerin şartı sağlamaması durumunda, hesaplanan otokorelasyon katsayıları dağılımın çarpıklığı ile ilişkili olarak hatalı tahmin edilebilir. Bu yöntemlere ek olarak rüzgar şiddetiyle birlikte yön verilerini de göz önünde bulunduran Lambert formülü, rüzgar hızını vektörel bir büyüklük olarak kullanarak istenen gözlem istasyonu için ortalama rüzgar şiddetini verir. Özet olarak Lambert formülü rüzgar hızının vektörel ortalamasını hesaplayan bir metottur [28].

2.1.4. Hava Yoğunluğu ve Sıcaklığının Enerji Üretimine Etkisi

Rüzgardan elde edilen güç rotordan geçen havanın yoğunluğuyla doğru orantılıdır (Eşitlik 2.26). Havanın yoğunluğu ise idealgaz kanununa (Eşitlik 2.27) göre basınç ile doğru ve sıcaklık ile ters orantılıdır (Eşitlik 2.30). Basınç ise rakım arttıkça azalmaktadır (Eşitlik 2.31). Dolayısıyla deniz seviyesine yakın ve sıcaklığı düşük bölgelerde enerji üretimi daha verimlidir.

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_r^3 \quad (2.26)$$

Rüzgâr enerjisi hesaplamalarında genellikle hava yoğunluğu $1,225 \text{ kg/m}^3$ kabul edilir, yani havanın 15° C sıcaklık ve 1 atm basınçta olduğu varsayımı ile işlemler yapılır. Farklı hava koşulları için hava yoğunluğu “ideal gaz kanunundan” Eşitlik 2.30 kullanılarak hesaplamalar yapılabilir [29].

$$PV = nR_u T \quad (2.27)$$

Eşitlik 2.27 ifadesinden hacim çekilerek, Eşitlik 2.28 Eşitliğinde yerine konulursa Eşitlik 2.29 elde edilir. Burada R_u : ideal gaz sabiti, n : molarite ; T sıcaklık, P basıncı ve V hacmi temsil etmektedir.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.28)$$

$$\rho_a = \frac{mP}{R_u T} \quad (2.29)$$

Değişik hava koşulları ve sıcaklık şartları için hava yoğunluğu Eşitlik 2.30 ile hesaplanabilir. Eşitlik 2.30’u elde etmek için Eşitlik 2.31 ile Eşitlik 2.40 arasındaki bu elde etme işlemleri incelenebilir [29].

$$\rho = \frac{353,049}{T} e^{\left(\frac{-0,034 \cdot Z}{T}\right)} \quad (2.30)$$

Eşitlik 2.29 daki basınç değerini ideal gaz eşitlikleri ve havanın moleküler ağırlığı, ideal gaz sabiti gibi sabitleri yerine konularak ve gerekli işlemler ile Eşitlik 2.40'a ulaşılır.

$$P(z + dz) - P(z) = -g\rho dz \quad (2.31)$$

$$dP = -g\rho dz \quad (2.32)$$

Burada $\rho = \frac{P \cdot MA_{hava} \cdot 10^{-3}}{R \cdot T}$, eşitliği Eşitlik 2.32 de ρ yerine yazılırsa;

$$dP = g \cdot \frac{P \cdot MA_{hava} \cdot 10^{-3}}{R \cdot T} \cdot dz \quad (2.33)$$

Eşitlik 2.33 elde edilir. Buradan da,

$$\frac{dP}{P} = \frac{g \cdot MA_{hava} \cdot 10^{-3}}{R \cdot T} \cdot dz \quad (2.34)$$

Eşitlik 2.34 bağıntısına ulaşılır. Her iki tarafın integrali alınırsa; aradaki diğer işlemler yapılarak Eşitlik 2.41 elde edilir.

$$\int \frac{dP}{P} = \int \frac{g \cdot MA_{hava} \cdot 10^{-3}}{R \cdot T} \cdot dz \quad (2.35)$$

$$\ln P = \frac{g \cdot MA_{hava} \cdot 10^{-3}}{R \cdot T} \cdot z + c, \quad (c = \ln P_0) \quad (2.36)$$

$$\ln P - \ln P_0 = \frac{g \cdot MA_{hava} \cdot 10^{-3}}{R \cdot T} \cdot z \quad (2.37)$$

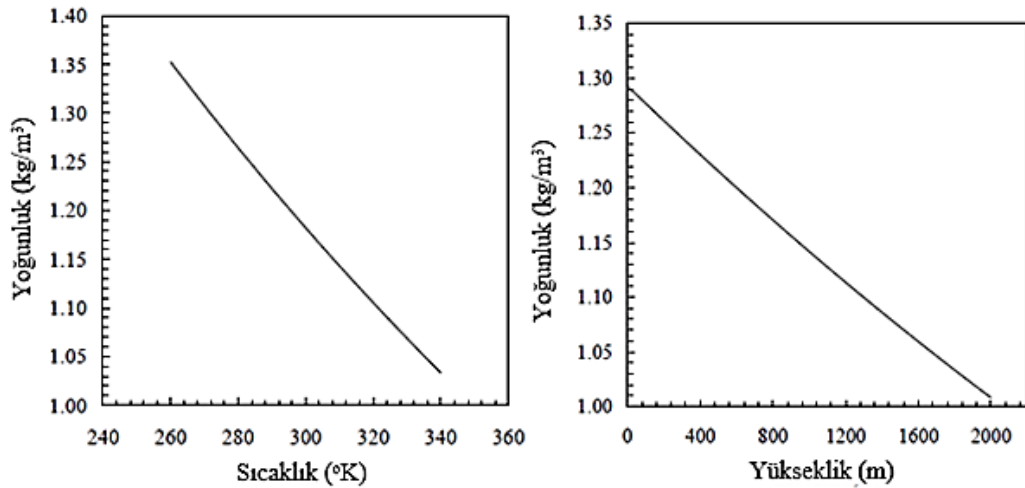
$$\ln \frac{P}{P_0} = \frac{9,806(\frac{m}{s^2}) \cdot 28,97(\frac{g}{mol}) \cdot 10^{-3}(\frac{kg}{g})}{8,2056 \cdot 10^{-5} \cdot T(K)} \cdot z(m) \quad (2.38)$$

$$\ln \frac{P}{P_0} = \frac{9,806 \left(\frac{m}{s^2} \right) \cdot 28,97 \left(\frac{g}{mol} \right) \cdot 10^{-3} \left(\frac{kg}{g} \right)}{8,2056 \cdot 10^{-5} \cdot 288,15 K} \cdot z(m) \quad (2.39)$$

$$P = P_0 \cdot \exp(-1,18575 \cdot 10^{-4} \cdot z), \quad (P_0 = 1 \text{ atm}) \quad (2.40)$$

$$P = P_0 \cdot e^{-1,18575 \cdot 10^{-4} \cdot z} \quad (2.41)$$

Farklı durumlar için hava yoğunluğunun yükseklik ve sıcaklığa göre değişimleri grafiksel olarak Şekil 2.10 da verilmiştir [28].



Şekil 2.10. Hava yoğunluğunun sıcaklık ve yükseklikle değişim grafikleri.

2.1.5. Yerel Coğrafi Şartların Rüzgar Enerjisi Üretimine Etkisi

Coğrafik olarak farklı yerlerin: farklı dağ, ova dağılımı; farklı bitkisel örtü, ağaç, orman vb. yada farklı bina/lar dağılımına sahip olması doğaldır. Coğrafi bir yerin yüzey pürüzlülüğü, pürüzlülük sınıfı veya pürüzlülük uzunluğu olarak ifade edilen, birimi metre olan ve z_0 simgesi ile gösterilen bir büyüklüktür. Pürüzlülük uzunluğu, rüzgar enerjisi ile ilgili bir terim olarak, rüzgâr hızının teorik olarak sıfır olması gereken zeminden yukarı doğru olan mesafede rüzgar hızının değişimine etkisi olarak tanımlanabilir. Pürüzlülük sınıfı ise belli oranda benzerlik gösteren alanların bir aralıktaki pürüzlülük uzunlukları için yapılan sınıflandırmayı ifade edmektedir (Şekil

2.8). Ormanlar ve şehirlerde rüzgâr rüzgâr hızındaki azalma çok iken, asfalt yollar, havaalanları, su yüzeyleri gibi düzgün yüzeye sahip olan yerlerde daha azdır (Çizelge 2.4). Su yüzeyinin pürüzlülüğü asfalt bir yüzeyden daha azdır [30].

Yüzey pürüzlülüğü (bazen yüzey pürüzlülüğü uzunluğu veya sadece pürüzlülük uzunluğu olarak adlandırılır), rüzgar hızının yerden yükseklik ile değişen, hızın bir ölçüsüdür. Logaritmik yasada, rüzgar hızının aşağıdaki Eşitlik 2.42 veya Eşitlik 2.43'e göre zemin yüksekliğiyle logaritmik olarak değiştiğini ifade eden bir parametredir.

$$V(z) = \begin{cases} \frac{V}{K} \cdot \ln(z / z_0), & z > z_0 \\ 0, & z_0 > z \end{cases} \quad (K: \text{Von Karman sabiti } 0,4) \quad (2.42)$$

$$V(z) = V(Z_R) \left[\frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_R}{z_0}\right)} \right] \quad (2.43)$$

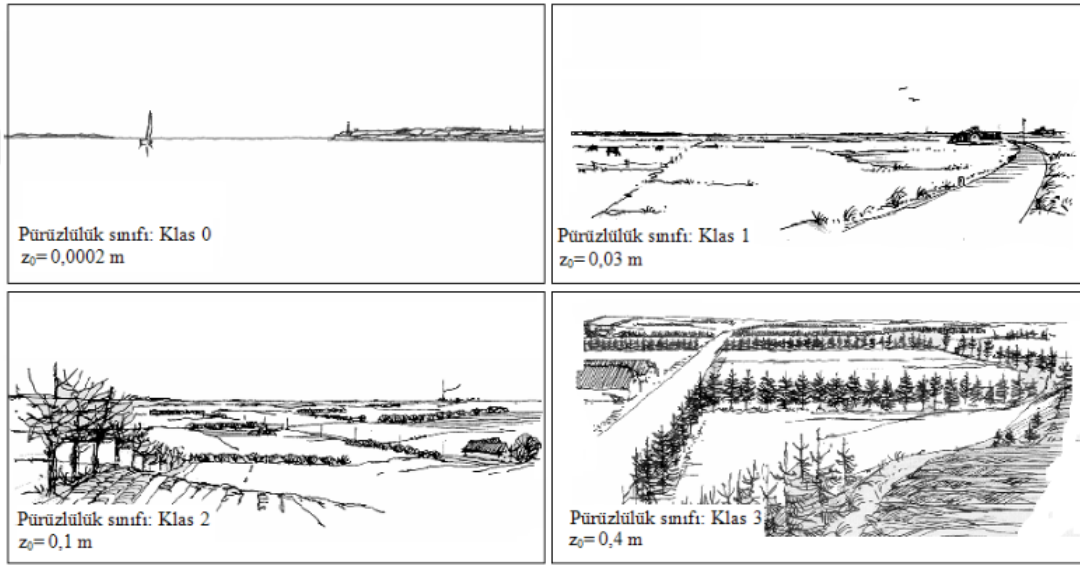
Yukarıdaki eşitliklerde; κ Von Karman sabiti (0,4), z_0 :zemine ait pürüzlülük uzunluğu, Z_R referans ölçüm yüksekliği Z ise rüzgar hızı bilinmek istenen yüksekliği ve V rüzgar hızını temsil etmektedir.

Çeşitli zemin pürüzlülüğüne ait rüzgar hızı-yükseklik profilleri Şekil 2.11'de görülebilmektedir [29]. Burada önemli olan, pürüzlülük uzunluğu büyük olan bölgelerde rüzgarın belirli bir hıza ulaşması çok daha yüksekte olurken, pürüzlülük uzunluğu küçük bölgelerde rüzgar hızı daha düşük yüksekliklerde olmaktadır. Rüzgar türbini yerleşiminde dikkate alınan en önemli faktörlerdir [24].

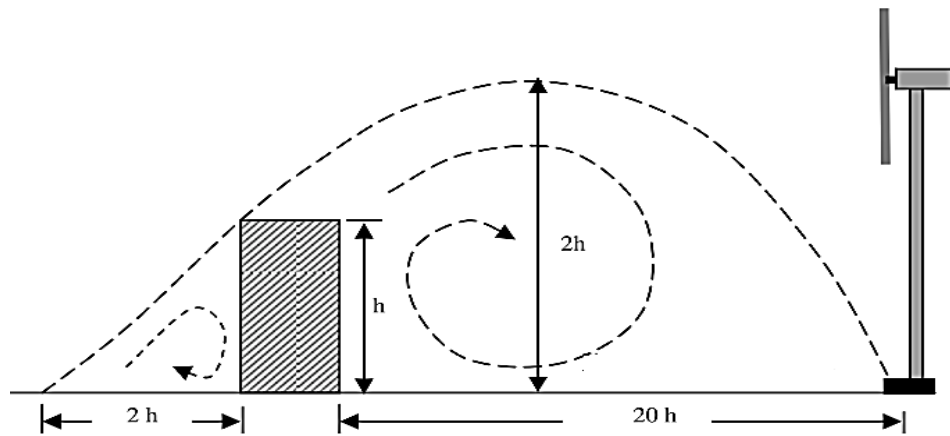
Rüzgarın hızı ve yönü, sert yüzeylerden ve bina, ağaç ve kaya gibi engellerden geçerken hızla değişir. Bu, akışta oluşan türbülansın etkisi yaklaşık uzunluk olarak Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Akıştaki türbülansın varlığı sadece akımda mevcut olan gücü azaltmaz, aynı zamanda türbin üzerindeki yorgunluk yüklerini de artırabilmektedir [24].

Diğer topoğrafik etkiler ise tünel etkisi ve tepe etkisidir. Tünel etkisine dağlık bölgelerde ve derin vadilerde rastlanır; iki tepe arasında ya da vadinin iki yamacının arasında sıkışan rüzgar, yüksek basınçtan alçak basınca doğru hızlanarak ilerler. Bu

durumda sıcaklık farkının da etkisi vardır. Tepe etkisinde ise hava akımı tepeyle karşılaştığında sıkışma gerçekleşir, tepenin üstüne ve ardına geçtiğinde tekrar düşük basınç alanında genişler. Basınç yüksekliğinde düşüş hız yüksekliğinde bir artışa sebebiyet verir ve dolayısıyla rüzgar hızı artar. Her iki etkide de rüzgar hızları artmaktadır; bu üretilen enerjiyi artırır fakat iki durumda da türbülans oluşmaktadır. Türbülans türbin üzerine ek yükler getirerek ömrünü kısaltmakta ve işletim sırasında arızalara sebep olabilmektedir.



Şekil 2.11. Bazı alanların pürüzlülük sınıfı ve pürüzlülük uzunluğu değerleri.



Şekil 2.12. Engelin rüzgar profiline yatay ve dikey etkisi.

Çizelge 2.4. Çeşitli alanların pürüzlülük sınıfları ve pürüzlülük uzunlukları.

Zemin	Pürüzlülük Sınıf	Pürüzlülük Uzunluğu (m)
Su yüzeyi	0	0,0002
Su ve toprak parçası karışımı düz alanlar	0,5	0,0024
Çitle çevirilmemiş,binaları dağınık vaziyette açık çiftlik alanı	1	0,03
8 m yüksekliğinde binalara ve 1250 m2 yüzölçümüne sahip etrafı çitle çevrilmiş çiftlik alanı	1,5	0,055
8m yüksekliğinde binalara ve 800 m2 yüzölçümüne sahip etrafı çitle çevrilmiş çiftlik alanı	2	0,1
Yoğun bitki örtüsüne sahip çiftlik alanı	2,5	0,2
Köy,kasaba,orman	3	0,4
Büyük kasbalar,şehirler	3,5	0,8
Yüksek binalara sahip büyük şehirler	4	1,6

2.1.6. Rüzgar Türbinlerinin Enerji Üretimine Etkisi

Rüzgar türbini performansı ve piyasadaki satılan rüzgar türbinine ait algoritma tabanlı çeşitli matematiksel modellerin karşılaştırılması önemlidir [31]. Anlık ulaşılabilir rüzgar gücü Eşitlik 2.26 bağıntısıyla ifade edilirken, anlık teorik maksimum türbin gücü ise Eşitlik 2.44 bağıntısıyla verilmektedir [32].

$$P_m = C_p P_w \quad (W) \quad (2.44)$$

Türbin mekanik verimi η_m , ve jeneratör verimi η_g , türbin güç faktörü C_p olmak üzere,

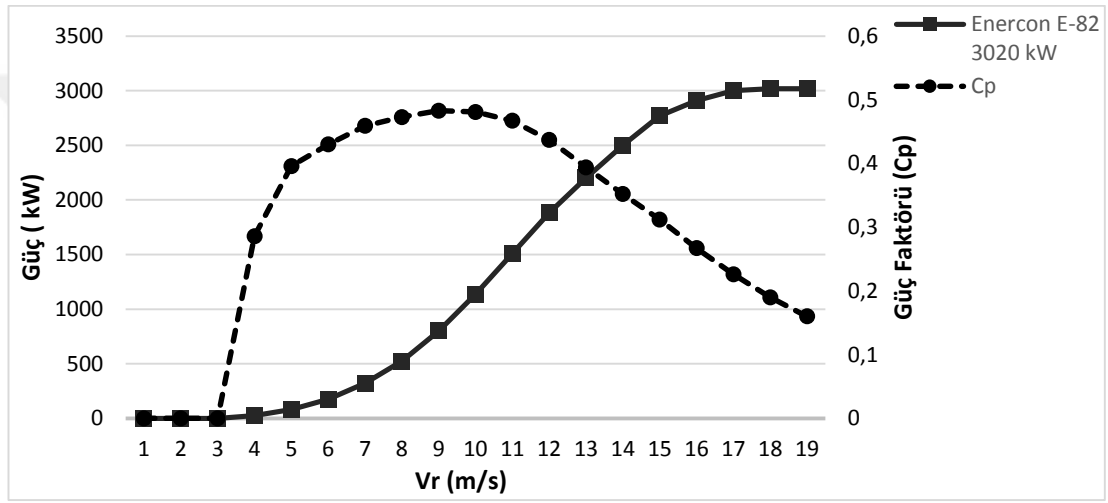
$$P_t = \eta_m P_m \quad (W) \quad (2.45)$$

$$P_e = \eta_g P_t \quad (W) \quad (2.46)$$

$$P_w = (C_p \eta_m \eta_g) P_w \quad (W) \quad (2.47)$$

Eşitlik 2.44 ile rüzgardan elde edilen güç elde edilir. Eşitlik 2.47'deki parantez içi genel verim η_0 olmak üzere, türbinin üreteceği elektrik gücü Eşitlik 2.48 ile hesaplanır. Örnek olması açısından Enercon firmasının 82 m rotor çapına sahip 3 MW nominal güç üretebilen E-82 modelinin, rüzgar hız sınıflarına bağlı fabrika güç çıkış değerleri ve güç faktörü değerleri Şekil 2.13 ile verilmiştir [33].

$$P_e = \eta_0 P_w \text{ (W)} \quad (2.48)$$



Şekil 2.13. Enercon E-82 model türbininin güç eğrisi ve güç faktörü değerleri.

$$P = \int_0^{\infty} P(v) \cdot f(v) dv \quad (2.49)$$

$$P_m = \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{2} \rho v_j^3 \cdot f(v_j) \right) \quad (2.50)$$

Rüzgar türbini güç eğrisi, rüzgar hızının bir fonksiyonu olarak 1 m / s'lik artışlarla 0 m/s'den 25 m/s'ye kadar türbinin üreteceği güçlerin fabrikasyon değerlerini verir. Enerji eğrisindeki her hız için rüzgar hızını dağılım yüzdesi ($P(v)$) ve türbin gücü çarpılarak Eşitlik 2.51 ile yıllık üretilen enerji E_v hesaplanır.

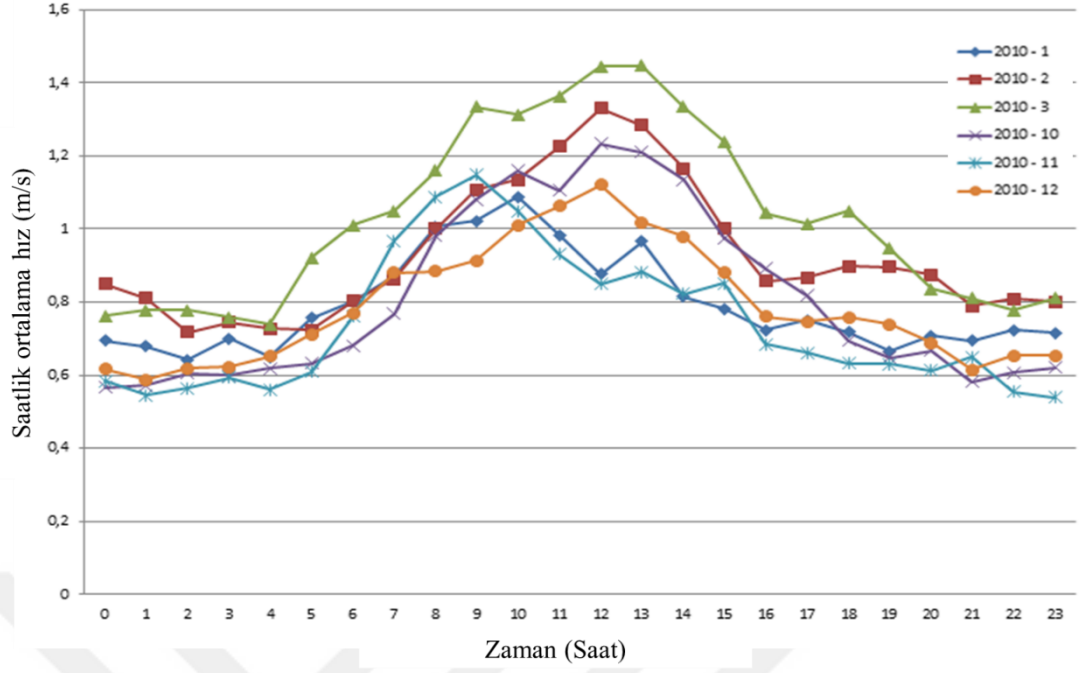
$$E_v = 8760 \sum_{v=0}^{25} P_{tv} \cdot P(v) \quad (2.51)$$

2.1.7. Rüzgar Hızı Esme Süresi ve Zamanın Enerji Üretimine Etkisi

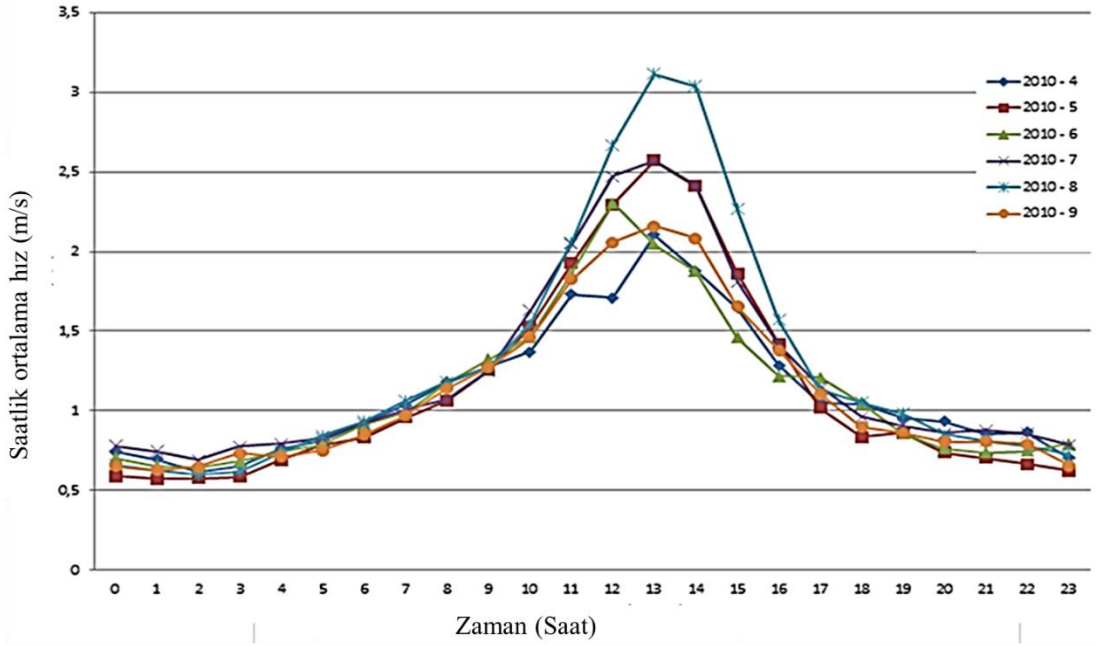
Rüzgar coğrafi konum ile koşullarla ve zamanla değişim gösteren bir enerji kaynağıdır. Yerel değişimler lokal coğrafi şartlara bağlıdır. Rüzgar enerjisi projelerinde rüzgar türbininin yerleşim çalışmalarında proje sahasının tasarım ve planlamasında rüzgarın karakteristikleri ve belirlenen karakteristiklerin zaman içindeki dağılım ve değişiminin büyük bir özenle ortaya konması çok önemlidir. Genellikle herhangi bir yerde, rüzgarın zamandaki değişimi, yıllar arası, yıllık, günlük ve kısa periyotlu olmak üzere dört farklı katagoride incelenebilir [34].

Rüzgarın günlük gözlemlerindeki değişimler; yıllara, mevsimlere, günlere hatta saatlere göre özellikle rüzgarlı bölgelerde enerji üretimi ve yatırımı açısından önemlidir. Burada mevsimlik saatlik ortalamaya bağlı değişimi daha iyi anlamak için Şekil 2.14, Şekil 2.15; günlük değişimin ay ve yıl içindeki durumunu görmek için de Şekil 2.16, Şekil 2.17, Şekil 2.18 incelenmelidir. Rüzgar hızının mevsimsel, günlük, hatta saatlik değişimleri ve rüzgar gücü, rüzgar türbininin kurulmasına karar vermeden önce dikkatle analiz edilmelidir [34].

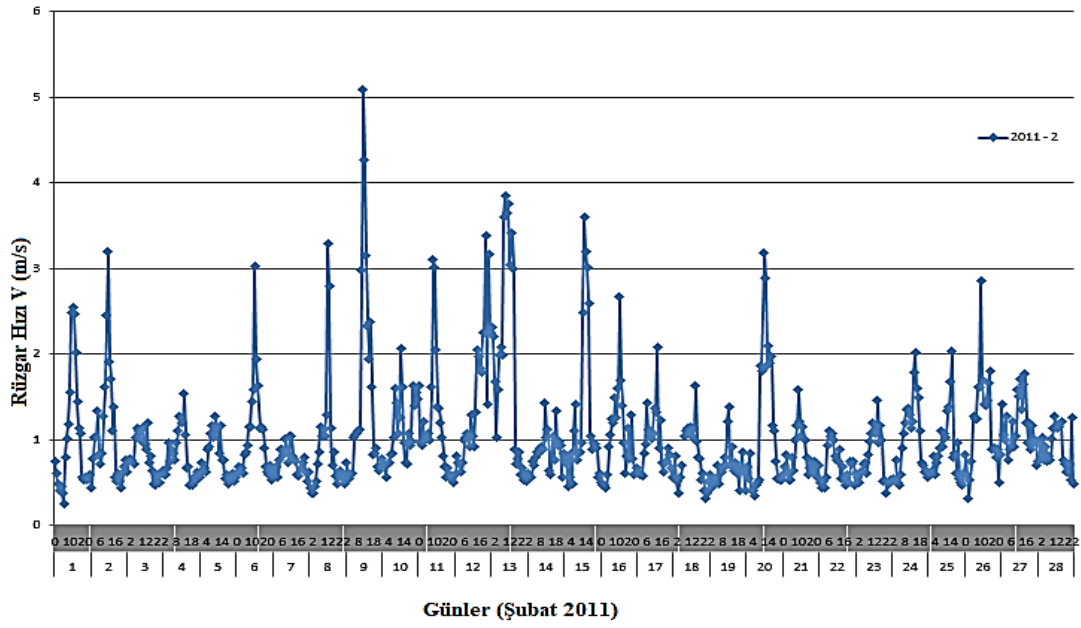
Dünya yüzeyinin farklı ısınmasından dolayı günlük rüzgar hız değişimleri oluşmaktadır. Genellikle, gece yarısından güneşin doğma saatine kadar olan süre boyunca rüzgar hızı minimum değerlerde iken, gün boyunca yazın karasal bölgelerde rüzgar hızında artışlar olmaktadır. Günlük değişim saatlik bazda incelendiğinde, yer yüzeyinden daha yükseklerle çıkıldığında rüzgar hızı farklı olabilir. Rüzgarın hızının gün içindeki davranışını incelemek yatırım bölgeleri için önemlidir (Şekil 1718) [34].



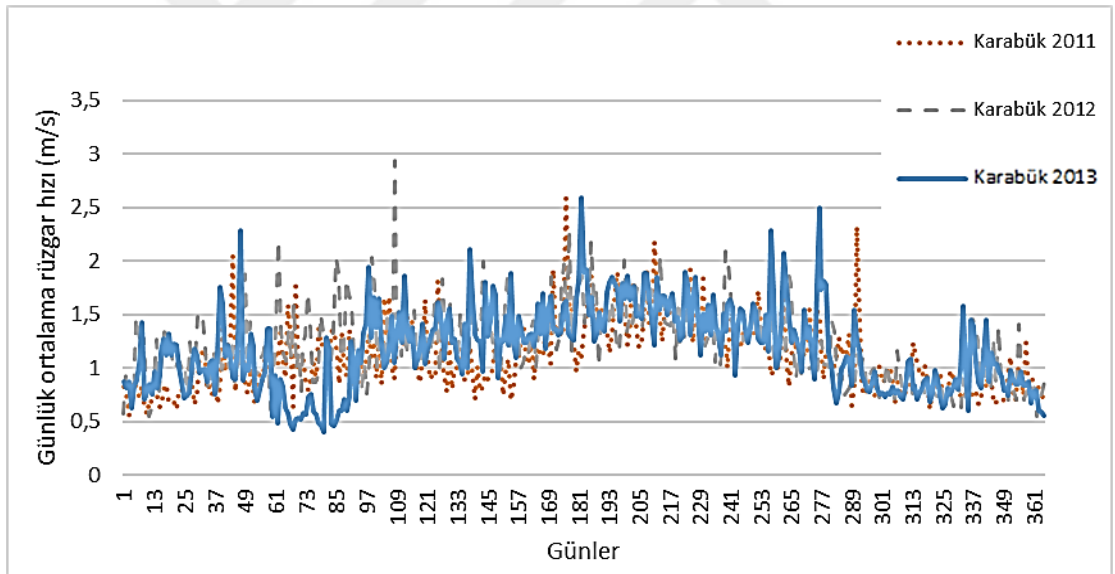
Şekil 2.14. Karabük 2010, 6 aylık kış dönemi 24 saatlik ortalama hız değişimi.



Şekil 2.15. Karabük 2010, 6 aylık yaz dönemi 24 saatlik ortalama hız değişimi.

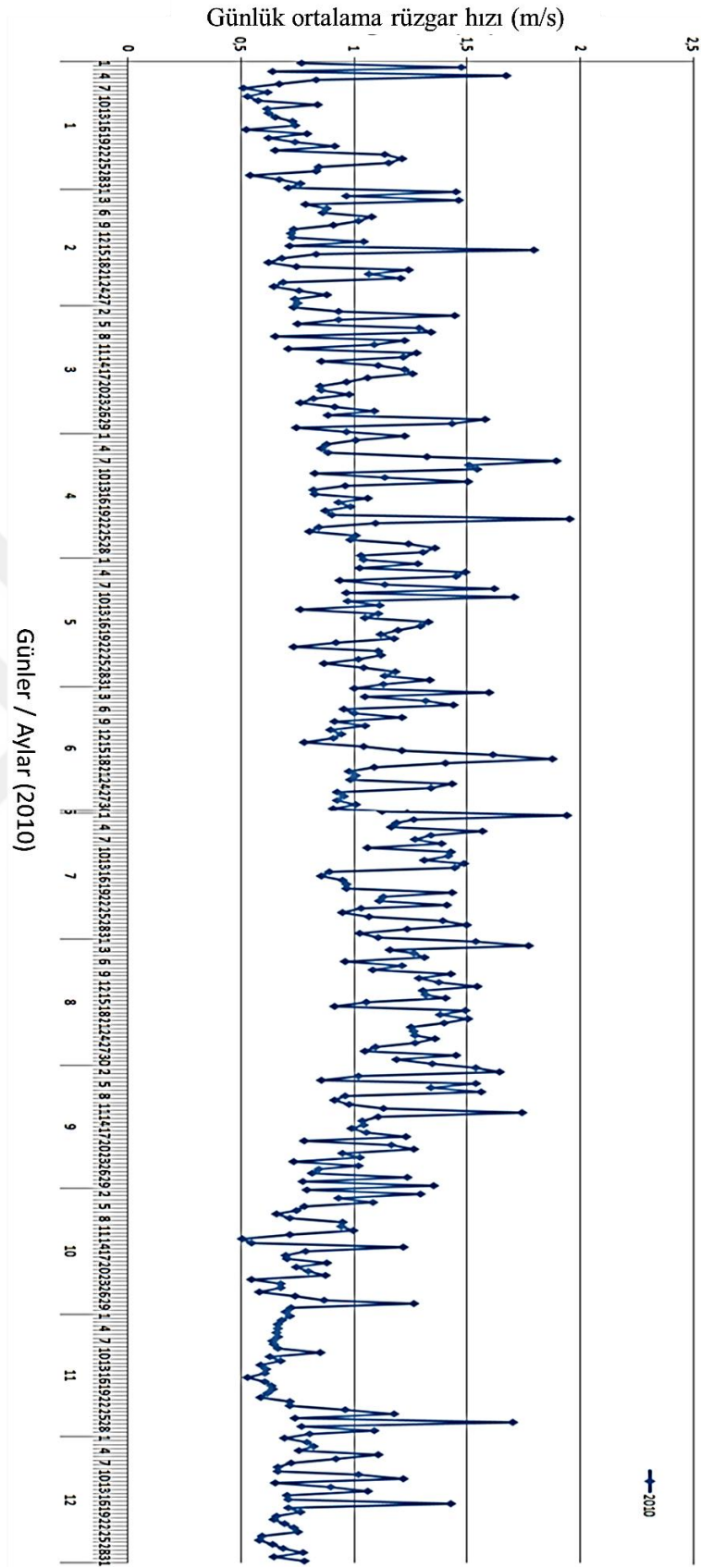


Şekil 2.16. Karabük 2011 Şubat ayı günlük ortalama olarak hız değişimi.



Şekil 2.17. Karabük 2011-2012-2013 yılı günlük ortalama rüzgar hız değişimi.

Günlük rüzgar çevriminin temel özellikleri enaz bir yıllık gözlem verileri ile tanımlanabilirse de, günlük dalgalanmalar ve gün içi en yüksek rüzgar hızının olduğu zaman vb. daha detaylı karakteristikler belirlenemeyebilir. Rüzgar hızının mevsimsel, günlük ve saatlik değişimleri ve rüzgar gücü, rüzgar türbini veya rüzgar çiftliği kurulumunda, karar vermeden önce dikkat bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir [34].



Şekil 2.18. Karabük 2010 yılı 365 günün, günlük ortalama hız değişimleri.

2.2. RÜZGAR İSTATİSTİĞİ

Bu bölümde rüzgar kaynağı raporlarında sunulan özet istatistiklerin nasıl hesaplandığı ve hangi istatistiklerin yer aldığı özet olarak sunulmaktadır. Bu istatistikler veya bunların bazı alt kümeleri, aylık veya üç aylık dönemler gibi düzenli aralıklarla ve ayrıca izleme programının sonunda veya ölçümler sonunda oluşturulabilir. Bu istatistiklerin listesi Çizelge 2.5’de verilmiştir [35].

Çizelge 2.5. Rüzgar kaynağı örneklemi raporu temel istatistikleri.

Rapor Ürünleri	Birimi
Veri Ölçüm Oranı / Veri tamamlama oranı	%
Ortalama ve Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı	m/s
Ortalama rüzgar gücü yoğunluğu	W/m ²
Rüzgar Yükseltme (Pürüzlülük/Hellman) Katsayısı	birimsiz
Türbülans yoğunluğu	%
Ortalama hava sıcaklığı	°C
Ortalama hava yoğunluğu	Kg/m ³
Hız Frekans Dağılımı	Histogram Grafiği
Weibull c ve k parametreleri	m/s (c) ve brimsiz (k)
Rüzgar gülü	Grafik
Günlük ve Saatlik Hız Dağılımları	Grafik

2.2.1. Tanımlayıcı Rüzgar İstatistikleri

Merkezi eğilim, merkezi bir değere yaklaşan bir veri kümesinin eğilimi anlamına gelir. Merkezi eğilimi tanımlamak için kullanılan istatistikler, bir veri dizisinin temsili değerini veya merkez değerini yansıtır. Bir veri dizisinin ortalaması, genellikle aşağıdaki gibi hesaplanan ve merkezi eğilimi tanımlamak için kullan bir terimdir.

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (2.52)$$

Burada $\bar{V}$; ortalama hız değeri, V_i ; veri dizisinin bir değeri ve n ; bu veri dizisinde yer alan verilerin sayısıdır. Ortalama değere göre veri dizisinin yayılma derecesi, aşağıdaki gibi ifade edilen standart sapma (σ) değeri ile tarif edilebilir.

$$\sigma = \text{Standart Sapma} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2} \quad (2.53)$$

Verilerin özelliklerini daha iyi kavramak için verilerin dağılım modeli de araştırılmalıdır. Dağılım şekli genellikle iki istatistikle araştırılabilir. Çarpıklık katsayısı (Çk:Skewness) ve Basıklık-Sivrilik katsayısı (BSk:Kurtosis) bir veri setinin normal dağılımını kontrol için birer ölçüttür ve hesaplamaları aşağıdaki Eşitlik 2.54 ve Eşitlik 2.55 ile yapılmaktadır [36].

$$\text{Çk} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(V_i - \bar{V})^3}{\sigma^3} \quad (2.54)$$

$$\text{BSk} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(V_i - \bar{V})^4}{\sigma^4} - 3 \quad (2.55)$$

2.2.2. Rüzgar Hızının Değişkenlik Ölçüsü; Türbülans Yoğunluğu

Rüzgar türbinlerinin ömrünü etkileyen faktörlerden biri türbülans yoğunluğudur. Türbülans, ortalamadan olan sapmaları düzeyini ifade etmektedir. Tanım olarak en basit yöntemle ölçülen, aynı periyottaki, rüzgar hızlarının standart sapmasının ortalama rüzgar şiddetinin değerine bölünmesiyle elde edilir. Türbülans yoğunluğu aşağıdaki Eşitlikle hesaplanabilir [37].

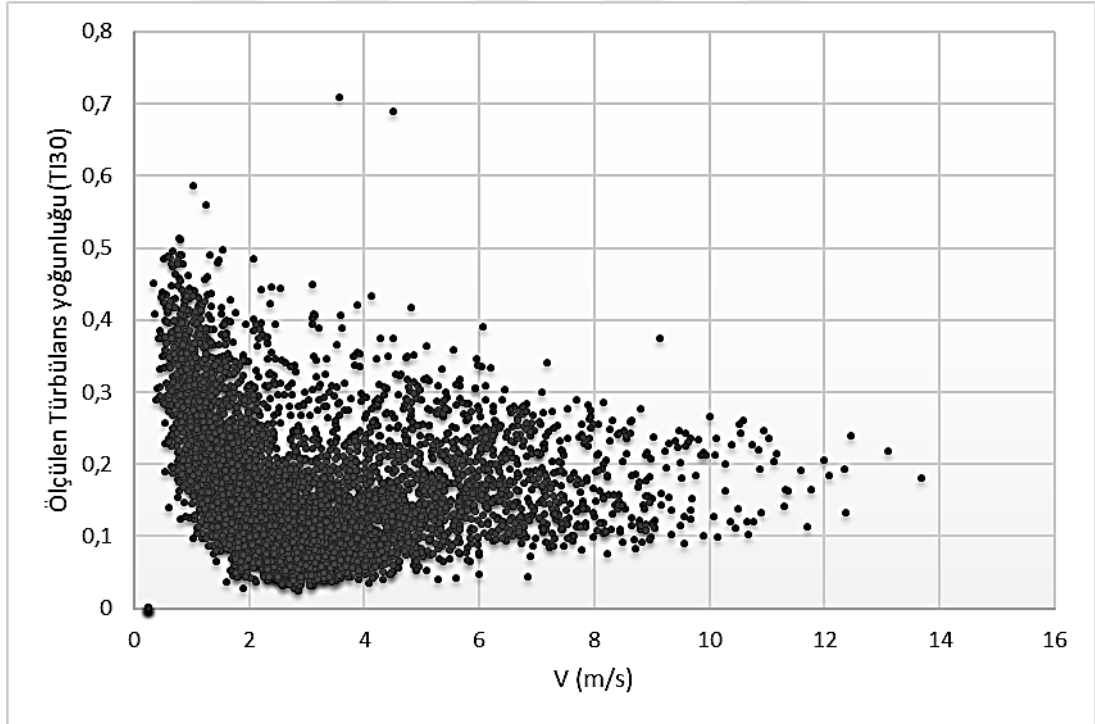
$$TI = \frac{\sigma}{\bar{v}} \quad (2.56)$$

Burada σ , her zaman adımında rüzgar hızı standart sapmasıdır, $\bar{v}$ ortalama rüzgar hızıdır. Türbülans yoğunluğu rüzgar hızı arttıkça azalır benzer şekilde yer seviyesinden olan yüksekliğin artması ile rüzgar hızı artarken türbülans yoğunluğu azalmaktadır [38].

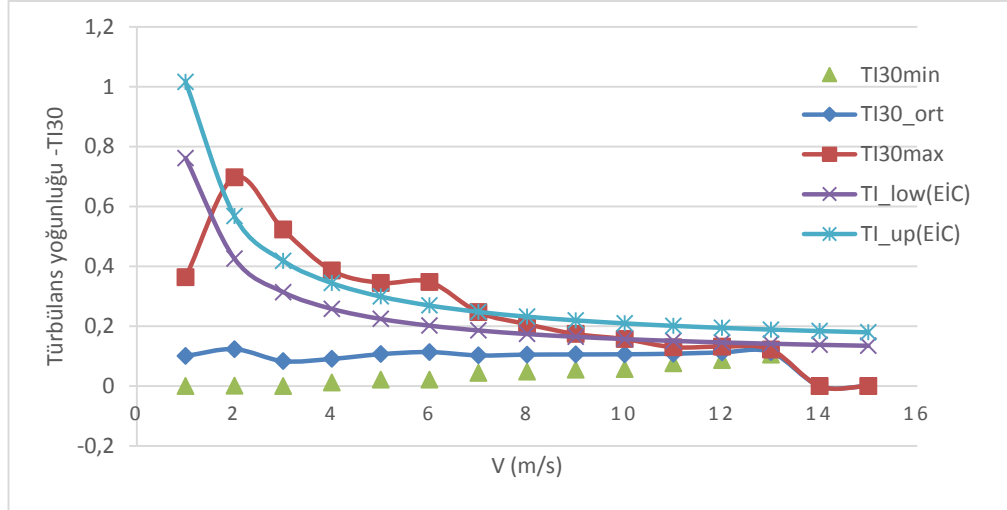
Tasarım türbülansı tahminleri (International Electrotechnical Commission: İEC, Uluslararası Elektroteknik Komisyonu) IEC 61400-1: 2005 (Baskı 3) tasarım standardına göre üretilebilir. İzin verilen maksimum türbülans türbin sınıfına göre tanımlanır. Türbin göbek (Hub) yüksekliğindeki türbülans yoğunluğu için beklenen değer 10 dakikalık ortalama rüzgar hızında 15 m / s ve türbülans standart sapması σ_1 Eşitlik 2.57 ile hesaplanır [39]:

$$\sigma_1(V_{hub}) = I_{ref}(0,75 \cdot V_{hub} + b) \quad (2.57)$$

Bu durumda, boylamasına rüzgar hızı bileşeninin standart sapmasının temsili değeri olarak adlandırılır. Eşitlik 2.57'deki simgeler; I_{ref} , 15 m/s 'deki türbülans yoğunluğunun ortalama değeri, b :5,6 m / s ve V_{hub} : Türbin göbek yüksekliğindeki m/s cinsinden rüzgar hızıdır.



Şekil 2.19. Karabük Kahyalar gözlemlenen türbülans yoğunluğu grafiği.



Şekil 2.20. Karabük Kahyalar hesaplanan türbülans yoğunluğu grafiği.

Eşitlik 2.57’de I_{ref} parametresi, standart olarak türbin sınıfının türbülans seviyesine göre belirtilmiştir. Hesaplamalarda türbülans yoğunluğunun alt limit değeri için 0,12 ve ortalama türbülans için 0,14 ve de üst limit türbülans hesabı için 0,16’dır [39]. Karabük Kahyalar gözlemlenen rüzgar verileri türbülans yoğunluğu Şekil 2.19’da ve hesaplanan limitleri grafiği Şekil 2.20’de verilmiştir.

2.2.3. Rüzgar Karakteristiği ve Rüzgar Hızlarının Olasılıksal Dağılımları

Rüzgar gözlem verilerinin analizinde, Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu ile şekil parametresi k ve ölçek parametresi c kullanılarak herhangi bir rüzgâr hızının frekansını tahmin etmek mümkündür. Weibull olasılık yoğunluğu fonksiyonu aşağıdaki Eşitlik 2.58 ile verilmektedir [40].

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.58)$$

Weibull olasılık fonksiyonunun birikimli dağılım fonksiyonu aşağıdaki Eşitlik 2.59 ile tanımlanmaktadır.

$$F(v) = \int_{-\infty}^v f(x) dx = \int_0^v \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^k} dx = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.59)$$

Weibul dağılımına bağlı olarak, k ve c parametreleri ile, $\Gamma()$ Gama fonksiyonu olmak üzere, aşağıda elde edilen formüller ile, $\bar{v}$ ortalama rüzgar hızı ve σ standart sapma hesaplanabilir.

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} v f(v) dv \quad (2.60)$$

$$\begin{aligned} &= \int_0^{\infty} v \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv \\ &= \int_0^{\infty} v \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} d\left(\frac{v}{c}\right)^k \\ &= \int_0^{\infty} c \cdot \left[\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]^{\left(1+\frac{1}{k}\right)-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} d\left(\frac{v}{c}\right)^k \\ &= c \int_0^{\infty} \left[\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]^{\left(1+\frac{1}{k}\right)-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} d\left(\frac{v}{c}\right)^k \\ &= c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \end{aligned}$$

$$\sigma^2 = E(v - \bar{v})^2 = E(v^2) - [E(v)]^2 \quad (2.61)$$

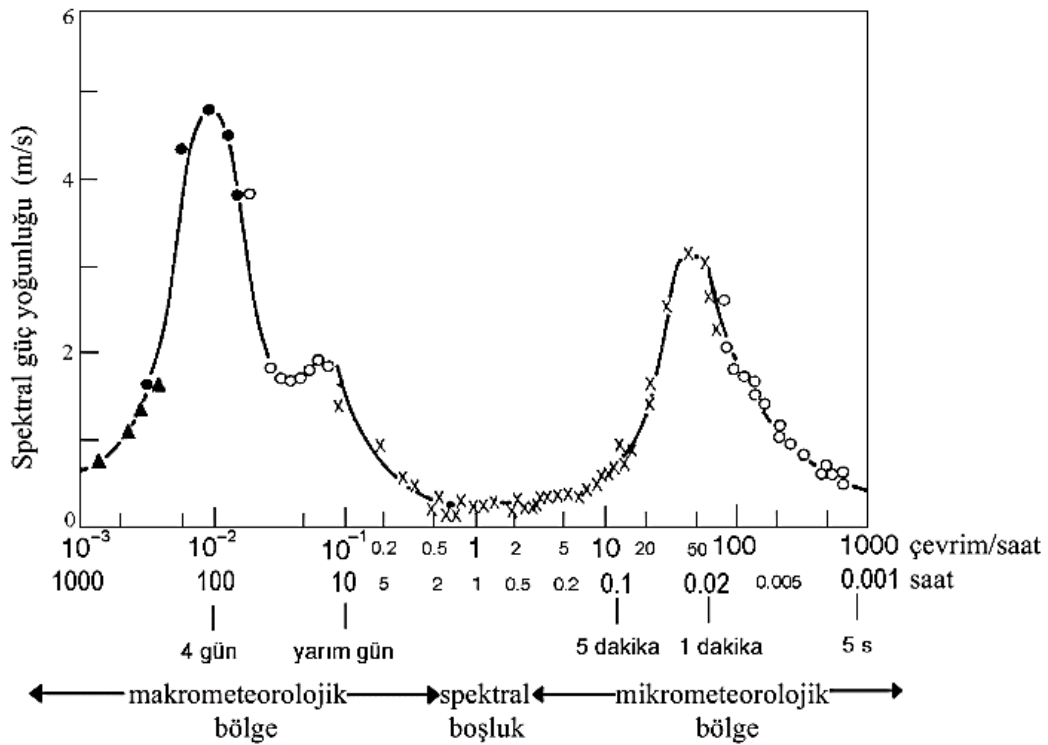
$$\begin{aligned} &= \int_0^{\infty} v^2 \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv - \left[\int_0^{\infty} v \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv \right]^2 \\ &= \int_0^{\infty} c^2 \cdot \left[\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]^{\left(1+\frac{2}{k}\right)-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} d\left(\frac{v}{c}\right)^k - c^2 \cdot \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \\ &= c^2 \cdot \Gamma^2\left(1 + \frac{2}{k}\right) - c^2 \cdot \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \end{aligned}$$

2.2.4. Ortalama Rüzgar Güç Yoğunluğu

Rüzgar çiftliği tesis edilecek bir bölge veya bölgeler arasında en uygun alanı seçmek için yıllık ortalama rüzgar hızı en önemli faktördür. Ortalama yıllık rüzgar hızı, yerden 10 m yükseklikte 1-2 m/s veya daha yüksek hız değerleri de olabilir. Rüzgar enerjisi ile ilgili karlı bir yatırım yapmak için 5 m/s'lik hız değeri kabul edilebilir alt sınır

değerdir. Yıllık rüzgar hızı değişimi analiz edilmesi gereken önemli bir unsur olmakla birlikte, rüzgar hızı mevsimlik yada aylık olarak da incelenebilir [34].

Rüzgar hızı gözlemlerinde, değişimi tesbit için genellikle 10 dakikalık ve 3 saniyelik iki aralık vardır [38]. Genelde gözlem periyodu olan 10 dakikalık aralık için ortalaması alınır, bu ortalama, elde edilen enerji miktarında kullanılarak rüzgar türbininin performansı tesbit ve tahmin edilir. Öteyandan 3 saniyelik aralıktaki kısa süreli rüzgar hızı değişim gözlemleri, pik hamle (gust) ve türbülans verilerini elde etmede kullanılır. Türbülans yoğunluğu, rüzgar türbinlerinin kanatlarındaki yorulma süresini tahminde kullanılmaktadır. Gust, türbülansla ortaya çıkan, türbinin davranışını etkileyen süresiz bir olay olup dört karakteristiğe sahiptir. Gustun genliği, devam süresi, en büyük gust değişimi ve değişim periyodu gust yapısı olarak isimlendirilir (Şekil 2.21). Aşırı gust olayı türbinin kanat gibi bir bileşeninin yada tüm yapının dayanımını etkiler. Aşırı ve ani yüklemeler, türbin ve bileşenlerinin muhtemel kullanım/yaşam süresinde, şiddetli gust değerine duyarlılığını tesbit ve analiz edilmektedir [34].



Şekil 2.21. Rüzgar güç yoğunluğu spektrumu çeşitli periyotlar için.

Çizelge 2.6. Güç yoğunluğu değerlerine göre standart rüzgar güç sınıfları.

Rüzgar Güç Sınıfı	Yıllık Ortalama Hız (m/s)	Yıllık Ortalama Rüzgar Güç Yoğunluğu (W/m ²)		Yeterli Saat Aralığı (Saat)	Rüzgar enerjisi Kaynağı Niteliği
		Metot 1	Metot 2		
1	0,0-4,4	<100	<50	<2000	Zayıf
2	4,4-5,1	100- 150	50-150	2000-3000	Orta
3	5,1-5,6	150-200	150-200	3000-5000	İyi
4	5,6-6,0	200-250	200-250	>5000	Çok İyi
5	6,0-6,4	250-300	250-300		
6	6,4-7,0	300-400	300-400		
7	7,0-9,4	400-1000	400-1000		

Rüzgâr gücü yoğunluğu Eşitlik 2.62 ile hesaplanmaktadır.

$$P = \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^N f_i V_i^3 \quad (2.62)$$

Burada V_i ; i. sınıftaki rüzgar hız değeri, f_i ; i. sınıftaki rüzgar esma sayısıdır. Burada f_i frekansların çok iyi tahmin edilmesi güç yoğunluğunu ve potansiyeli doğru belirlememizi sağlayacaktır. Piyasada ki mevcut programlar genellikle Weibull dağılım fonksiyonu ile frekans tahmini yapmaktadır [4,5].

2.2.5. Hata Ölçütleri ve Modeller İçin Bilgi Kriterleri

Matematiksel veya istatistiksel modellerin performansını karşılaştırmak için genellikle, belirleme katsayısına (determinasyon katsayısı R^2) ve Hata karelerinin ortalama karekökü (HKOK: root mean square errors RMSE) kullanılmaktadır. R^2 değeri 1'e eşit veya 1 yakın olan modeller daha iyi model olarak değerlendirilir. Diğer taraftan RMSE değeri en küçük olan model en iyi olarak değerlendirilmektedir. Eşitlik 2.63, R^2 belirlilik katsayısı hesabında ve Eşitlik 2.64 ise RMSE hesabında kullanılır ve tahminin kümülatif dağılım değeri F_i ve gözlemlenen kümülatif frekans değeri P_i kullanılarak hesaplamalar yapılır [42].

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (F_i - P_i)^2}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2)(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2)}} \quad (2.63)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F(v_i) - P(v_i))^2 \right]^{0,5} \quad (2.64)$$

Modellerin gerçek verilere uygun tahmin başarılarının tesbit edilmesi ve modellerin kıyaslanması maksadıyla çeşitli değerlendirme kriterleri kullanılmaktadır. Hata kriterleri olarak bilinen bu kriterlerden bazıları Hata Kareleri Toplamı (HKT), Ortalama Hata Karesi (OHK) ve Ortalama Mutlak Yüzde Hata (OMYH) hesaplamalarıdır. Bu hata hesaplamalarının formülleri aşağıdaki Eşitlik 2.65, Eşitlik 2.66, Eşitlik 2.67 ve Eşitlik 2.68’de verilmiştir [43].

$$HKT = \sum_{i=1}^n (y_{mi} - y_i)^2 \quad (2.65)$$

$$HKO = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{mi} - y_i)^2 \quad (2.66)$$

$$OYH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(y_{mi} - y_i)}{y_i} \cdot 100 \quad (2.67)$$

$$OMYH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_{mi} - y_i|}{y_i} \cdot 100 \quad (2.68)$$

Bazı çalışmalarda Ki kare istatistiksel uyum testi de kullanılabilir.

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^n \frac{(y_{mi} - y_i)^2}{y_i} \quad (2.69)$$

Modelin oluşturulması ve parametrelerinin tahmini hesaplamalarından sonra, model ile tahminler yapılarak, gerçek sonuçlara uygunluğunu araştırmada hipotez testlerinden başka, bilgi temelli model seçim kriterleri de kullanılmaktadır. Model seçiminde bilgi kriterleri 1970 yılı sonrası dönemlerde sıkça kullanılmaya başlanmıştır. Bilgi kriterlerinden yaygın kullanılan ikisi, Akaiki Bilgi Kriteri (*AIC*), ve Schwartz'ın Bayesian Bilgi Kriteri (*BIC*) olup, stokastik süreç modellerinde model seçimi için kullanılır. Akaiki Bilgi Kriteri (*AIC*) Eşitlik 2.70 ve ikinci kriter olan Schwartz'ın Bayesian Bilgi Kriteri ise Eşitlik 2.71 ile verilmektedir [44].

$$AIC = \ln(\sigma_e^2) + \frac{2k}{n} \quad (2.70)$$

$$BIC = \ln(\sigma_e^2) + \frac{k}{n} \ln(n) \quad (2.71)$$

Burada kullanılan simgeler: σ_e^2 ; hata terimleri varyansını, k ; sabit terim ile birlikte modeldeki parametre adedini ($k=p+q+1$), p ; AR(p) model bağımsız değişken sayısını, q ; MA(q) model bağımsız değişken sayısını, n ; modelde kullanılan gözlem veri sayısını temsil etmektedir.

Model seçimlerinde yaklaşım olarak, en küçük bilgi kriteri değerini veren model uygun model olarak tercih edilmektedir [45].

BÖLÜM 3

MATERYAL VE METODLAR

Bu bölümde, Karabük Kahyalar'da kurulan Rüzgar Ölçüm istasyonu ve elde edilen verilerle ilgili bilgiler sunulmuştur. Daha sonra tahmin metodları sınıflandırılması ve yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Aynı zamanda bu çalışmada kullanılan metodlar ve önerilen metodlar tanıtılmıştır.

3.1. RÜZGAR VERİLERİ

Rüzgar hızı gözlemlerinde, değişimi tesbit için genellikle 10 dakikalık ve 3 saniyelik iki aralık vardır. Genelde gözlem periyodu olan 10 dakikalık bu periyot içindeki gözlemlerin ortalaması alınarak kaydedilir, bu aralık için maksimum, minimum rüzgar hız değerleri, bu aralıktaki ölçüm hız değerlerinin standart sapması ve türbülans yoğunlukları kaydedilir. Rüzgar verileri sunulurken ölçüm istasyonu ve ölçüm istasyonundan elde edilen verilerin özet istatistik değerleri verilir.

3.1.1. Karabük Kahyalar Gözlem İstasyonu

Bu çalışmada, Karabük Esnaf ve Sanatkarlar Kooperatifi (KARES) Alışveriş Merkezi (AVM) tarafından Karabük'teki Kahyalar Köyü'nde kurulan ölçüm istasyonundan alınan veriler ve Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden (MGM) alınan verilerle ile rüzgar enerjisi tahmin modellemeleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm istasyonunun kurulduğu Kahyalar köyü, Karabük şehir merkezine yaklaşık 10 km uzaklıktadır. Karabük'ün batısında, 610 m yüksekliğindedir (Şekil 3.2).

Ölçüm istasyonu, 02.22.2012 tarihli ve 28212 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan rüzgar ve güneş enerjisine dayalı lisans uygulamalarının ölçüm standartlarına göre oluşturulmuştur.

Bu ölçüm standartlarına göre, ölçüm istasyonu üç anemometre, iki yön sensörü, bir Nem ölçer, bir basınç ölçer, bir sıcaklık ölçüm cihazı, bir veri kaydedici ve bir veri aktarma modemi ile birlikte 60 m yükseklikteki bir kafes direk üzerine monte edilmiş olarak kurulmuştur. Bu ölçüm istasyonu, önerilen yerdeki rüzgar enerjisi yatırımlarının fırsatlarını araştırmak için kurulmuştur. Ölçümler 10 ay kaydedilmiştir. Şekil 3.1’de gözlem istasyonundan öğrencilerimizle bir fotoğraf verilmiştir.



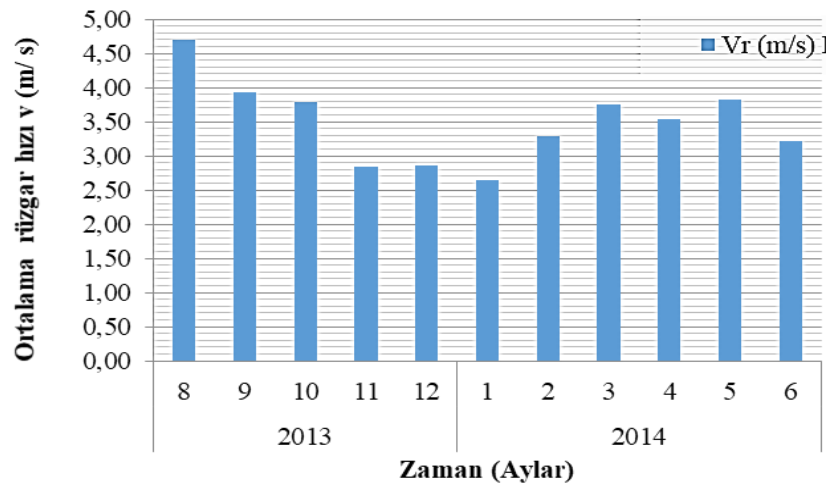
Şekil 3.1. Kahyalar gözlem istasyonundan bir enstantane.



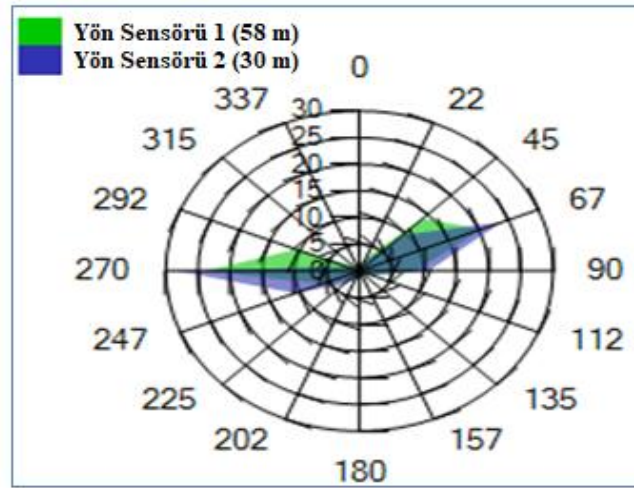
Şekil 3.2. Karabük Kahyalar rüzgar gözlem istasyonu (RGI) uydu fotoğrafı.

3.1.2. Kahyalar Gözlem İstasyonu Verileri

Kaydedilen verilere ortalama aylık rüzgar hızı Çizelge 3.1'de verilmiştir. Aylık ortalama maksimum rüzgar hızı ve aylık ortalama minimum rüzgar hızı, Ağustos ayında sırasıyla 4.70 m/s ve Ocak ayında 2,64 m/s olarak ölçülmüştür. Yıllık ortalama rüzgar hızı yaklaşık 3.37 m / s olarak değerlendirilmiş ve tüm bu değerler Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Aylık ortalama rüzgar hızları.



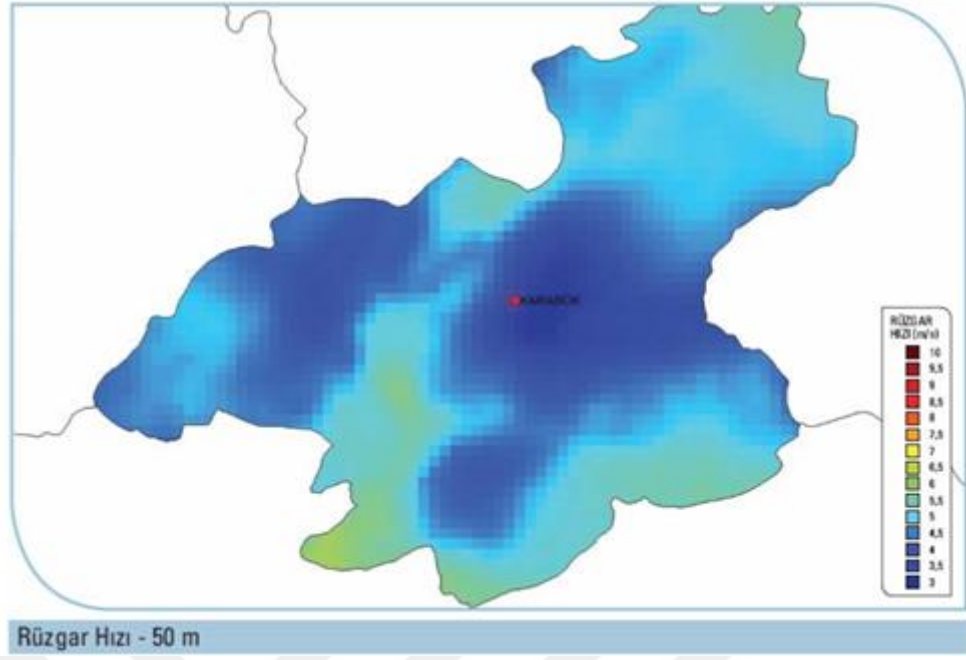
Şekil 3.4. Karabük Kahyalar rüzgar gülü.

Çizelge 3.1. Karabük Kahyalar gözlemlenen aylık ortalama rüzgar hız verileri.

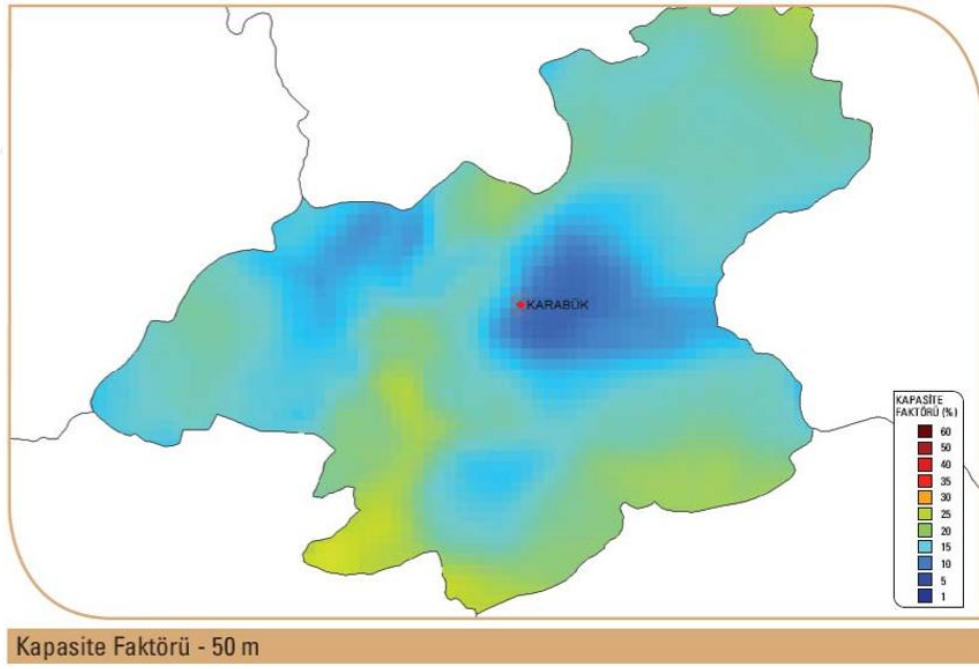
(60 m Yükseklik)	Yıl	Ay	Vr (m/s) Ortalama	Standard Sapma	Maksimum Rüzgar Hızı	Minimum Rüzgar Hızı	Sıcaklık(°C) Ortalama
2013		8	4,70	2,66	12,07	0,26	21,00
		9	3,93	2,23	12,01	0,34	13,85
		10	3,80	2,46	18,09	0,28	9,66
		11	2,85	1,60	13,72	0,30	7,16
		12	2,86	1,90	15,87	0,26	-2,12
2014		1	2,64	1,77	13,93	0,28	2,69
		2	3,29	2,01	12,63	0,26	4,49
		3	3,75	2,26	18,49	0,31	6,35
		4	3,54	2,36	17,27	0,29	10,88
		5	3,83	2,58	13,87	0,28	13,92
		6	3,21	2,44	9,88	0,30	12,71
Genel Ortalama			3,49	2,21	14,35	0,29	9,14

Çizelge 3.2. Kahyalar gözlem verilerinin tanımlayıcı istatistik değerleri.

Tanımlayıcı İstatistikler	Değerler
Ortaklama Rüzgar Hızı(m/s)	3,478560197
Standard Hata	0,01140163
Medyan	2,814
Standard Sapma	2,217492558
Örneklem Varyansı	4,917273243
Basıklık-Sivrilik Katsayısı (BSk Kurtosis)	1,931514759
Çarpıklık Katsayısı (Çk Skewness)	1,306057115
Veri Genişliği (Ranj)	18,228
En Küçük Değer	0,26
En Büyük Değer	18,488
Gözlem Sayısı	37826



Şekil 3.5. Karabük Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA).

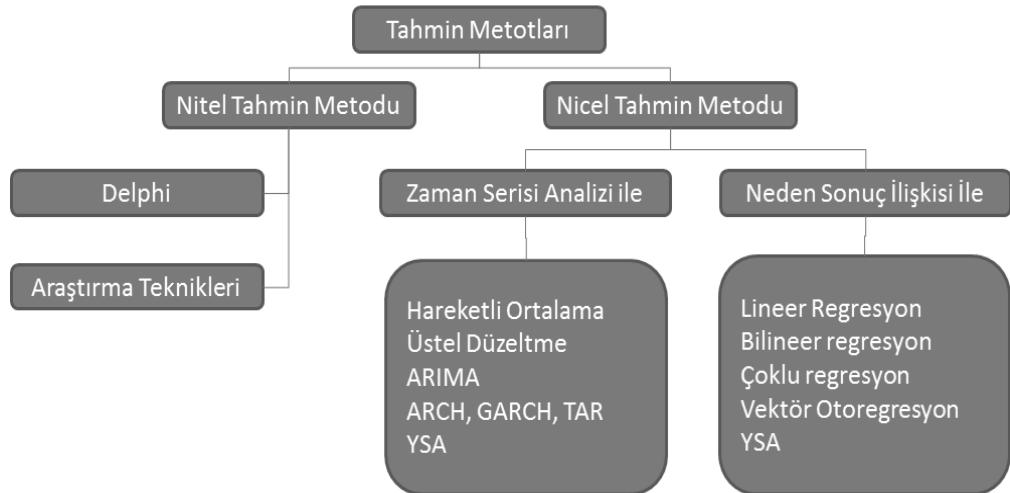


Şekil 3.6. Rüzgar enerjisi kapasitesini gösteren REPA Haritası.

3.2. TAHMİN MODELLERİ

Geleceği tahmin, ilk yaratılıştan beri tüm insanların arzusu olmuştur. Bir değişkenin gelecekte alacağı değerleri önceden yaklaşık olarak belirlenmesi tahmin kelimesini tanımlar. Bu amaçla yaşamın hangi alanında tahmin yapılacaksa o alanla ilgili sistem ve metotlar geliştirilmiştir. Tahmin amaçlı kurulan bir sistem, iki aşamalı incelenebilir. Birinci aşama model kurma ikincisi ise modelle tahminin gerçekleşmesidir [46].

Model oluşturmada geçmiş dönem gözlem verileri kullanılmaktadır. Matematiksel biçimi belirlenen modelin parametreleri, verilerle hesaplanıp model uygunluğu için hata testlerine tabi tutulur. Tahmin metotları kabaca nitel ve nicel olmak üzere ikiye ayrılır. Nitel tahmin, tahminde bulunanın düşüncelerine bağlı olup kişiye hastır. Nicel tahmin yöntemi ise matematiksel modele ve verilere bağlıdır. Bu konudaki ayrıntılı sınıflandırma şeması Şekil 3.7 da verilmiştir.



Şekil 3.7. Tahmin metotları genel sınıflandırma şeması.

Delphi tekniği: Genellikle verilerin bulunmadığı ve belirsizliklerin yüksek olduğu vaka veya işletmelerde kullanılmaktadır. Tahmin edilmek istenen olay, alanında uzman olan insanların fikirlerinin, sıklık gösteren anketler kullanılarak belli bir noktada odaklanmasını istemektedir [46].

Regresyon Analizi: Tahmin maksadıyla kullanılacağı zaman; tahmin edilmek istenen olayı (bağımlı değişkeni), o olayı oluşturan neden faktörlere bağlı olarak doğrusal bir ilişkinin varlığının kabulü ile tahminlemeyi hedefler [46].

Sayısal Hava Tahminleri (**SHT** / Numerical Weather Prediction: NWP); hava değişkenlerini tahmin etmek için atmosferik matematik modellere girdi olarak mevcut hava koşullarını kullanan ve rüzgar gücü tahmini için rüzgar hızı ve yönünü tahmin eden bir yöntemdir [47].

Peristans Modeli (Kalıcılık modeli): Bir sonraki zaman adımında rüzgarın (veya rüzgar gücünün) şimdiki zaman adımında meydana geldiği değer ile aynı değeri alacağını belirten bir tahmin modelidir [47].

Gelişmiş rüzgar gücü tahmini (WPF) yöntemleri temel olarak fiziksel ve istatistiksel yaklaşımlara dayanır. Fiziksel yaklaşım: belirli bir referans noktasındaki ve model seviyesindeki sayısal hava tahmininden (SHT), değerlendirilen noktadaki ve türbin göbeği yüksekliğindeki güç tahminine çeviri yapan birkaç alt modelden oluşur. Her alt model, dönüşümlerle ilgili fiziksel süreçlerin matematiksel tanımlamalarını içerir. İstatistiksel yaklaşım ile meteorolojik tahminler, geçmiş ölçümler ve üretim çıktıları arasındaki ilişkiyi, herhangi bir fiziksel olgu dikkate alınmadan, verileri; veriden tahmin etmek ve istatistiksel modellerden elde etmekten ibarettir [47].

Çok kısa vadeli tahmin yaklaşımı, zaman serileri yaklaşımına dayanan ve Kalman Filtreleri, ARIMA, ARX ve Box-Jenkins tahmin yöntemleri gibi modelleri içeren istatistiksel modellerden oluşmaktadır. Bu yöntemler yalnızca geçmiş üretim verilerine dayanarak, sadece 3-6 saat arasındaki tahminleri; zaman düzleminde Peristans modelinden (referans model) daha iyi performans göstererek yapmaktadırlar [47].

Bu tür modeller iki gruba ayrılabilir: ilk grup, rüzgar hızını tahmin eder ve ampirik model veya üreticinin güç eğrisi aracılığıyla güç değeri verir; ve ikinci grup, rüzgar hızının tahmin edildiği önceki bir adım olmaksızın, doğrudan rüzgar üretimini tahmin

etmektedir. Bu alanda kullanılan en son teknikler ve yöntemler Çizelge 3.3’de özetlenmiştir [41,47,48,49].

Çizelge 3.3. Rüzgar güç tahmini modelleri.

Çok Kısa Süreli Güç Tahmin Modelleri		Kısa Süreli Güç Tahmin Modelleri
Rüzgar Hızı Tahminleri	Rüzgar Gücü Tahminleri	
Kalman Filter	Fuzzy Time Series	Neural Networks
Grey Predictor	Self-exciting Threshold Autoregressive	Support Vector Machines
Takagi-Sugeno	Smooth Transition Autoregressive	Regression Trees with Bagging
Discrete Hilbert Transform	Markov-switching Autoregressive	Random Forests
Abductive Networks (GMDH)	Adaptive Fuzzy Logic Models	Adaptive Neural Fuzzy System
Adaptive Linear Models	Adaptive Linear Models	Mixture of Experts
ARIMA time series models	ARIMA time series models	Nearest Neighbor Search
Neural Networks	Neural Networks	Autoregressive with Exogenous input (ARX)
Adaptive Neural Fuzzy Inference System	Adaptive Neural Fuzzy Inference System	Locally Recurrent Neural Networks
		Local Polynomial Regression
		Takagi-Sugeno Fuzzy Inference System
		Fuzzy Neural Networks]
		Autoregressive with Exogenous Input and Multi-timescale Parameter (ARXM)
		Bayesian Clustering by Dynamics (BCD)

Rüzgar enerjisi alanında uluslar arası işbirlikleriyle geliştirilmiş, rüzgar çiftliklerinin gözlemlenmesi, işletmesi ve tahminlerinde kullanılan ticari yazılımları bulunmaktadır. Bir yıllık rüzgâr ölçümlerini kullanarak rüzgâr potansiyelini belirleyen çeşitli yazılım programlar Çizelge.3-4’de verilmiştir. Rüzgar hızı ve rüzgar çiftliklerinin enerji dağıtım şirketlerine elektrik enerjisi üretim taahhüt için kullandıkları çeşitli yazılım programları da Çizelge 3-5’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Rüzgar potansiyeli hesaplama modelleri ve bilgisayar programları.

Program Adı	Geliştiren Kuruluş	Ülke
WASP	Risoe ulusal Meteoroloji Bölümü	Danimarka
WindPro	EMD Enerji og MiloData	Danimarka
WindFarmer	Garrad Hassan&Parners Ltd	İngiltere
FlaP	Oldenburg Üniversitesi Meteoroloji Bölümü	Almanya
WindRose	NRG Systems Ltd	Almanya
FluxFarm	ECN Energy Center of Netherlands	Hollanda
RETScreen		Kanada

Çizelge 3.5. Rüzgar türbin işletme ve hız ile güç tahmini programları.

Model	Geliştirici	Zaman Düzlemi	Yaklaşım
WPMS	ISET-Almanya	Çok Kısa Dönem	İstatistiksel
WPPT	IMM & DTU	Kısa Dönem	İstatistiksel
Prediktor	Riso	Kısa Dönem	Fiziksel
Zephyr	Riso & IMM	Kısa Dönem	İstatistiksel & Fiziksel
WPFS Ver1.0	Çin Elektrik Güç Bilimi Enstitüsü	Kısa Dönem	İstatistiksel & Fiziksel
ANEMOS	7 Ülkeden 26 Ortak	Çok Kısa Dönem - Kısa Dönem	İstatistiksel & Fiziksel
ARMİNES (AWPPS)	Avrupa Komisyonu	Çok Kısa Dönem - Kısa Dönem	İstatistiksel & Fiziksel
Evind	AWS Truewind	Kısa Dönem	İstatistiksel & Fiziksel
Sipreolico	İspanya	Kısa Dönem	İstatistiksel
Previento	Oldenberg Üniversitesi	Uzun Dönem	İstatistiksel & Fiziksel
LocalPred & RegioPred	CENER	Uzun Dönem	İstatistiksel & Fiziksel
WEPROG	UCC	Uzun Dönem	İstatistiksel & Fiziksel

Hazır paket programlardaki veriler için hata sınırlarını belirtmek mümkün değildir. Ölçümler yapılması, aletlerin kurulması ve veri kayıtları belli bir doğruluktur. Sistemik hatalar da vardır. Sistemik hatalar; aletlerin yanlış kalibresi v.b %5 civarı, yüzey gözlemlerinde jeostrofik rüzgâr hızını hesaplamak için sürtünmenin uygulanması ile %15 veya daha fazlası olabilir. Özellikle dağlık araziye uygun yerleşmemiş istasyonları, farklı pürüzlülük şartlarında, rüzgâr frekans dağılımlarında sapmalara sebep olur. Bununla birlikte modellemede f_i değerlerini tahminlemede

dağılımdan kaynaklı hata ile birlikte rüzgâr güç yoğunluğundaki hatalar yüksek olabilmektedir [5].

3.2.1. Rüzgar Enerjisi Tahmin Yöntemleri

Rüzgar Enerjisi alanında yapılan tahminleri temel olarak üçe ayırabilir. Bunların birincisini yatırım amaçlı tahminler oluşturmaktadır. Bu tahminler, yatırım yapılacak yerin rüzgar değerlerinin ölçülmesi ve rüzgar karakteristiğinin belirlenmesi rüzgar enerjisi potansiyeli tahmini şeklinde gerçekleşmektedir. Bu tahminlerde, en az altı aylık veya bir yıl süreli ölçülmüş veriler yada çok yıllık veriler kullanılmaktadır.

İkinci olarak rüzgar enerjisi üretim tahminleridir ki rüzgar enerjisinin üretilmesi ve pazarlamasının planlanması açısından önemlidir. Dakikadan saatlere, saatlerden günlere ve günlerden haftalara varan süreler için tahminler yapılması gerekmektedir. Tahmin yöntemleri kullanım amacına göre farklı zaman ölçeklerinde sınıflandırılabilir. Anlık Tahminler genellikle türbin kontrolü için kullanılan saniyeler ve dakikalar için yapılan, en fazla 30 dakikaya kadar olan tahminleri ifade eder. Kısa süreli tahminler ise saatlik yani 0-72 saat arası yapılan ve güç sisteminin yönetimi ile enerji piyasası satış ve taahhüt için kullanılan tahminlerdir. Orta süreli tahminler ise günlük tahminler olup 0-7 gün arası yapılan ve bakım onarım maksadıyla yapılan tahminlerdir. Uzun süreli tahminler ise genellikle yıllık tahminler olup yatırım ve fizibilite çalışmalarında kullanılır (Çizelge 3-6).

Rüzgar gücü tahmininde amaç bir türbinin veya bir rüzgar enerjisi santralının gelecekte istenen zamanda beklenen üretim miktarının tahmin edilmesidir [49]. Rüzgar gücü tahmini alanında yapılan çalışmalar iki ana katogoriye ayrılabilir. Uzun süreli ölçüm değerlerinin kullanıldığı rüzgar enerjisi potansiyeli hesaplamaları birinci katogoriyi oluşturmaktadır. İkinci katagori ise zaman eksenli gelecekteki rüzgar hızını tahminde kullanılan yöntemleri içermektedir. Bu yöntemler; dakikalık tahminlerden, saatlik, günlük, aylık, yıllık ve çok yıllık tahminlere kadar olan tahminleri içermektedir [47,48,50].

Çizelge 3.6. Tahmin yöntemleri genel sınıflandırması.

Tahmin Çeşidi	Tahmin Süresi	Yöntemleri	Amacı
Rüzgar Enerjisi	Kısa Dönem	Ölçüm Yapmak,	Yatırım için
Yatırım	6-12 ay	Verileri Değerlendirmek,	Karar alma
Tahminleri [50]	Uzun Dönem	Olasılık Dağılım	Rüzgar ve iklim
	2-10 yıl	Fonksiyonları ile modelleme	Karakteristiğini belirlemek
Rüzgar Enerjisi	Anlık Tahminler	Fiziksel Tahminler	Türbin kontrol,
Üretim	(Saniyeler-Dakikalar)	İstatistiksel Tahminler	Elektrik üretimi
Tahminleri [49].	Kısa Süreli (Saatler 30 dk ile 48 veya 72 saat)	Fiziksel-İstatistiksel Bileşik Tahmin modelleri	Elektrik Dağıtım Planlaması, Elektrik
		Genetik Algoritma tabanlı tahminler,	Toptan satış ve taahhüt
	Orta Süreli (Günler3-7 günveya 48 saat-1 Hafta)	Yapay zeka ve bulanık mantık tabanlı tahminler,	Türbin bakım planlama, Türbin birimleri bakım ve kontrolü
	Uzun Süreli (Yıllar 1- 20)		Rüzgar Çiftliği fizibilite çalışmaları
Rüzgar Enerjisi	Saatlik-Günlük-Aylık-	Enerji Taleb Tahminleri	Enerji Üretim ve
Taleb Tahminleri	Yıllık-On yıllık	Elektrik Enerjisi Tüketim	Dağıtım Planlama
[51,52,53]		Alışkanlıkları Tahmini	için
		Finansman Tahmin	Yatırım Kararı İçin
		Yöntemleri [54,55]	Nakit akışı
		Net Bugünkü Değer tahminleri	
		(NBD) Yöntemi,	
		İç Karlılık Oranı(İKO),	
		Geri Ödeme Süresi(GÖS)	

Bu katagorilerde, literatürde bir hayli çalışma bulunmaktadır [47,49,55,56]. Üçüncü katagori olarak finansman tahminleri alınabilir. Bu tahminlerde öncelikli olarak yatırım fizibilite çalışmalarında kullanılır. Genellikle, Net Bugünkü Değer (NBD) yöntemi, basit Geri Ödeme Süresi (GÖS) ve iç karlılık oranı (İKO) yöntemleri kullanılmaktadır[53,55]. Son araştırmalar, olasılık tahminleri, risk endeksleri veya kısa süreli rüzgar enerjisi üretimi senaryoları dikkate alınarak, belirsizlik tahminlerini nokta tahminleriyle ilişkilendirmeye odaklanmıştır [47]. Özellikle yatırım kararı ve

finansman adımında projenin belirsizlik tahminleri, finansman sağlayıcılar tarafından istenebilmektedir [56].

3.2.2. Güç Potansiyeli Tahmini Çalışmaları

Türkiye coğrafi konumu sebebiyle, yenilenebilir enerji kaynakları açısından zengin bir ülkedir. Türkiye'nin yıllık ortalama toplam güneşlenme süresi incelendiğinde 2.640 saat süre ile Avrupa ülkelerinin çoğundan uzun bir ortalama sahiptir. Günlük ortalama 7,2 saat olan güneşlenme süresi ile yaklaşık günün üçte birinde güneş almaktadır. Ülkemizde bir yılda metre kare başına yaklaşık ortalama olarak saatte 1311 kWh ışıma şiddeti düştüğü tesbit edilmiştir. Bu zengin potansiyelle güneş enerjisi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını gerçekleştirecek, yerli ve yeni teknolojilerin Türkiye'de üretilmesi ve yaygın olarak kullanılması gerekmektedir. Yatırım yapılan yenilenebilir enerji kaynaklarından birincisi ve en önemlisi rüzgâr enerjisidir.

Rüzgâr enerjisi santrallerinin kontrolü rüzgârın stokastik yapısı nedeniyle zordur. Yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı çalışan tüm elektrik üreten enerji santralleri, kurulduğu bölgenin meteorolojik verilerine ve zamana bağlı olup tahminleme çalışmaları zorlu bir süreçtir. Rüzgâr hızı ve enerji değişiminin, güvenilirliği yüksek modellerle belirlenip, yatırım ve üretim planlaması yapılmalıdır [2].

Mustafa Arif Özgür, Kütahya rüzgâr verilerinin karakterizasyonu ve elektrik üretimi açısından değerlendirmesinde: olasılık yoğunluk fonksiyonu olarak; Weibull, Lognormal ve Gamma olasılık yoğunluk (dağılım) fonksiyonlarını kullanmıştır [14]. Dağılım fonksiyonlarının parametrelerini tahmin için, maksimum olabilirlik tahmin yöntemi (Maximum Likelihood Estimation MLE) en küçük kareler yöntemi (Least Square Method LSM) ve Robust Asimetrik Dağılım parametre tahmin (RADPE) yöntemlerini kullanmıştır. Kütahya'da yapılan ölçümler için Lognormal olasılık yoğunluk fonksiyonunun diğer olasılık dağılım fonksiyonlarından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [14].

“Literatürdeki pek çok çalışmada rüzgâr hızı esme sıklığı dağılımları hiç bir istatistiki test yapılmaksızın Weibull dağılımı ile analiz edilmektedir.” Bazı durumlarda diğer

olasılık dağılım fonksiyonları, rüzgar hız dağılımını Weibull dağılımından daha iyi temsil edebilmekte ve modelleyebilmektedir [57]. Weibull dağılım modeli, rüzgar hızı dağılımı analizi için yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak hava gözlem istasyonlarından elde edilen verilerin çoğu, Weibull dağılımı ile modellenememektedir. Örneğin, yüksek sayıda sakin rüzgar hızı değerleri olan gözlem verileri ve bimodal örneklem değerleri Weibull dağılımı ile yüksek doğrulukta analiz edilemez [58]. Bu nedenle daha iyi çözümler için çeşitli olasılık yoğunluk fonksiyonları kullanılır. Burr dağılımı bunlardan biridir ve modeli ümit vaat eden bir modellerden bir tanesidir ancak dağılım parametreleri (şekil ve ölçek) tahmin edilmesi zordur [40,59].

Rüzgâr potansiyel haritalarında güncellenen rüzgâr hesaplarının bölgesel karakteristik özellikleri ve değerleri yer almaktadır. Ancak rüzgâr haritasında, rüzgâr gücü hesabında yerel koşullar; coğrafi engeller hesaplamalara katılmaz ve yerel arazi özelliklerinin sebep olduğu değişkenlikleri tamamiyle vermez [5].

Rüzgâr potansiyeli haritalarında görülmesi mümkün en büyük hatalar rüzgarın karmaşık orografide (orografi:dağları inceleyen bilim) akışı ile ilgilidir. REPA (Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası) model programları, eğimi % 30'dan daha az olan yatay boyutları 1-2 km ye yakın olan tepe üzerindeki rüzgâr hızında meydana gelen yüzde artışla % 10 düzeyinde hata ürettiği bilinmektedir. REPA atlaslarında kullanılan temel rüzgar verileri genellikle 10 m gibi düşük yükseklikte yapılan gözlemlere aittir. Rüzgar enerjisi üretimleri ise çoğunlukla 50 metre üzeri yüksekliklerde olmaktadır, rüzgâr hız dağılımlarının dikey ekstrapolasyonu için rüzgâr gözlem verileri önemli bir parametredir. Enerji üretimi için rüzgâr enerjisi potansiyel tahmininde 50 m üzeri yükseklikler için rüzgâr atlaslarının güvenilirliği azalmaktadır [5]. Rüzgâr enerjisi uygulamalarında yerel şartlarda oluşan rüzgârlar kullanılır. Kara-deniz ve dağ- vadi etkileşimi, gündüz gece ısı değişimlerinin etkisi, yerel topoğrafik yapının etkisi, kanal etkisi gibi nedenler ile yerel rüzgârlar ortaya çıkmaktadır [5].

Rüzgâr hızı bir bölgenin sahip olduğu hava sisteminin saatlik geçişler sırasında değiştiği için doğal olarak ortaya çıkan enerjinin değişimine neden olmaktadır. Rüzgâr hızının, uzun yılları kapsayan uzun dönem, yıllık, günlük ve kısa süreli olmak üzere dört ana değişimi vardır. RES (Rüzgâr enerji santrali) kurulumu için ideal şartlarda en

az 5 yıl gerektiği halde genelde uygulamada birkaç yıllık hatta bir yıllık veri ile çalışmalar yapılmaktadır. Rüzgâr ölçümleri ne kadar uzun süreli yapılırsa ve analizlerde çok uzun süreleri içeren verilerle yapılırsa o kadar iyi olur. Konu ile ilgili yapılan bir çalışmada, İngiltere South Port'ta 42 yıllık rüzgâr verilerinin kullanımında bile uzun dönem rüzgar hızı ortalamalarıyla yıllık ortalamaların karşılaştırmalarında %85-118 aralığında bir değişim gözlenmiştir [5].

Uygulamalarda elektrik dağıtım şirketlerinin, güvenilir ve öngörülebilir rüzgar enerji santrali (RES) üretim verilerine ihtiyaçları vardır. Avrupada anlık ve ya kısa süreli ikili anlaşmalar ile enerji temin edilmesi spot piyasa olarak anılmaktadır [60]. Bu noktadan bakıldığında kısa süreli enerji tahminlerinin çok büyük önemi vardır.

Serbest enerji piyasalarında rekabetli enerji alış-satış fiyatları için kritik özellik enerji üretim miktarının dağıtım planlamasıdır. Avrupa ülkelerinde kanun ve yönetmelikler gereği enerji dağıtım şirketleri dağıtılan elektrik enerjisinin belli oranını Yenilenebilir Enerji Kaynağı (YEK) olarak temin etmek zorundadır. Dağıtım şirketleri, YEK kullanım zorunluluğunu sağlamak için en azından 24 veya 48 saatlik enerji üretim tahminleri ile enerji dağıtım planlamasını yapmak istemektedirler. Planlamada fosil kökenli enerji kaynaklarında planlama sıkıntısı bulunmayıp ancak YEK planlamasında tahminlere dayalı ve stokastik yapıdaki enerji kaynağına bağlı sorun çıkmaktadır. Avrupa'daki enerji dağıtım ve YEK üretim şirketleri enerji üretimi tahmin modelleri kullanmaktadır [5].

RES rüzgar elektrik santralleri enerji üretimi noktasında 0-72 saatlik tahmin yapmaları gerekmektedir. Misal olarak Danimarka, İsveç ve Finlandiya'nın ortaklaşa kurmuş oldukları Nord Pool enerji havuzunda 12-36 saatlik periyotta rüzgâr enerjisi üretim tahminleri yaparak bu enerji havuzuna elektrik enerjisi verilmektedir [60].

İyi dizayn edilmiş enerji üretim sistemi ile minimum maliyetle maksimum fayda ve yüksek hayat konforu amaçlanmaktadır. Herhangi bir sistemin bütün bileşenlerinin, sistemin performansına etki eden bütün nedenlerin iyi bilinmesi modellemeler için gereklidir [32].

Atmosfer içindeki değişen parametrelerden en değişkeni rüzgârdır. Rüzgâr verilerinin çok iyi analiz edilmesi ve bütün yönleriyle en ince detaylarına kadar bilinmesi gerekir. Bu alanda yapılan yatırımların zaten kurulum maliyetleri yüksek olduğu için zarara girilebilir [61].

Bu anlamda yapılan çalışmalardan biri de olasılık dağılım fonksiyonlarıyla, rüzgâr verilerinin frekans dağılımlarını modellemektir. Rüzgâr verilerinin modellenmesiyle yatırım yapılacak yerlerin teknik potansiyelini tespit edilir ve sağlıklı yatırım planlaması gerçekleştirilebilir.

Rüzgar enerjisi potansiyeli hesaplamaları konusu ilgili literatürde incelendiğinde rüzgar hızlarının frekanslarının modellenmesi konusunda geniş kabul gören ve sıklıkla uygulanan Weibull ve Rayleigh dağılımlarının gibi birçok olasılık dağılım fonksiyonları kullanılmaktadır [3]. Yıllık toplam enerji üretimi tahminlemesi olarak da nitelenebilecek bu çalışmalarda amaç, rüzgar verilerini modellemek, rüzgar hız karakteristiği elde etmek ve rüzgar hızlarının ölçüldüğü bölgeye ait rüzgar rejimini araştırmaktır. Çalışmalarda, rüzgar hızlarının önceden tanımlı rüzgar hız dilimlerine {[0-0,5), [0,5-1,5), [1,5-2,5),..., [24,5-25,5) gibi} düşen bir yıllık süre içerisindeki değişimleri; rüzgar hızı esiş aralığı eksenine ile rüzgar hızı esiş sayısı/oranı eksenlerinde oluşturulan histogram grafikleri ile veriler özetlenerek incelenmektedir. Analizler Weibull ve/veya Rayleigh olasılık dağılım fonksiyonlarına benzetilerek yapılmaktadır. Tahmin edilen frekanslar ve gözlemlenen ölçüm değerleri ile gözlem yapılan bölgenin rüzgar enerjisi potansiyeli tahmin edilmektedir [17].

3.2.3. Zamana Bağlı Süreli Rüzgar Hızı Tahmin Çalışmaları

Zaman akış ekseninde gelecekteki rüzgar hızını tahmin etmeyle ilgili çok sayıda çalışma ve model vardır. Tahmin modellerin birbirinden farklı ve hepsinin kendine ait karakteristik özellikleri vardır. Modellerin bazıları kısa süreli tahminlerde iyi olmasına karşın bazıları uzun süreli tahminlerde tatmin edici sonuçlar vermektedir; diğerleri ise basit ve yaygın olarak uygulanırken, bir kısım çok karmaşık olan YSA gibi modeller ise daha kesin sonuçları vermektedir. Son zamanlarda matematiksel,

istatistiksel teknikler ve yapay zekâ alanındaki gelişmelerle birlikte birçok yeni metot önerilmiştir [47,62,63].

Hodge ve arkadaşları ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) isimli istatistik zaman serisi analiz aracıyla gelecekteki rüzgar gücünü tahmin etmişler ve bu modellerin farklı iklimsel ve mevsimsel verilerle adaptasyonunu incelemişlerdir [64]. Rüzgar hız tahmini alanında yapılan çalışmalara, stokastik modelleri inceleyen Bivona ve arkadaşlarının [65] yaptığı çalışma örnek verilebilir. Bu tez içeriğinde önerdiğimiz model benzeri bir modeli, Carapellucci ve Giordano saatlik gözlem değerlerini kullanan ve sentetik rüzgar hız verileri üreten bir yöntem ileri sürmüşlerdir [66]. Rüzgar hızı zaman serilerine bağlı önerilen ARIMA modelleri ve yapay sinir ağı (YSA) modellerine dayanan potansiyel ve hız tahmini modelleri ile bunların kombinasyonlarından oluşan hibrit modeller önerilmiştir [2,62,63,67].

3.3. STOKASTİK SÜREÇ MODELLERİ

Zaman (t) endeksi taşıyan random (rassal) değişkenlerin oluşturduğu veri dizisi stokastik süreç yada zaman serisi süreci olarak tanımlanmaktadır. Stokastik sözcüğü yaygın olarak random (rassal) kelimesi ile aynı anlamda kullanılmaktadır. Zaman serisi süreci, stokastik sürecin olası gerçekleşme durumlarından biridir. Bundan dolayı ilgilendiğimiz zaman serisi farklı tarihsel şartlar altında birbirinden farklı gelişmelerden oluşacaktır. Diğer bir ifade ile zaman serisi sürecinin olası tüm gelişmelerinin oluşturacağı küme, kesitler arası verideki ana kütle görevini yapacaktır.

Zaman serisi modelleri tek değişkenli bir zaman serisinin geçmiş değerleri ve hatalarına dayalı olarak kurulan modelleri içermektedir. Modelleme matematiksel olarak;

$$V_t = f(V_{t-1}, V_{t-2}, \dots, e_t, e_{t-1}, e_{t-2}, \dots) \quad (3.1)$$

Eşitlik 3-1 deki gibi hız ve hızın ortlamaya bağlı hatalarını değişken alan bir fonksiyon olarak ifade edilir ve ele alınır.

Ortalama ve varyansında düzenli, sistematik değişme olmayan zaman serilerine durağan zaman serisi olarak tanımlanmaktadır. Stokastik sürecin karakteristik halleri nedeniyle zamana bağlı bulunan ve durağan olmayan zaman serileri meydana gelmektedir. Böyle durağan olmayan serilerin modellenmesinde logaritma alma, fark alma gibi zaman serisini durağanlaştıran işlemleri uygulanmaktadır. Zaman serilerinin durağanlığının tesbitinde, ortalama ve varyans değerlerinin değişiminde trendin olup olmadığını belirlemek için herkes tarafından kabul edilmiş bir yöntem olmamakla birlikte, genellikle zaman serisi veri grafiği incelemesi en kolay yöntem olarak bilinmektedir [43].

Box-Jenkins Modeli olarak da bilinen, Otoregresif (Auto Regressive-AR) AR(p), hareketli ortalama (Moving Avarage-MA) MA(q) ve bunların birleşimi ARMA(p,q) modelleri durağan zaman serilerine uygulanırken, duragan olmayan zaman serilerine ARIMA(p,d,q) (Autoregressive İntegrated Moving Average) modelleri kullanılmaktadır.buradaki d sayısı durağanlaştırmak için fark alma işlemlerin sayısını ifade etmektedir. ARIMA modellerin amacı zaman serisine en uygun ve minimum sayıda parametreden oluşan lineer stokastik süreç modelini oluşturabilmektir [68].

Model belirleme safhasında, hesaplanan otokovaryans ve otokorelasyon fonksiyonları kullanılarak modelin ARMA(p,q) veya ARIMA(p,d,q) modellerinden hangisine uygun olduğunu belirlenmektedir. İki rassal değişken arasındaki kovaryans hesabının formülü, Eşitlik (3.2 ile verilmektedir.

$$Kov(V_t, X_t) = E(V_t - E(V_t))(X_t - E(X_t)) \quad (3.2)$$

Buna benzer şekilde aralarında k periyot bulunan zaman serisinde, V_t, V_{t-k} için otokovaryans hesabının formülü Eşitlik 3.3 ile verilmektedir [64].

$$\gamma_k = Kov(V_t, V_{t-k}) = E[(V_t - E(V_t))(V_{t-k} - E(V_{t-k}))] \quad (3.3)$$

Zaman serisi analizlerinde k gecikme için otokorelasyon fonksiyonu değeri, gerçek zaman serisinin k adım geri götürülmesiyle oluşan seri ile orijinal seri arasındaki korelasyonun hesaplanmasıdır. Gecikme değeri k adım olan otokorelasyon katsayısı;

$$\rho_k = \frac{E[(V_t - \mu)(V_{t-k} - \mu)]}{\sqrt{E[(V_t - \mu)^2]E[(V_{t-k} - \mu)^2]}} \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.4 ile hesaplanmaktadır. Bu formül, Eşitlik 3.5 veya Eşitlik 3.6 şeklinde de gösterilebilir. Eğer incelenen zaman serisi normal dağılmakta ve durağan ise $\rho_0 = 1$ olarak hesaplanır.

$$\rho_k = \frac{E[(V_t - \mu)(V_{t-k} - \mu)]}{\sigma_v^2} \quad (3.5)$$

$$\rho_k = \frac{\gamma_k}{\gamma_0} \quad (3.6)$$

Otokovaryans ve otokorelasyon fonksiyonlarında; $\gamma_k = \gamma_{-k}$ ve $\rho_k = \rho_{-k}$ eşitlikleri vardır. Otokorelasyon fonksiyonu genellikle zaman serisinin durağanlığını tesbit için kullanılmaktadır.

3.3.1. Otoregresyon (Auto Regression) Modelleri AR (p)

Ölçülen rüzgar hızı değerleri bir zaman serisi olarak alındığında, V_t rastsal değişken kabul edilerek, V_t zaman serisinin p dereceden, stokastik sürecin otoregresif istatistiksel modeli AR (p);

$$V_t = \delta + \phi_1 V_{t-1} + \phi_2 V_{t-2} + \dots + \phi_p V_{t-p} + e_t \quad (3.7)$$

Eşitlik 3.7 bağıntısıyla verilmektedir. Burada δ ; fonksiyonun sabit terimini, ϕ_p ; $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ bilinmeyen otoregresif katsayıları ve e_t : hata terimini temsil etmektedir.

Hatalar, ortalaması 0 (sıfır) ve σ_e^2 varyanslı bağımsız rastsal değişkenler olarak kabul edilmektedir. Model birinci dereceden ise, V_t 'nin kendinden önceki değerin yani V_{t-1} ve e_t hata teriminin fonksiyonu olması yani bu iki terimin ve sabit terimin toplamı olarak tahmin edilmesidir. Bu stokastik model, AR(1) süreci olarak bilinir.

$$V_t = \delta + \phi_1 V_{t-1} + e_t \quad (3.8)$$

Eşitlikde δ sabit terimi (kesme parametresini), ϕ_1 , -1 ile +1 arasında otoregresif katsayıyı ve e_t ise ortalaması sıfır olan ve sabit σ_e^2 varyanslı korelasyonsuz hata terimidir.

$$V_t = \delta + \phi_1 V_{t-1} + \phi_2 V_{t-2} + e_t \quad (3.9)$$

Eşitlik 3.9'da ϕ_1, ϕ_2 katsayıları -1 ile +1 arasında değeri olan otoregresif katsayılar ve e_t ise ortalaması sıfır ve σ_e^2 varyanslı korelasyonsuz hata terimidir.

3.3.2. Hareketli Ortalama (Moving Average) Modelleri MA (q)

Hareketli ortalama süreci olarak bilinen zaman serisinin t dönemdeki değerinin, rastsal bir değişken olarak tanımlanan hata(kalıntı)ların ve geçmiş dönemdeki değerlerin kayan ortalaması olarak ifade edilen bir süreç olarak bilinmektedir [69]. Matematiksel olarak;

$$V_t = \mu + \theta_1 e_{t-1} + \theta_2 e_{t-2} + \dots + \theta_q e_{t-q} + e_t \quad (3.10)$$

Eşitlik 3.10 ile ifade edilir. Burada MA modelinde μ , zaman serisi V_t 'nin ortalamasını, $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ parametreleri kayan ortalamalar lineer regresyon denklemi katsayılarını ve e_t ise ortalaması sıfır ve σ_e^2 varyanslı hata terimini ifade eder. Eşitlik 3.11 MA (1) ve Eşitlik 3.12 ise MA (2) model formülleri olarak kullanılmaktadır.

$$V_t = \mu + \theta_1 e_{t-1} + e_t \quad (3.11)$$

$$V_t = \mu + \theta_1 e_{t-1} + \theta_2 e_{t-2} + e_t \quad (3.12)$$

3.3.3. Otoregresyon ve Kayan Ortalama Modelleri ARMA (p,q)

Durağan olan bazı rassal süreçler, tek otoregresif veya tek hareketli ortalama süreci ile modellenemeyebilir; böyle durumlarda zaman serisi iki süreci içerebilir. Zaman serisi modeli AR ve MA bileşenli p ve q dereceli ARMA (p,q) şeklinde modellenebilir. Model matematiksel olarak Eşitlik 3.13 ile ifade edilebilmektedir.

$$V_t = \delta + \phi_1 V_{(t-1)} + \dots + \phi_p V_{(t-p)} + \theta_1 e_{(t-1)} + \dots + \theta_q e_{(t-q)} + e_t \quad (3.13)$$

Eğer bir zaman serisi d kez farkı alındığında durağanlaşıyorsa yani zaman serisi d fark alma ile ARMA(p,q) süreci ile modellenabiliyorsa bu modele de otoregresif tümleşik kayan ortalama süreci denir ve (autoregressive integrated moving average) ARIMA(p,d,q) ile gösterilir. ARIMA (p,d,q) modeli AR(p), MA(q) ve ARMA(p,q) modellerini kapsayıcı özelliği vardır. Misal olarak, bir ARMA(1,1) modeli ARIMA(1,0,1) şeklinde yazılabileceği gibi, bir MA(3) modeli de ARIMA(0,0,3) biçiminde yazılabilir [68].

3.3.4. Stokastik Süreç Modelini Oluşturma Adımları

Zaman serisi modeli oluşturmada, Box-Jenkins yaklaşımının temel fikri, zaman serisi verilerinin özelliklerini ortaya koyan en uygun sayıda parametre veya serbestlik derecesini bulunduran bir model kurmayı öngörmektir. Bu yaklaşımda temel adımlar; zaman serisi modelinin belirlenmesi, model parametrelerinin tahmini, modelin test edilmesi ve modelin tahminde kullanılması olarak dört aşamalıdır [69].

3.3.4.1. Modelin Belirlenme Adımı

Modeli belirleme aşamasında ilk olarak hesaplanan otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon fonksiyonlarına bağlı olarak örneklem verilerine uygun deneme

ARIMA modeli belirlenir. Model derecesi tesbitinde zaman serisinin otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon fonksiyonları kullanılır. AR modeli ve MA modelinde sırasıyla anlamlı kısmi otokorelasyon ile otokorelasyon katsayılarının adedi model derecesi kabul edilmektedir [45].

Hesaplamalarda otokorelasyon AR (p) parametreleri (katsayıları) üstel biçimde sıfıra yaklaşabilir ve otokorelasyon parametrelerinin sıfıra yakınsaması genellikle p gecikme sonunda gerçekleşmektedir. Hesaplanan MA (q) modellerinde kısmi otokorelasyon katsayılarının genel itibari ile q gecikme sonunda sıfır değerine ulaşmakta ve yine kısmi otokorelasyon katsayıları da üstel biçimde sıfıra yakınsamaktadır. Otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon parametreleri bazı durumlarda sinüsoidal dalgalanma yapısında da olabilmektedir. Benzer şekilde ARMA(p,q) modellerinin hesaplanan otokorelasyon katsayıları ve kısmi otokorelasyon katsayılarının değerleri üstel veya sinüzoidal dalgalanmalar ile sıfıra yakınsayabilmektedirler [45].

3.3.4.2. Model Parametreleri Tahmini Adımı

Otoregresif ve hareketli ortalama modelleri belilenmesinden sonra, parametre kestiriminde en küçük kareler yönteminden faydalanılmaktadır. Hata terimlerinin frekansları incelendiğinde, normallik gösteren dağılımlarda parametre tahmini için Maksimum Benzerlik yöntemi de kullanılmaktadır [43].

AR ve MA modellerinin parametrelerinin istatistiksel olarak anlamlı olmaları lazımdır. Model parametreleri için t-testi ile anlamlılığı belirlenmektedir, test sonucu anlam ifade etmeyen parametreler modelden çıkartılmak suretiyle tekrar tekrar model parametreleri hesaplanır. Kestirilen parametrelerin, istatistiksel anlamlılık, durağanlık ve çevrilebilirlik sınırları dahilinde olması önem arz etmektedir [45].

3.3.4.3. Modelin Uygunluk Test Edilme Adımı

Son adımda gözlem serisi ile modelden üretilen tahmin değerlerinin, zaman serisi grafiği kıyaslanır. Ayrıca gözlem verileri ile üretilen tahmin değerlerinin otokorelasyon fonksiyonları incelenebilmektedir [45].

3.3.4.1. Modelin Tahminde Kullanılması Adımı

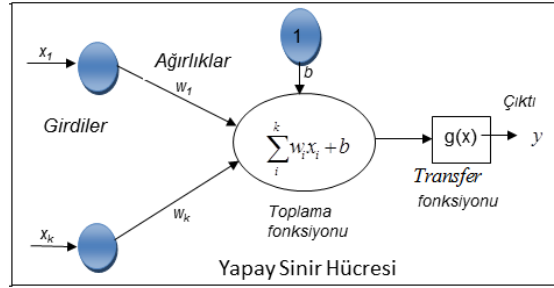
AR, MA, ARMA ve ARIMA modellerinin parametrelerinin istatistiksel olarak anlamlı olmaları durumunda veriler işlenerek gerekli tahminlerin yapıldığı adımdır.

3.4. YAPAY SİNİR AĞI (YSA) MODELİ

Mühendislik tasarım çalışmalarında; biyolojik sistemler çoklukla taklit edilerek, insanların ihtiyaçlarını daha az enerji harcayacak ve daha çok iş üretecek alet veya sistemler üretilmesi amaçlanmaktadır. Hayatta yüzleştığımız ve arka planda nasıl işlediğini (hedef fonksiyon) bilmediğimiz problemlerin modellerini gerçekleştiremeyiz. Böyle durumlarda problem ait geçmiş bilgiler kullanılarak hedef fonksiyon yada model oluşturulmaya çalışılır. Öğrenen biyolojik sistem olan insan beyni sinir ağlarından aldığı verileri kullanarak karar verir ve bilgi elde eder. İnsan beyninde aşağı yukarı 6 milyar nöron olduğu ve bunlar arasında 60 trilyon civarında bağlantı (sinaps) olduğu düşünülmektedir. Tek sinir hücresinin gerçekleştireceği bir iş bu sinir hücresine farklı hücrelerden sinapslar ile gelen sinyallere yani giriş bilgilerine bağlıdır. Sinapsların bir ağırlık değeri olup, bir tane nöron yapay sinir hücresi olarak modellenebilmektedir (Şekil 3.8). Yapay sinir hücresinde temel olarak beş eleman bulunur. Bu elemanlar, girdiler, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, transfer fonksiyonu ve çıktılardır [70,71]. Tek nörondan meydana gelen yapay sinir hücresi algılayıcı (perceptron) olarak tanımlanır ve birden fazla algılayıcının bir araya getirilmesiyle, bu ağı kullanarak öğrenmenin gerçekleştirilmesi ana amaçtır. Algılayıcılar (Perceptronlar) katmanlar halinde birleştirilerek, tek katmanda birleşen perceptronlar doğrusal olmayan problemlerin çözümünü veremez. Diğer bir ifade ile doğrusal olmayan problemlerin çözümünde birden çok katmanda yer alan perceptronlardan meydana gelen yapay sinir ağlarından faydalanmak gereklidir.

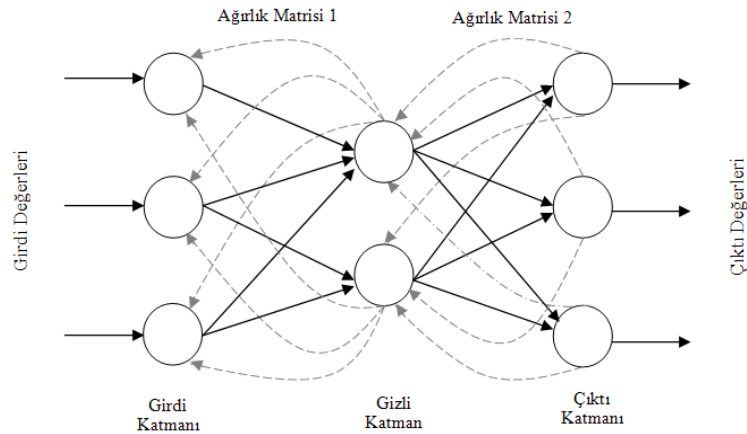
Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA) ağında en temel düzeyde, bir giriş katmanı bir gizli katman ve çıkış katmanı bulunur (Şekil 3.9). Gizli katmanların adedi probleme bağlı

olarak birden çok olabilir. ÇKA ağlar, giriş verilerinin çıkış katmanına doğru ileri yönde işlemlerin devam ettiği ileri beslemeli (feed forward) yapıdadır.



Şekil 3.8. Yapay sinir hücresi.

Katmanlardaki fonksiyonlar farklı olabilir. Doğrusallık içermeyen mühendislik problemlerinde eşik değer veya sert eşikleme oluşturan fonksiyonlar değil de sigmoid yada hiperbolik tanjant fonksiyonlarına benzer yumuşak eşikleme değerleri olan lojistik fonksiyonlardan faydalanılır. ÇKA ileri beslemeli ağların mühendislik uygulaması olarak sınıflandırma, teşhis etme, yorumlama, tahmin ve örüntü tanıma problemlerini çözmede kullanılmaktadır [71].



Şekil 3.9. Çok katmanlı YSA yapısı.

ÇKA ağında yapay sinir hücreleri arası bağlantı ağırlıklarına giriş verileri rasgele verildikten sonra bu ağın eğitimi sağlanır. Eğitim süreci ÇKA ağının ağırlık değerlerinin ayarlanması ve performansını optimize etme sürecidir. Bu optimizasyonun hata ölçütü Hata Kareleri Ortalamasıdır (HKO). Bu ölçüt ile performans ölçümünde veri setindeki her gözlem değeri gerçek çıkış (y) ile

tahminlenen çıkış (y_m) arasındaki farkın kareleri toplanarak ortalaması alınarak hesaplanan HKO (mean square errors MSE) fonksiyonu Eşitlik 3.14 ile verilmektedir.

$$E = MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{mi} - y_i)^2 \quad (3.14)$$

ÇKA ileri beslemeli ağların eğitiminde kullanılan optimizasyon yöntemlerinin başlıcaları, performans kriteri sonuçları ile ağın ağırlıkları eğimini kullanan, en dik iniş (steepest descent) metodu ve diğeri ise örnek hataları ile ağın ağırlıklarına dayalı eğimlerden meydana gelen Jacobian matrisinden faydalanan Gauss-Newton metodunu sayabiliriz.

İleri yönlü hesaplanan çıktılar ÇKA çıkışında hesaplanan hatalara dayanan eğim yada Jacobian matrisi, geriye doğru hesaplanarak geriye yayılım (backpropagation) algoritması ile bulunur. Elde edilen eğimlere bağımlı gereken ağırlık düzenlemeleri yapılır.

Bir gizli katmanı olan ÇKA ağında giriş katmanındaki sinir hücreleri i , gizli katmandaki sinir hücreleri j ve çıkış katmanındaki sinir hücreleri k indisi ile temsil edildiğinde ve sinir hücrelerinde sigmoid fonksiyon aktivasyon için kullanılırsa n adım tekrarlanan işlem için geri yayılım algoritması ağırlık güncellemesi aşağıdaki gibi gerçekleşir [72]:

- i) İleri yönde hesaplama ile ağın çıktıları $y_k(n)$ hesaplanır.
- ii) Gizli katman ile çıkış katmanını birleştiren ağırlıkların güncellenmesi:

Çıktıya bağlı hesaplanan çıkış katmanı sinir hücreleri hataları Eşitlik 3.15 ile elde edilir. Bundan sonra çıkış katmanındaki yapay sinir hücreleri yerel eğimleri Eşitlik 3.16'da verildiği gibi hesaplanır.

$$e_k(n) = y_{mk}(n) - y_k(n) \quad (3.15)$$

$$\delta_k(n) = e_k(n)\theta'(V_k(n)) \quad (3.16)$$

Bu Eşitliklerde θ , aktivasyon fonksiyonu ve V ise yapay sinir hücresine gelen toplam sinyaldir. Eşitlik 3.16'ya göre aktivasyon fonksiyonun türevi alınır. Aktivasyon sigmoid fonksiyonu ile sağlandığından buradan Eşitlik 3.17 elde edilir. Bundan sonra hesaplanan yerel eğim kullanılarak, çıkış ile gizli katman arasındaki ağırlık değerleri Eşitlik 3.18'de verilen formülle tekrar hesaplanır.

$$\delta_k(n) = e_k(n)y_k(n)(1 - y_k(n)) \quad (3.17)$$

$$\Delta W_{kj}(n) = \eta \delta_k(n)y_j(n) \quad (3.18)$$

iii) Giriş katmanı- gizli katman bağlantı ağırlıklarının hesaplanması:

Gizli katmandaki sinir hücresi hatası, çıkış katmanındakiler gibi kolay hesaplanamaz. Bu hesaplamadaki formül Eşitlik 3.19'da verilmiştir. Aktivasyon fonksiyonu olan sigmoid fonksiyonu için hesaplama Eşitlik 3.20 ile yapılır. Bundan sonra hesaplanan yerel eğimden faydalanarak giriş ile gizli katman arasındaki ağırlıklar Eşitlik 3.21'de verilen formülle hesaplanır.

$$\delta_j(n) = \theta'(V_j(n)) \sum_k \delta_k(n)W_{kj}(n) \quad (3.19)$$

$$\delta_j(n) = y_j(n)(1 - y_j(n)) \sum_k \delta_k(n)W_{kj}(n) \quad (3.20)$$

$$\Delta W_{ji}(n) = \eta \delta_j(n)y_i(n) \quad (3.21)$$

Optimizasyon gerçekleştirmede eğim düşümü yerine Gauss-Newton metodu kullanılırsa eğim yerine, örneklerden hesaplanan hataların eğimlerinden (ağın ağırlıklarından hesaplanan birinci türevler) oluşan Jacobian matrisinden faydalanılır. Ağın boyutu m ve veri setinde n adet örnek varsa o zaman n adet hata vektörü aşağıdaki Eşitliklerle hesaplanır;

$$\overrightarrow{\nabla e(1)} = \left[\frac{\partial e(1)}{\partial W_1} \quad \frac{\partial e(1)}{\partial W_2} \quad \dots \quad \frac{\partial e(1)}{\partial W_m} \right]^T \quad (3.22)$$

$$\overrightarrow{\nabla e(2)} = \left[\frac{\partial e(2)}{\partial W_1} \quad \frac{\partial e(2)}{\partial W_2} \quad \dots \quad \frac{\partial e(2)}{\partial W_m} \right]^T \quad (3.23)$$

$$\overrightarrow{\nabla e(n)} = \left[\frac{\partial e(n)}{\partial W_1} \quad \frac{\partial e(n)}{\partial W_2} \quad \dots \quad \frac{\partial e(n)}{\partial W_m} \right]^T \quad (3.24)$$

Yani $m \times n$ boyutlu eğim matrisi aşağıdaki şekilde hesaplanmış olur:

$$\overrightarrow{\nabla e} = [\overrightarrow{\nabla e(1)} \quad \overrightarrow{\nabla e(2)} \quad \dots \quad \overrightarrow{\nabla e(n)}] \quad (3.25)$$

Eğim matrisinin transpozu Jacobian matrisi olarak tanımlanır (Eşitlik 3.26) ve $n \times m$ boyutludur. Gauss-Newton metodunda ağırlıkların hesaplanmasında kullanılan formül Eşitlik 3.27’de verilmiştir. Bu Eşitlikde μ sabit katsayı ve I ise köşegen matristir. Formüle $\mu.I$ çarpımının bulunmadığındaki maksat $J^T J$ çarpımını tersinin alınabilir hale getirmektir.

$$\vec{J} = \overrightarrow{\nabla e}^T \quad (3.26)$$

$$\vec{W}(n+1) = \vec{W}(n) - (\vec{J}^T(n)\vec{J}(n) + \mu I)^{-1} \vec{J}^T(n) \vec{e}(n) \quad (3.27)$$

3.5. ÖNERİLEN ANALİTİK YAKLAŞIM MODELLERİ

Rüzgar hızı tahminleri üç farklı bağlamda; frekans, zaman ve alana dayalı olarak yapılabilirler. Rüzgar enerjisi frekans tahminlerinde istatistik yöntemler ve yapay sinir ağları kullanılmaktadır. Günümüzde, yapay sinir ağları (YSA: ANN), hava tahmininde çok yaygın kullanılmaktadır. YSA’lar kara kutu modeli gibi çalışır, büyük miktarda veriler tarafından eğitilirler. Ayrıca fark alma veya veri dönüşümü gibi ilave veri düzenlemesine ihtiyaç duymazlar [65]. Zaman eksenindeki tahminler ise zamana eksenindeki saatler veya günler için yapılan tahminleri içermektedir. Bu amaç için bir

yıllık rüzgar hızını günlük ortalmalar şeklinde, sentetik rüzgar hızları üretmek için Eşitlik 3.28 önerilmiştir. Eşitlik 3.28’de n , bir yıldaki 365 günün gün numarasını ve μ ile σ bir haftalık geçmiş (geçmiş yıl yada şu andan bir hafta öncesi) verilerin ortalama ve standart sapma değerlerini kullanarak sonraki günün ortalama rüzgar hızını tahmin etmektedir. Bu yöntem kullanılarak bazı ölçüm istasyonlarının eksik veriler tamamlanabilir veya tahmin amacıyla kullanılabilir. Bir yılın günlük ortalama rüzgar hızının tahmini için gün bazında tahmin denklemi aşağıdaki şekilde önerilmiştir.

3.5.1. Rüzgar Hızı Günlük Ortalama Tahmin Yöntemi

Günlük ortalama rüzgar hızının bir yıllık periyotta tahmin formülü Eşitlik 3.28 ve Eşitlik 3.29 ile verilmektedir [17].

$$V_n = \mu + a \left(1 + \sin \left(\frac{n\pi}{180} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \sigma + V_{n-1} f_w(V_{n-1}) \quad (3.28)$$

$$V_n = \bar{V}_{n-1} + a \left[\sin \left(\frac{n\pi}{180} - \frac{\pi}{2} \right) \right] \sigma + b\sigma + e \quad (3.29)$$

Bu tez çalışmasında Eşitlik 3.29 ile verilen formül için hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalar için en küçük kareler yöntemi ile formül katsayılarını bulmak için Eşitlik 3.30’un bilinmeyen katsayıları göre birinci dereceden kısmi türevleri alınıp sıfıra eşitlenerek elde edilen Eşitlik 3.31 denklem sisteminden a ve b sayıları elde edilir.

$$e^2 = \left\{ \bar{V}_{n-1} + a \left[\sin \left(\frac{n\pi}{180} - \frac{\pi}{2} \right) \right] \sigma + b\sigma - V_n \right\}^2 \quad (3.30)$$

$$\begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N \left[\sin^2 \left(\frac{n\pi}{180} - \frac{\pi}{2} \right) \right] \sigma^2 & \sum_{n=1}^N \left[\sin \left(\frac{n\pi}{180} - \frac{\pi}{2} \right) \right] \sigma^2 \\ \sum_{n=1}^N \left[\sin \left(\frac{n\pi}{180} - \frac{\pi}{2} \right) \right] \sigma^2 & \sum_{n=1}^N \sigma^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N (V_n - \bar{V}_{n-1}) \sin \left(\frac{n\pi}{180} - \frac{\pi}{2} \right) \sigma \\ \sum_{n=1}^N (V_n - \bar{V}_{n-1}) \sigma^2 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$a = \frac{\left(\sum_{n=1}^N \sin^2\left(\frac{n\pi}{180} - \frac{\pi}{2}\right) \sigma^2\right) \left(\sum_{n=1}^N (V_n - \bar{V}_{n-1}) \sigma^2\right) - \left(\sum_{n=1}^N \sin\left(\frac{n\pi}{180} - \frac{\pi}{2}\right) \sigma^2\right) \left(\sum_{n=1}^N (V_n - \bar{V}_{n-1}) \sin\left(\frac{n\pi}{180} - \frac{\pi}{2}\right) \sigma\right)}{\left(\sum_{n=1}^N \left[\sin^2\left(\frac{n\pi}{180} - \frac{\pi}{2}\right)\right] \sigma^2\right) \left(\sum_{n=1}^N \sigma^2\right) - \left(\sum_{n=1}^N \left[\sin\left(\frac{n\pi}{180} - \frac{\pi}{2}\right)\right] \sigma^2\right)^2}$$

$$b = \frac{\left(\sum_{n=1}^N (V_n - \bar{V}_{n-1}) \sin\left(\frac{n\pi}{180} - \frac{\pi}{2}\right) \sigma\right) \left(\sum_{n=1}^N \sigma^2\right) - \left(\sum_{n=1}^N \sin\left(\frac{n\pi}{180} - \frac{\pi}{2}\right) \sigma^2\right) \left(\sum_{n=1}^N (V_n - \bar{V}_{n-1}) \sigma^2\right)}{\left(\sum_{n=1}^N \left[\sin^2\left(\frac{n\pi}{180} - \frac{\pi}{2}\right)\right] \sigma^2\right) \left(\sum_{n=1}^N \sigma^2\right) - \left(\sum_{n=1}^N \left[\sin\left(\frac{n\pi}{180} - \frac{\pi}{2}\right)\right] \sigma^2\right)^2}$$

Bu Eşitlik için Karabük ili 5 yıllık günlük ortalama hız verileri eğrisinden esinlenilmiştir (Şekil 2.17 ve Şekil 2.18).

3.5.2. Rüzgar Hızı Saatlik Ortalama Tahmin Yöntemi

Aynı şekilde 5 yılın yirmi dört saatlik hız veri grafiklerinden hareketle de Eşitlik 3.29 geliştirilmiştir. Zaman bazlı tahminler ise zamana ekseninde gelecek saatler veya günler için yapılacak tahminleri kapsamaktadır. Bu anlamda gün bazında ortalama saatlik sentetik rüzgar hızları üretmek için aşağıdaki Eşitlik 3.34 önerilmiştir. Yine bu formülle gün bazında saatlik eksik veriler tamamlanabilir. Yıllık ortalama rüzgar hızının gün ve saat bazında tahmin formülü saatlik ortalama rüzgar hız tahmini için Eşitlik 3.32 ve 3.34 verilmiştir. Bu tez çalışmasında Eşitlik 3.24 ile verilen formül için hesaplamalar yapılmıştır. Eşitlik 3.35 kullanılarak en küçük kareler yöntemi ile c ve d katsayıları, Eşitliğin bilinmeyen katsayılarına göre birinci dereceden kısmi türevleri alınıp sıfıra eşitlenerek, 3.39 denklem sisteminden elde edilir [17].

$$V_{t,n} = \bar{V}_{t,(n-1)} \left(1 + V_{t,(n-1)} * \cos(z_t * \pi) * f_w(V_{t,(n-1)}, k, c)\right) \quad (3.32)$$

$$z_t = \frac{t - t_{pik}}{t_{pik}} ; t = 0, 1, \dots, 23; (t_{pik} \text{ gün içinde hızın tepe nokta saati}) \quad (3.33)$$

$$V_{t,n} = \bar{V}_{t,(n-1)} (1 + c * \cos(z_t * \pi)) + d\sigma_{n-1} + e \quad (3.34)$$

$$e^2 = [\bar{V}_{t,(n-1)} (1 + c * \cos(z_t * \pi)) + d\sigma_{n-1} - V_{t,n}]^2 \quad (3.35)$$

$$[\bar{V}_{t,(n-1)}(1 + c * \cos(z_t * \pi)) + d\sigma_{n-1} - V_{t,n}]\bar{V}_{t,(n-1)}(\cos(z_t * \pi)) \quad (3.36)$$

$$[\bar{V}_{t,(n-1)}(1 + c * \cos(z_t * \pi)) + d\sigma_{n-1} - V_{t,n}]\sigma_{n-1} \quad (3.37)$$

$$\begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N [\bar{V}_{t,(n-1)}(\cos(z_t * \pi))]^2 & \sum_{n=1}^N \bar{V}_{t,(n-1)}(\cos(z_t * \pi))\sigma_{n-1} \\ \sum_{n=1}^N \bar{V}_{t,(n-1)}(\cos(z_t * \pi))\sigma_{n-1} & \sum_{n=1}^N \sigma_{n-1}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N (V_{t,n} - \bar{V}_{t,(n-1)})(\cos(z_t * \pi))\sigma_{n-1} \\ \sum_{n=1}^N (V_{t,n} - \bar{V}_{t,(n-1)})\sigma_{n-1} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

V_n , tahmin edilecek gün ortalamasını $\bar{V}_{n-1}$ ve $\sigma_{V_{n-1}}$; ise ilk formülde bir haftalık ortalamayı ve standart sapmayı, ikinci formülde ise tahminden önceki 48 saatlik ortalamayı ve standart sapmayı, $V_{t,n}$ saate bağlı olarak tahmin edilen saatlik ortalama tahmin rüzgar hızını, t_{pik} ve t ; ise gün içinde hızın en yüksek olduğu saati ve tahmin edilen saati vermektedir. Buradaki a , b , c ve d ise reel katsayılarıdır.

3.6. RÜZGAR HIZ DAĞILIMI TAHMİN MODELLERİ

Herhangi bir bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesinde uzun süreli rüzgâr hızı ölçüm verileri ile RES kurulum bölgesinin enerji potansiyeli matematiksel modelleme yöntemleriyle kolay bir şekilde analiz edilebilir. Modelleme yöntemi, problemleri ve olayları anlama, anlamlandırma ve çözümleme sürecinde problemle ilgili durumları anlaşılır ve daha basit hale getirme, sistemleştirme ve organize ederek ilişkileri fonksiyonlar ile ifade eden modeller kullanma ve şemalar oluşturma sürecidir [73]. Rüzgar enerjisi potansiyeli alanında da kullanılan matematiksel modelleme yöntemi tüm mühendislik ve bilimsel problemlerde kullanılan bir yöntemdir.

Rüzgar enerjisi tahmin alanındaki çalışmalar; rüzgar hız frekansına dayalı rüzgar enerjisi potansiyeli hesaplamaları ve rüzgar hızı zaman eksenli tahmin çalışmaları olmak üzere temel olarak ikiye ayrılabilir [42]. Literatür incelendiğinde çok sayıda çalışma ile karşılaşmak mümkündür [4,40,63,74,75].

Bu tür rüzgar hız frekansına dayalı çalışmalarda maksat, ölçüm yapılan bölgenin rüzgar karakteristiğini araştırmaktır. Rüzgar hızı verilerinin frekans dağılımları Weibull, Rayleigh vb. olasılık dağılım fonksiyonları ile modellenmektedir [76].

Dağılım fonksiyonları ve rüzgar enerjisi potansiyeli üzerine birçok çalışma yapılmıştır [59,77-83]. Rüzgâr türbinlerinin kurulumu ve rüzgar enerjisi potansiyelinin fizibilite araştırması üzerine Dünyada ve Türkiyede çok sayıda çalışma bulunmaktadır, bazıları: Türkiye [79,84], Yunanistan [85,86], Almanya [87], İtalya [59], İspanya [40], İran [88-92] Suudi Arabistan [93,94], ... vb.

Dağılımlar ve özellikle de Weibull dağılımı üzerine yapılan çalışmalar üç kategoriye ayrılabilirler. Birinci kategorideki çalışmalar rüzgar hızı frekansı karakterizasyonu ve potansiyel hesabı üzerinedir [35,40,48,77,79], ikinci kategoride ise Weibull dağılımı (veya diğer olasılık dağılım fonksiyonları) modifikasyonları üzerine çalışmalar [94,95]. Üçüncü kategorideyse dağılım parametrelerinin tahminlenmesi üzerine yapılan çalışmalar vardır [96-100].

3.6.1. Weibull Dağılımı ve Parametre Kestirim Formülleri

Rüzgâr enerjisi potansiyelinin hesaplamalarında ve analizlerinde kullanılan matematiksel modellemelerden en yaygın kullanılanı Weibull olasılık dağılım fonksiyonudur. Weibull olasılık dağılım fonksiyonu ifadesi;

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad a > 0, c > 0, v > 0 \quad (3.39)$$

Eşitlik 3.39’da verilmiştir, burada f rüzgar hızı verileriyle ilişkili olasılık fonksiyonunu temsil etmekte, k şekil parametresi, c ölçek parametresi olup v ise gözlemlenen rüzgar hızı sınıfının sınıf orta değeridir. Rüzgar hız ölçümleri sınıflandırılmış/gruplandırılmış veri tablosunda [0-0,5), m/s arası hız ölçümleri 0 ile [0,5-1,5) m/s arasındakiler 1 ile, [1,5-2,5) m/s arasındakiler 2 ile, ..., [24,5-25,5) arası hız ölçümleri 25 m/s hız ile temsil edilmektedir [42]. İki parametrelili birikimli Weibull dağılım fonksiyonu Eşitlik 3.40’da gösterildiği gibidir.

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (3.40)$$

Weibull dağılımı, şekil parametresinin değerlerine bağlı olarak çok değişik dağılım şekilleri veren esnek ve kullanışlı dağılımdır. Weibull dağılımının parametrelerinin tahmin yöntemleri üzerine literatürde hayli fazla çalışma vardır [14,40,41,100-105].

3.6.1.1. Maksimum Olabilirlik Metodu (MOM)

Maksimum olabilirlik Metodunda titiz sayısal iterasyon gereklidir. Bu metot, küçük veri örnekleri için uygun değildir. MOM uygulamalarında ilk tahmin seçimi önemlidir, metot ilk tahmin değerine karşı duyarlıdır. Weibull dağılımına MOM metodunun uygulanması ile dağılım parametreleri k ve c Eşitlik 3.41 verilen formüller ile; Newton Raphson yöntemiyle k bulunup, k parametresi kullanılarak c ölçek parametresi hesaplanır [41].

$$k = \left[\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right]^{-1} \quad \& \quad c = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^k \right)^{1/k} \quad (3.41)$$

3.6.1.2. Modifiye Maksimum Olabilirlik Metodu (MMOM)

Bu metod, frekans dağılım biçiminde mevcut rüzgar hız verileri için kullanılır. Eşitlik 3.42 sayısal yöntemlerle çözülerek dağılım parametreleri elde edilir.

$$k = \left[\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln(v_i) f(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k f(v_i)} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i) f(v_i)}{f(v \geq 0)} \right]^{-1} \quad \& \quad c = \left[\frac{1}{f(v \geq 0)} \sum_{i=1}^n v_i^k f(v_i)^{1/k} \right] \quad (3.42)$$

3.6.1.3. WasP Metodu

Bu yazılımda şekil ve ölçek parametreleri, gama fonksiyonuna verilen k değerleri için en küçük hatayı veren şekil parametresi için, k şekil ve c ölçek parametrelerini Eşitlik 3.43 bağıntıları ile bulmaktadır[41].

$$\sum_{k=1}^n \left[W_{v_i} - e^{-\left\{ \frac{(v_i-1) \left[\Gamma\left(1+\frac{3}{k}\right) \right]^{\frac{1}{3}}}{(v_m^3)^{\frac{1}{3}}} \right\}^k} + e^{-\left\{ \frac{(v_i) \left[\Gamma\left(1+\frac{3}{k}\right) \right]^{\frac{1}{3}}}{(v_m^3)^{\frac{1}{3}}} \right\}^k} \right] = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{v_i}^2 \quad (3.43)$$

$$\& \quad c = v_m^3 / \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)$$

3.6.1.4. En Küçük Kareler Metodu

En Küçük Kareler Metodu veya grafik metodu, istatistiksel tahmin alanında en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. İki parametrelili Weibull dağılımının kümülatif dağılım fonksiyonu Eşitlik 3.40 ile verilen ifadenin, logaritması alınarak ve gerekli cebirsel işlemler yapılarak elde edilir. Bu Eşitlik 3.44 ifadesi Weibull birikimli dağılım fanksiyonun doğrusallaştırılmış halidir. Hata kareleri toplamını minimize etmek için, Eşitlik 3.45 ifadesinin k ve c parametrelerine göre birinci türevi alınıp sıfıra eşitlenerek oluşan denklem sisteminden, Weibull dağılım parametreleri k ve c hesaplanabilir. Gerekli işlemler yapılarak parametrelerin hesabı için Eşitlik 3.46 ve Eşitlik 3.47 elde edilir [42].

$$\ln(-\ln(1 - F(v_i))) = -k \ln c + k \ln v_i \quad (3.44)$$

$$\sum_{i=1}^n [\ln(-\ln(1 - F(v_i))) - [-k \ln c + k \ln v_i]]^2 \quad (3.45)$$

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n (\ln v_i) [\ln(-\ln(1 - F(v_i)))] - \sum_{i=1}^n \ln v_i \sum_{i=1}^n \ln[-\ln(1 - F(v_i))]}{n \sum_{i=1}^n \ln(v_i^2) - [\sum_{i=1}^n \ln v_i]^2} \quad (3.46)$$

$$c = \exp \left[\frac{k \sum_{i=1}^n \ln v_i - \sum_{i=1}^n \ln(-\ln(1 - F(v_i)))}{n \cdot k} \right] \quad (3.47)$$

3.6.1.5. Moment (Ortalama ve Standart Sapma) Metodu

Moment metodu (MM) en eski tahmin tekniğidir. Bu teknik parametre sayısı kadar moment hesabının, sıfıra veya ortalamaya göre gerçek veriler ve modelle hesaplama sonuçlarının bir birine eşitlenmesi ilkesine dayanır. Bu tahminde, sıfırın etrafında dağılımın birinci ve ikinci momentleri, Weibull dağılımından elde edilenler ve gerçek değerlerden elde edilenlere eşitlenerek k ve c parametreleri hesaplanır. Metodun sadeliği en önemli avantajıdır. Yapılan cebirsel işlemler ile elde edilen Eşitlik 3.48 ve Eşitlik 3.49 ile hesaplanabilir [41].

$$\bar{v} = c \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad \& \quad \sigma = c \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{k} \right) \right]^{1/2} \quad (3.48)$$

$$\bar{v} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \right] \quad \sigma = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2 \right]^{1/2} \quad (3.49)$$

$$\& \quad \Gamma(x) = \left[\int_0^\infty t^{x-1} \exp(-t) dt \right]^{1/2}$$

3.6.1.6. Moment (Empirik /Yaklaşım) Metodu

Moment metodunun özel bir durumu olarak kullanılır. Hesabı kolaydır ve gerçek verilerin ortalama ve standard sapmasına bağlı olup, empirik Eşitlik 3.50 ile şekil

parametresi k ve gamma fonksiyonu ile ölçek parametresi c kolayca hesaplanır. Hesaplamalar Eşitlik 3.50 de verilen bağıntılarla yapılmaktadır [41].

$$k = (\sigma/\bar{v})^{-1,086} ; \text{ eğer } 1 \leq k \leq 10 \text{ \& } c = \bar{v}/\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (3.50)$$

3.6.1.7. Güç Yoğunluğu Metodu (GYM)

Güç Yoğunluğu Metodu (GYM: Wind Energy Pattern Factor WEPF), mevcut aylık ve yıllık rüzgar hız verileriyle belirlenir. GYM, belirli bir zamanda ulaşılabilir rüzgar gücünü hesaplamak için önemli bir parametredir. Hesaplamalar Eşitlik 3.51 ile yapılır.

$$WEPF = \bar{v}^3/\bar{v}^3, k = 1 + [3.69/(WEPF)^2] \text{ \& } P = [\rho.A.(WEPF).v^3]/2 \quad (3.51)$$

Tüm hesaplamalarda kullanılan birikimli olasılıklar Eşitlik 3.52 de verildiği şekilde oransal olarak rüzgar verilerinin sıklık tablolarından elde edilir [41].

$$F(v_j) = \sum_{i=1}^j f(v_i) \text{ \& } f(v_i) = f_i/(\sum_{i=1}^N f_i) = f_i/n; \text{ burada, } j \leq i \text{ ve } i = 1,2,3, \dots N \quad (3.52)$$

3.6.2. Üç Parametrelili Genelleştirilmiş Gamma Dağılımı

Üç parametrelili genelleştirilmiş gamma dağılımı fonksiyonu Eşitlik 3.53 ile verilmektedir.

$$f(v, \alpha, \beta, \eta) = \frac{\alpha v^{\eta-1}}{\beta^{-\frac{\eta}{\alpha}} \Gamma(\frac{\eta}{\alpha})} e^{(-\beta v^\alpha)} \quad (3.53)$$

Dağılım fonksiyonunda, α ve η şekil parametresi, $\beta^{-1/\alpha}$ ölçek parametresi olarak tanımlanmaktadır. Hesaplama da kullanılan $\Gamma(.)$ fonksiyonu Euler'in gama fonksiyonudur. Parametrelerin değerleri, maksimum olabilirlik metodu ile Eşitlik 3.54 verilen denklem sistemleri çözülerek bulunur.

$$T_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i)^\alpha, \quad T_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i)^\alpha \ln(v_i), \quad T_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(v_i) \quad (3.54)$$

$$\alpha T_3 - \ln[\alpha(T_2 - T_1 T_3)] - \psi\left[\frac{T_1}{\alpha(T_2 - T_1 T_3)}\right] = 0 \quad (3.55)$$

Dağılım parametrelerinden α 'nın hesabı Eşitlik 3.55'in Newton Raphson veya Bisection metodu ile çözülmesiyle elde edilir. Burada $\psi(.)$ Digamma sonksiyonudur.

$$\beta = \frac{1}{\alpha(T_2 - T_1 T_3)} \text{ ve } \eta = \frac{T_1}{\alpha(T_2 - T_1 T_3)} \quad (3.56)$$

Diğer parametreler η, β Eşitlik 3.56 kullanılarak hesaplanır [40].

3.6.3. İki Parametrelili Genelleştirilmiş Gamma Dağılımı

İki parametrelili genelleştirilmiş gamma dağılım fonksiyonu Eşitlik 3.57 ile tanımlanır.

$$f(v, \beta, \eta) = \frac{v^{\eta-1}}{\beta^{-\eta} \Gamma(\eta)} e^{(-\frac{v}{\beta})} \quad (3.57)$$

Paremetrelerin MOM ile tahmini; Eşitlik 3.58'den Newton-Raphson ve Bisection metodu kullanılarak η hesaplandıktan sonra, Eşitlik 3-59 kullanılarak β paremetresi hesaplanarak yapılır [40].

$$\ln(\eta) - \psi(\eta) = \ln\left(\frac{\sum_{i=1}^n v_i}{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}\right) \quad (3.58)$$

$$\beta = \frac{1}{n\eta} \sum_{i=1}^n v_i \quad (3.59))$$

3.6.4. Bir Parametrelili Rayleigh Dağılımı

Rayleigh dağılım fonksiyonu, Weibull dağılımının ölçek parametresi $k=2$ için özel bir hali olup rüzgar enerjisi uygulamalarında sıklıkla kullanılan ikinci önemli olasılık dağılım fonksiyonudur. Bir bölgenin tek ortalama rüzgar hızı (v_{ort}) bilinerek; Rayleigh dağılım fonksiyonu yardımıyla rüzgar hızlarının, esme saati oranları yüzde olarak bulunabilir. Bir parametrelili Rayleigh dağılım fonksiyonu Eşitlik 3.60 ile tanımlanır.

$$f(v, \theta) = \left(\frac{v}{\theta^2}\right) e^{-\left(\frac{v}{\theta^2}\right)^2} \quad (3.60)$$

Birikimli Rayleigh dağılım fonksiyonu Eşitlik 3.61 ile tanımlanır.

$$f(v, \theta) = 1 - e^{-v^2/(2\theta^2)} \quad (3.61)$$

Rayleigh dağılım fonksiyonunun ölçek parametresi θ maksimum olabilirlik metodu (MOM) ile tahmini Eşitlik 3.62 kullanılarak yapılabilir.

$$\theta = \left(\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (v_i)^2\right)^{1/2} \quad (3.62)$$

Rayleigh dağılım fonksiyonunun ölçek parametresi θ , En küçük Kareler Metodu (EKKM) ile tahmini ise birikimli dağılımfonksiyonun logaritması alınıp doğrusallaştırma yapıldıktan sonra $X_i = \ln v_i$ ve $Y_i = \ln[-\ln(1 - P_i)]$ eşitliklerinin tanımlanması ile Eşitlik 3.63 kullanılarak hesaplanır [4].

$$\theta = \left\{ \frac{1}{2} \exp \left[-\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n Y_i - 2 \sum_{i=1}^n X_i \right) \right] \right\}^{1/2} \quad (3.63)$$

3.6.5. İki Parametrelili Karakök Normal dağılımı

İki parametrelili karakök normal dağılımı fonksiyonu, normal dağılım fonksiyonun özel bir hali olup, pozitif verilerden oluşan veri setlerinde karakök alarak normalleştirme yapılarak uygulanan bir dağılım fonksiyonudur. İki parametrelili karakök normal dağılımı fonksiyonu Eşitlik 3.64 ile tanımlanmaktadır.

$$f(v, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{8\pi v}} \exp \left[\frac{-(\sqrt{v} - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (3.64)$$

İki parametrelili karakök normal dağılımı fonksiyonu parametreleri μ ölçek parametresi dağılımın ortalaması ve σ şekil parametresi dağılımın yayılma ölçüsü veya standart sapma değerleri Eşitlik 3.65 ile hesaplanır [40].

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i)^{1/2} \text{ ve } \sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i^{1/2} - m)^2 \quad (3.65)$$

3.6.6. İki parametrelili Normal Kesik Dağılım

İki parametrelili normal kesik dağılım fonksiyonu, tek başına normal dağılımın altından kesilmiş olarak Eşitlik 3.66 ile tanımlanır.

$$f(v, \alpha, \beta) = \frac{1}{I_0(\alpha, \beta)\beta\sqrt{2\pi}} \exp \left[\frac{-(v - \alpha)^2}{2\beta^2} \right] \quad (3.66)$$

Eşitlik 3-66'da geçen $I_0(\alpha, \beta)$ ifadesi aşağıdaki Eşitlik 3.67 ile verilmektedir.

$$I_0(\alpha, \beta) = \frac{1}{\beta\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty \exp \left[\frac{-(v - \alpha)^2}{2\beta^2} \right] dv \quad (3.67)$$

İki parametrelili normal kesik dağılım fonksiyonu α , β parametrelerinin Moment Metodu ile hesaplanması, ölçüm verilerinin (örneklemen) orijine göre (sıfıra göre) ilk üç istatistiksel momenti ($m = \mu = m_1; m_2; m_3$) kullanılarak Eşitlik 3.68 ile yapılır [40].

$$\alpha = \frac{2m_2m - m_3}{2m^2 - m_2} \quad \text{ve} \quad \beta = \frac{m \cdot m_3 - m_2^2}{2m^2 - m_2} \quad (3.68)$$

İki parametrelili normal kesik dağılım fonksiyonu α , β parametrelerinin Maksimum olabilirlik metoduyla (MOM) tahmini aşağıdaki Eşitlik 3.69 ve Eşitlik 3.70 kullanılarak yapılır.

$$Z(\zeta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\zeta^2}{2}\right], \quad \text{ve} \quad 1 - \phi(\zeta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\zeta \exp\left[-\frac{v^2}{2}\right] dv \quad (3.69)$$

$$\zeta = \frac{\alpha}{\beta} \quad \text{ve} \quad \beta = \left(\frac{Z(\zeta)}{1 - \phi(\zeta)} - \zeta \right)^{-1} m \quad (3.70)$$

$$\left[\frac{Z(\zeta)}{1 - \phi(\zeta)} - \zeta \right]^{-1} \left\{ \left[\frac{Z(\zeta)}{1 - \phi(\zeta)} - \zeta \right]^{-1} - \zeta \right\} = \frac{1}{n(m)^2} \sum_{i=1}^n v_i^2 \quad (3.71)$$

Eşitlik 3.69 ve Eşitlik 3-70 denklemlerinden ζ belirlendikten sonra ve Eşitlik 3.71'den Newton-Raphson ve Bisection metodlarının kombinasyonu ile α , β parametreleri hesaplanır [40].

3.6.7. İki Parametrelili Lognormal Dağılım

İki parametrelili lognormal dağılım fonksiyonu Eşitlik 3.72 ile tanımlanmaktadır.

$$f(v, \alpha, \beta) = \frac{1}{v\beta\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln(v) - \alpha)^2}{2\beta^2}\right] \quad (3.72)$$

İki parametrelili lognormal dağılımın bilinmeyen parametreleri α , β 'nin tahminini gerçekleştirmek için, Moment metodu (MM) kullanıldığında ölçüm verilerinin (örneklem) ortalama ve varyansı, dağılımın ortalama ve varyansına eşitlenir. İki Eşitliğin oluşturduğu denklem sisteminin çözülmesiyle α ve β 'nin tahmini değerleri Eşitlik 3.73 ile elde edilir.

$$\alpha = \ln \left[\frac{m}{\sqrt{1 + \left(\frac{s}{m}\right)^2}} \right] \text{ ve } \beta = \sqrt{\ln \left[1 + \left(\frac{s}{m}\right)^2 \right]} \quad (3.73)$$

İki parametrelili lognormal dağılımında α , β parametrelerinin tahminini, Maksimum Olabilirlik Metodu (MOM) ile Eşitlik 3.74 kullanılarak hesaplanır [40].

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(v_i) \text{ ve } \beta^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ln(v_i) - \alpha)^2 \quad (3.74)$$

3.6.8. İki Parametrelili Ters Gausyen Dağılım

İki parametrelili ters Gaussian dağılım fonksiyonu Eşitlik 3.75 ile tanımlanır.

$$f(v, \alpha, \beta) = \left(\frac{\beta}{2\pi v^3} \right)^{1/2} \exp \left[\frac{-\beta(v - \alpha)^2}{2v\alpha^2} \right] \quad (3.75)$$

İki parametrelili ters Gaussian dağılım fonksiyonu bilinmeyen parametreleri α ve β 'nin tahminini gerçekleştirmek için, Moment metodu (MM) kullanıldığında ölçüm değerlerinin (örneklem) ortalama ve varyans (m , s^2) dağılımın ortalama ve varyansına eşitlenerek yapılabilir. İki Eşitliğin oluşturduğu denklem sisteminin çözülmesiyle α ve β 'nin tahmini değerleri elde edilir [40].

$$\alpha = m \text{ ve } \beta^2 = \frac{m^3}{s^2} \quad (3.76)$$

İki parametrelili ters Gaussian dağılım fonksiyonu parametrelerinin Maksimum Olabilirlik Metodu (MOM) ile tahmini; Eşitlik 3.77 ile yapılır [101].

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i) \text{ ve } \beta = n \{ \sum_{i=1}^n v_i^{-1} - n^2 (\sum_{i=1}^n (v_i))^{-1} \}^{-1} \quad (3.77)$$

3.6.9. İki Bileşenli Karışık Weibull Dağılımı

İki bileşenli karışık Weibull dağılım fonksiyonu Eşitlik 3.78 ile tanımlanmaktadır.

$$f(v, k_1, c_1, k_2, c_2, w) = \frac{w k_1}{c_1 (v/c_1)^{k_1-1}} \exp \left[\left(\frac{-v}{c_1} \right)^{k_1} \right] + (1 - w) \frac{k_2}{c_2 \left(\frac{v}{c_2} \right)^{k_2-1}} \exp \left[\left(\frac{-v}{c_2} \right)^{k_2} \right] \quad (3.78)$$

İki bileşenli karışık Weibull dağılımının birikimli dağılım fonksiyonu Eşitlik 3.79 ile tanımlanmaktadır.

$$F(v, k_1, c_1, k_2, c_2, w) = w \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{v}{c_1} \right)^{k_1} \right) \right] + (1 - w) \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{v}{c_2} \right)^{k_2} \right) \right] \quad (3.79)$$

İki bileşenli karışık Weibull dağılımının bilinmeyen k_1, c_1, k_2, c_2, w parametreleri, Moment Metodu ile istatistiksel ilk beş dereeden moment ($m = m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$) kullanılarak Eşitlik 3.80 de verilen r. moment formülleri ile hesaplanır. Bu Eşitlik sisteminin analitik çözümü olmayıp sayısal yöntemlerle çok zor çözülmektedir.

$$m_r = w c_1^r \cdot \Gamma \left(1 + \frac{r}{k_1} \right) + (1 - w) c_2^r \cdot \Gamma \left(1 + \frac{r}{k_2} \right) \quad (3.80)$$

İki bileşenli karışık Weibull dağılımının bilinmeyen k_1, c_1, k_2, c_2, w parametreleri, Maksimum olabilirlik metodu (MOM) ile Eşitlik 3.81 ile çeşitli sayısal tekniklerle hesaplanır [40].

$$\ln L(v_i, k_1, c_1, k_2, c_2, w) = \sum_{i=1}^n \ln \left\{ w \left(\frac{k_1}{c_1} \right) \left(\frac{v_i}{c_1} \right)^{k_1-1} \exp \left[-\left(\frac{v_i}{c_1} \right)^{k_1} \right] + (1 - w) \left(\frac{k_2}{c_2} \right) \left(\frac{v_i}{c_2} \right)^{k_2-1} \exp \left[-\left(\frac{v_i}{c_2} \right)^{k_2} \right] \right\} \quad (3.81)$$

3.6.10. Maksimum Entropi Olasılık Dağılımı

Maksimum entropi olasılık dağılım fonksiyonunun birikimli dağılım fonksiyonu Eşitlik 3.82 ile tanımlanmaktadır.

$$f(v, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_3) = \exp \left[\lambda_0 + \sum_{i=1}^M \lambda_i v^i \right] \quad (3.82)$$

Hesaplamalarda, λ_0 parametresi $a = V_{min}$ minimum hız değeri, $b = V_{mak}$ maksimum hız değeri ve M , parametre sayısı değerlerine bağlı olarak Eşitlik 3.82 ile hesaplanır.

$$\lambda_0 = -\ln \left[\int_a^b \exp \left[\sum_{i=1}^M \lambda_i v^i \right] dv \right] \quad (3.83)$$

Shannon entropisinin maksimizasyonu ile rüzgar hızının olasılığı Eşitlik 3.84 ile hesaplanabilir.

$$P_i = \exp[\lambda_0 + \lambda_1 v_i^1 + \lambda_2 v_i^2 + \lambda_3 v_i^3] \quad (3.84)$$

Çeşitli kısıtlar altında yarı empirik rüzgar hızı dağılım fonksiyonu; Eşitlik 3.85 ile verilmektedir.

$$f(v) = v^r \exp[\lambda_0 + \lambda_1 v + \lambda_2 v^2 + \lambda_3 v^3] \quad (3.85)$$

Burada $r=0$ da maksimum entropi olasılık dağılımı verir ve r negatif olmayan değerler alabilir [106,107].

3.6.11. Burr Olasılık Dağılımı

Son on yıllarda, Eşitlik 3.86 ile verilen Burr dağılımı, rüzgar hızı frekansını tahmin etmek için kullanılmış ve iyi sonuçlarda vermiştir [42].

$$f(v, a, b, k) = \frac{a \cdot k \cdot \left(\frac{v}{b}\right)^{a-1}}{b \left(1 + \left(\frac{v}{b}\right)^a\right)^{k+1}} \quad (3.86)$$

Üç parametrelili Birikimli Burr dağılım fonksiyonu, a ile şekil parametresi, b ve k ölçek parametreleri ve v rüzgar hız sınıfını temsil etmek üzere Eşitlik 3.87’de tanımlanmıştır.

$$F(v, a, b, k) = 1 - \left(1 + \left(\frac{v}{b}\right)^a\right)^{-k} \quad (3.87)$$

3.6.11.1. Enküçük Kareler Yöntemi

Eşitlik 3.88 Eşitlik 3.89 gibi düzenlenerek, daha sonra logaritması alınarak ve cebirsel işlemler yapılarak; Eşitlik 3.90 ile Eşitlik 3.91 işlemleri yapılarak, Eşitlik 3.91’deki gibi lineerleştirilir.

$$1 + \left(\frac{v}{b}\right)^a = (1 - P)^{-\frac{1}{k}} \quad (3.88)$$

$$\left(\frac{v}{b}\right)^a = (1 - P)^{-\frac{1}{k}} - 1 \quad (3.89)$$

$$a \ln \left(\frac{v}{b}\right) = \ln \left[(1 - P)^{-\frac{1}{k}} - 1\right] \quad (3.90)$$

$$a \ln v - a \ln b = \ln \left[(1 - P)^{-\frac{1}{k}} - 1\right] \quad (3.91)$$

Eşitlik 3.87, $F(v)=P$ birikimli rüzgar hızı frekansını temsil etmek üzere, Eşitlik 3.92'deki kabullerle Eşitlik 3.93 elde edilir.

$$a \ln v_i = ax_i, -a \ln b = B \text{ and } \ln \left[(1 - P)^{-\frac{1}{k}} - 1\right] = Y_i. \quad (3.92)$$

$$ax_i + B = Y_i \quad (3.93)$$

Burr olasılık dağılım fonksiyonu parametrelerinin; a ve b parametrelerinin, k parametresinin artan değerleri kullanılarak elde edilmesi için iteratif yaklaşım kullanılmaktadır. Böylece a , b ve k parametrelerinin optimum değerlerini bulmak için aşağıda verilen Eşitlik 3.95, Eşitlik 3.96 ve Eşitlik 3.97 kullanılır [42].

$$E(a, B) = \sum e_i^2 = \sum (Y_i - ax_i - B)^2 \quad (3.94)$$

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - \sum y_i \sum x_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (3.95)$$

$$B = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i y_i \sum x_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (3.96)$$

$$b = \exp\left(\frac{-B}{a}\right) \quad (3.97)$$

3.6.11.2. Maksimum Olabilirlik Metodu

Burr dağılım fonksiyonu için maksimum olabilirlik fonksiyonu Eşitlik 3.98’de verilmiştir. Bu Eşitliğin logaritması alınırsa Eşitlik 3.99 elde edilir. Bu Eşitliğin parametrelere göre kısmi türevleri alınıp sıfıra eşitlenirse Eşitlik 3.100, Eşitlik 3.101 ve Eşitlik 3-102 elde edilir [59].

Dağılımın a , b ve k parametrelerini hesaplamak için Eşitlik 3.98 ın maksimizasyonu ile, oluşan doğrusal olmayan Eşitlik sisteminin Newton Raphson metodu ile çözümü Eşitlik 3.103 ile iteratif işlemlerle bulunur. Burr dağılımı maksimum olabilirlik fonksiyonu ikinci mertebeden kısmi türevleri Ek A bölümünde verilmiştir.

$$L(v, a, b, h) = \prod_{i=1}^n \frac{a \cdot k \left(\frac{v}{b}\right)^{a-1}}{b \left[1 + \left(\frac{v}{b}\right)^a\right]^{k+1}} \quad (3.98)$$

$$\ln L(v, a, b, k) = \sum \left[\ln \left(\frac{a \cdot k}{b}\right) + (a-1) \ln \left(\frac{v}{b}\right) - (k+1) \left(\ln \left[1 + \left(\frac{v}{b}\right)^a\right] \right) \right] \quad (3.99)$$

$$S_1 = \frac{\partial LL(v, a, b, k)}{\partial a} = \sum \left[\frac{1}{a} + \ln \left(\frac{v_i}{b}\right) - \frac{(k+1) \ln \left(\frac{v_i}{b}\right)}{\left(1 + \left(\frac{b}{x}\right)^a\right)} \right] \quad (3.100)$$

$$S_2 = \frac{\partial LL(v, a, b, k)}{\partial b} = \sum \left(-\frac{1}{k+1} + \left[1 + \left(\frac{b}{v_i}\right)^a\right]^{-1} \right) \quad (3.101)$$

$$S_3 = \frac{\partial LL(v, a, b, k)}{\partial k} = \sum \left(-\frac{1}{k} + \ln \left[1 + \left(\frac{v_i}{b}\right)^a\right] \right) \quad (3.102)$$

$$\begin{bmatrix} a_{i+1} \\ b_{i+1} \\ k_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ k_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial S_1}{\partial a} & \frac{\partial S_1}{\partial b} & \frac{\partial S_1}{\partial k} \\ \frac{\partial S_2}{\partial a} & \frac{\partial S_2}{\partial b} & \frac{\partial S_2}{\partial k} \\ \frac{\partial S_3}{\partial a} & \frac{\partial S_3}{\partial b} & \frac{\partial S_3}{\partial k} \end{bmatrix}_{(a_i, b_i, k_i)}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}_{(a_i, b_i, k_i)} \quad (3.103)$$

3.6.12. Diğer Bazı Olasılık Dağılım Fonksiyonları

Yukarıda bağıntıları verilen ve tanımlanan olasılık dağılım fonksiyonları haricinde, rüzgar enerjisi alanında kullanılan başka olasılık dağılım fonksiyonları da vardır. Bu bölümde literatürde yaygın geçen diğer dağılım fonksiyonlarının birkaçının isimlerinden ve geçtiği makalelerin başlıcaları; **Pearson Type III dağılım fonksiyonları** [108], **Üç parametre beta dağılımı** [72,73], **Kesik Normal Weibull karışım dağılımı** [40], **Pearson Type V dağılımı** [59], **Kappa ve Wakeby dağılım fonksiyonları** [77] olarak sıralanabilir.

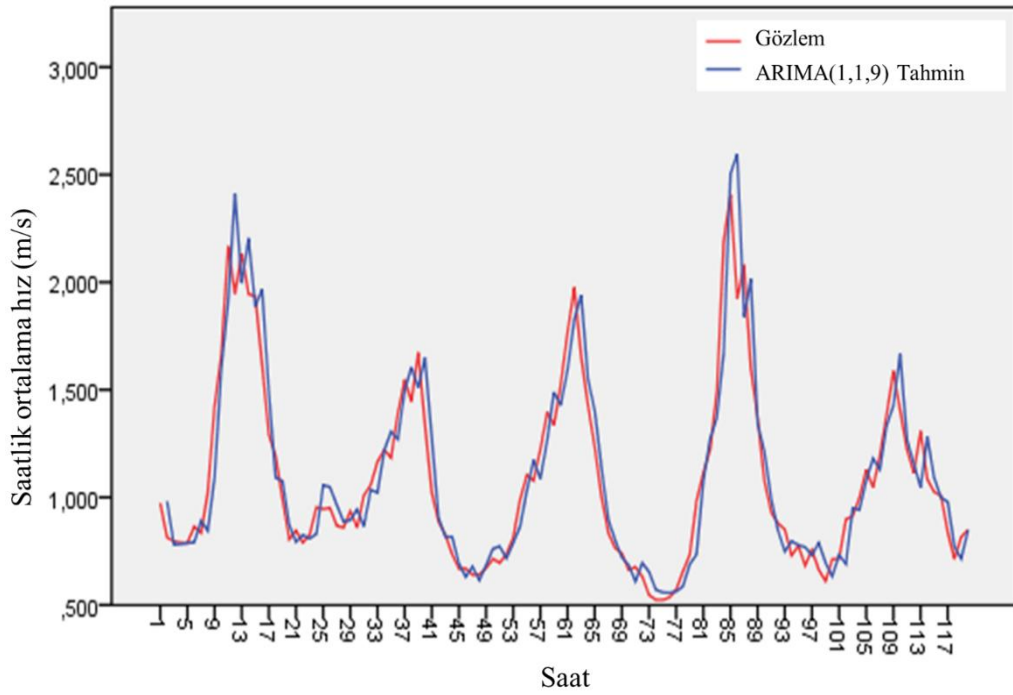


BÖLÜM 4

BULGULAR

4.1. STOKASTİK MODEL UYGULAMA VE BULGULAR

Zaman serisine bağlı stokastik modelleri oluşturmak için MGM Karabük İl müdürlüğünden alınan, Karabük ili rüzgar hız verilerinden 2010 yılı Ocak ayının saatlik ortalamaları kullanılmıştır. ARIMA modelleri için SPSS programında saatlik ortalamaların geçikme zamanı en fazla 24 saat olarak zaman serisi teşkil edilmiştir. SPSS programı ile oluşturulan bir fark alınarak elde edilen en uygun ARIMA (1,1,9) modeli olmuştur. Bu modelin tahmin grafiği Şekil 4.1’de ve diğer ARIMA modelleriyle karşılaştırmalı olarak Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Karabük ili rüzgar verileri ile SPSS ARIMA(1,1,9) model tahminleri.

ARIMA modelleri için Excel’de, program kısıtı sebebiyle en fazla 16 saat gecikmeli zaman serisi teşkil edilmiş ve uygulanamıştır. Excel de elde edilen model katsayıları, determinasyon katsayıları ve parametrelerin anlamlılık düzeyleri özet tablolarda verilmiştir. Bundan sonra step-wise regresyon yöntemi kullanılarak, eşitlikteki etkisiz terimler atılarak modellerin daha sade hale dönüştürülmesine çalışılmıştır.

Çizelge 4.1. SPSS ARIMA (1,1,9) modelinin katsayıları.

ARIMA (1,1,9) $V_t = 0,643 V_{(t-1)} + +0,478e_{(t-1)} + 0,395 e_{(t-9)}$						
			Lag (Geçikme)	Estimate (Tahminler)	SE (Standart Hata)	t Sig. (Yeterlilik)
Vt Model_1	Natural Logarithm (Doğal Logaritma)	AR	Geçikme 1	,643	,125	5,147 ,000
		Difference (Fark)		1		
		MA	Geçikme 1	,478	,133	3,590 ,000
		Geçikme 9		,395	,092	4,278 ,000
a. Durağan R-karesine göre En İyi Model Bağıntısı						

Çizelge 4.2. Excel de hazırlanan ARIMA (16,0,0) model parametreleri.

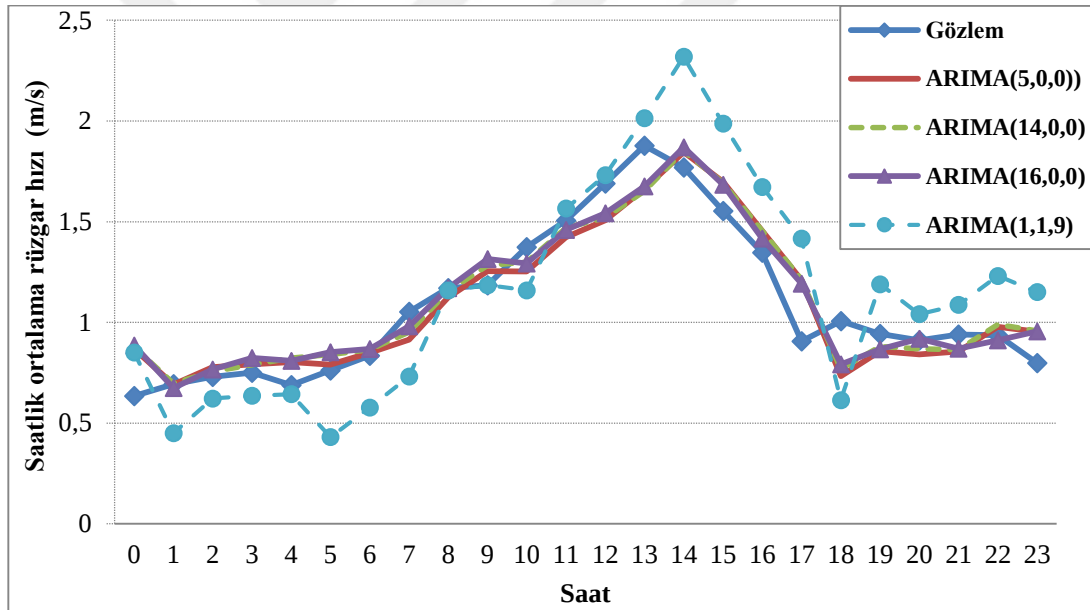
ARIMA(16,0,0) $V_t = 0,594 + 0,954 V_{(t-1)} - 0,004 V_{(t-2)} + \dots + (-0,089) V_{(t-16)}$				
Regresyon İstatistikleri				
Çoklu R	0,943816			
R Kare	0,890789			
Ayarlı R Kare	0,873824			
Standart Hata	0,148977			
Gözlem	120			
	Katsayılar	Standart Hata	t Stat	P-değeri
Sabit Terim	0,594948	0,130257	4,567486	1E-05
X Değişkeni 1	0,954021	0,097511	9,783735	2E-16
X Değişkeni 2	-0,00488	0,13437	-0,03632	0,971
X Değişkeni 3	-0,097738	0,132111	-0,73982	0,461
X Değişkeni 4	-0,052482	0,131951	-0,39774	0,692
X Değişkeni 5	-0,101933	0,132539	-0,76908	0,444
X Değişkeni 6	-0,082197	0,132435	-0,62066	0,536
X Değişkeni 7	0,085286	0,131939	0,646409	0,519
X Değişkeni 8	-0,002884	0,131977	-0,02185	0,983
X Değişkeni 9	-0,155502	0,133568	-1,16422	0,247
X Değişkeni 10	0,105922	0,127723	0,829311	0,409
X Değişkeni 11	-0,054326	0,127224	-0,42701	0,67
X Değişkeni 12	-0,060026	0,128384	-0,46755	0,641
X Değişkeni 13	0,106686	0,126728	0,841848	0,402
X Değişkeni 14	-0,237153	0,126784	-1,87053	0,064
X Değişkeni 15	0,14141	0,130306	1,085216	0,28
X Değişkeni 16	-0,089848	0,093636	-0,95954	0,34

Karabük rüzgar verileri için SPSS ve Excel 2010 programları kullanılarak elde edilen ARIMA(p,d,q) modellerinin hesaplanan parametreleri Çizelge 4.1, Çizelge 4.2

Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’de gösterilmiştir. Modellerle tahminler gerçekleştirilerek, gerçek ve tahmin verileri grafiksel olarak Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Excel de hazırlanan ARIMA (14,0,0) model parametreleri.

ARIMA(14,0,0) $V_t = 0,5303 + 0,9176 V_{(t-1)} - 0,265 V_{(t-5)} - 0,1387 V_{(t-14)}$				
Regresyon İstatistikleri				
Çoklu R	0,939267			
R Kare	0,882223			
Ayarlı R Kare	0,879177			
Standart Hata	0,145782			
Gözlem	120			
	Katsayılar	Standart Hata	t Stat	P-değeri
Sabit Terim	0,530337	0,090763	5,843099	5E-08
X Değişkeni 1	0,917608	0,039548	23,20229	2E-45
X Değişkeni 2	-0,265104	0,036692	-7,22509	6E-11
X Değişkeni 3	-0,138786	0,038895	-3,56826	5E-04



Şekil 4.2. Hesaplanan parametrelerle yapılan 24 saatlik tahmin grafiği.

Excel özet tablosundaki P değeri kullanımında karşılaştırma yaparken “istatistiksel anlamlı fark vardır” kararı alınacağı zaman yapılabilecek hata miktarını göstermektedir. Meşhur istatistikçi Fisher, yapılan hatanın maksimum kabul edilebilir değerini 0,05 önermiş ve bu önerme kabul görüp kullanılmaktadır. Yapılan test sonucunda elde edilen P değeri 0,05'in altında ise karşılaştırmada anlamlı fark bulunduğunu ifade eder [110]. Bu şekilde anlamlı parametreler tesbit edilmiştir.

Yapılan hesaplarda en uygun ARIMA modelinin AR(14,0,0) olduğu, SPSS sonucu olan Çizelge 4.1 ile Excel de yapılan hesaplamalarla Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6 göstermektedir. Bilgi kriterlerinden AIC değerlerine baktığımızda AR(14,0,0) ve AR(5,0,0) modellerinin birbirine yakın sonuçları olduğunu; ancak performans için hata ölçüleri ile birlikte değerlendirildiğinde belirlilik katsayısı ve ortalama mutlak yüzde hata değerlerinde AR(14,0,0) modelinin en iyi model olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.4. Excel de hazırlanan ARIMA (5,0,0) model parametreleri.

ARIMA(5,0,0)=AR(5) $V_t = 0,2473 + 0,988 V_{(t-1)} - 0,2178 V_{(t-5)}$				
Regresyon İstatistikleri				
Çoklu R	0,93236			
R Kare	0,869296			
Ayarlı R Kare	0,867062			
Standart Hata	0,152917			
Gözlem	120			
	Katsayılar	Standart Hata	t Stat	P-değeri
Sabit Terim	0,24733	0,04629	5,343049	4,57E-07
X Değişkeni 1	0,988759	0,035825	27,59974	4,68E-53
X Değişkeni 2	-0,21788	0,035897	-6,06958	1,63E-08

Çizelge 4.5. Modellerin tahmin performansı için hata değerleri.

Hata Ölçütleri \ Modeller	ARIMA(5,0,0))	ARIMA(14,0,0)	ARIMA(16,0,0)	ARIMA(1,1,9)
Korelasyon	0,926018	0,932343	0,939313	0,870569188
R ² (Belirlilik Katsayısı)	0,857509672	0,869263073	0,882309762	0,757890712
HKT	0,450896	0,422551	0,384887	1,806630465
HKO	0,018787	0,017606	0,016037	0,075276269
Ortalama Mutlak Yüzde Hata	10,9548	10,6116	10,33563	22,98791542

Çizelge 4.6. ARIMA modellerinin uygunluğu için bilgi kriteri sonuçları.

Bilgi Kriterleri	ARIMA(5,0,0)	ARIMA(14,0,0)	ARIMA(16,0,0)	ARIMA(1,1,9)
BİC	-3,5773	-3,5098	-1,8817	-2,0569
AİC	-3,7246	-3,7062	-2,7162	-2,2533

ARIMA(5,0,0), ARIMA(14,0,0), ARIMA(16,0,0) ve ARIMA(1,1,9) modelleri sırasıyla 3, 4, 17 ve 3 terimli olarak oluşmuştur. Çizelge 1.5 ve Çizelge 1.6 incelendiğinde ARIMA(14,0,0) modeli; terim sayısı, belirlilik katsayısı, ortalama

mutlak yüzde hata değerleri ve bilgi kriterleri açısından Karabük rüzgar hız verilerini tahminlemek için kullanılabilir.

4.2. YSA UYGULAMA VE BULGULAR

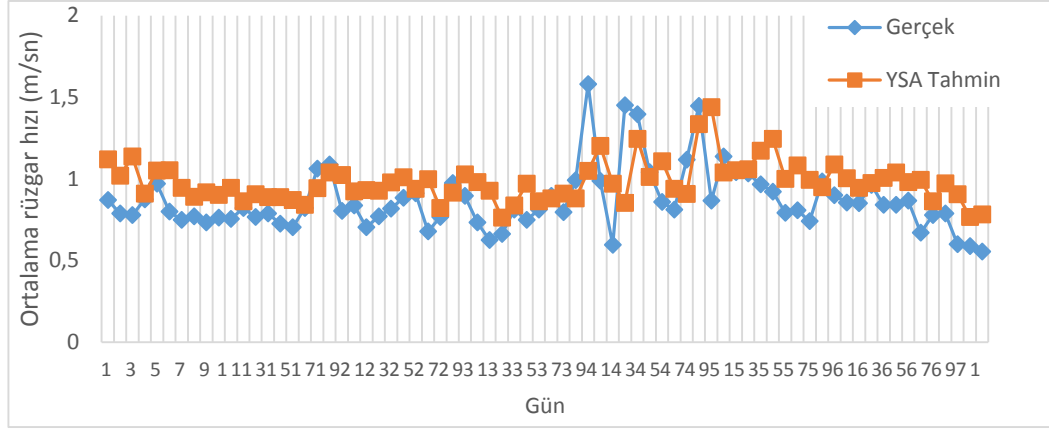
Devlet meteoroloji genel müdürlüğünce ölçümü gerçekleşmiş Karabük ili rüzgar hız verileri, ile Karabük üniversitesi ve KARES AVM tarafından kurulan, Kahyalar rüzgar ölçüm istasyonu verileri ve İzmir Çeşme Mersinkoy da Ege üniversitesince ölçülen 1999 yılı rüzgar verileri uygulanmıştır [111]. Kullanılan verilerle ilgili tanımlayıcı istatistikler Çizelge 4.7’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.7. RGİ’lerin rüzgâr hız ortalaması, standart sapması ve çarpıklıkları.

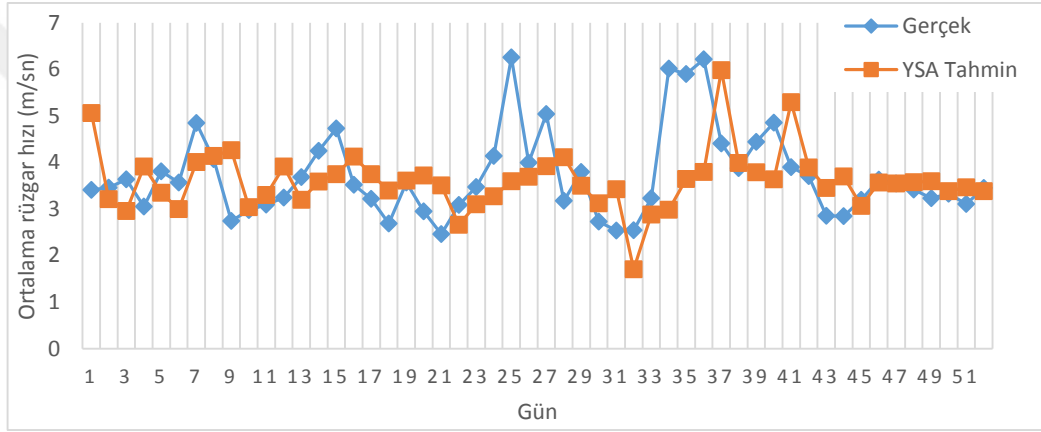
İstatistik \ İstasyon	Karabük2013	Kahyalar2013	Mersinkoy1999
Ortalama	1,179164	3,368047	5,852929
Standart sapma	0,871361	2,124768	3,33499
Çarpıklık	2,363639	1,321085	0,778022

Oluşturulan ileri beslemeli ÇKA ağında öğrenme algoritmaları olarak eğime veya Jacobian matrisine dayalı algoritmalar kullanarak ağ eğitimleri sağlanmıştır. Eğitimler maksimum 1000 iterasyon adımı olarak düşünülmüştür. Eğitimde faydalınılan öğrenme algoritmaları arasında Levenberg-Marquardt (LM), Resilient Propagation, Momentumlu Eğim Düşüm, Quasi-Newton ve Bayesian Regulation vardır ve bunlardan en iyi test sonuçları LM algoritması ile sağlanmış, günlük ve saatlik tahmin modellerin eğitiminde LM algoritması uygulanmıştır.

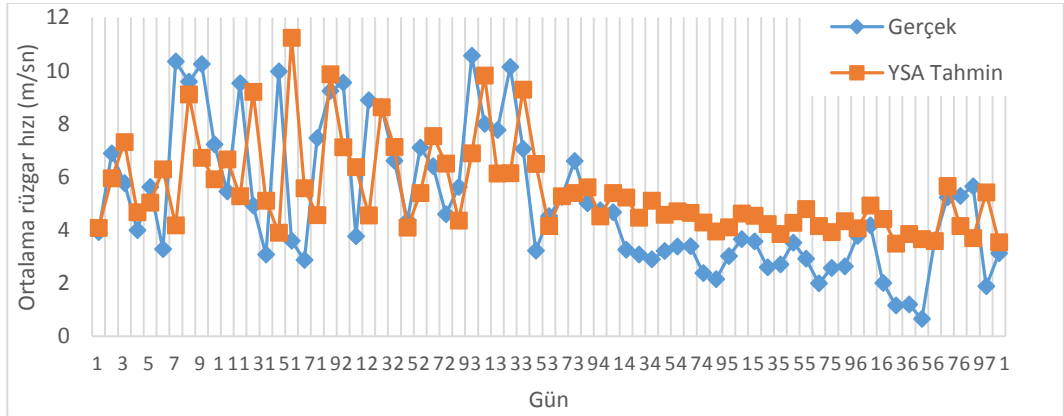
Çalışmada YSA’ya dayanan tahmin modelleri günlük ve saatlik ortalama rüzgar hızı tahminleri için iki değişik halde oluşturulmuştur. Günlük tahmin modelinde geçmiş 7 gün kullanılarak, gelecek olan 8. günün ortalama rüzgar hızı hesaplanmıştır. Böylece yapılan günlük tahminler Karabük, Kahyalar ve Mersinkoy için tüm bir yılı kapsayan veriler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada verilerin %80’i eğitim kalan %20’si testte uygulanmış ve test sonuçları grafiksel olarak Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. YSA ile Karabük için günlük tahminler.



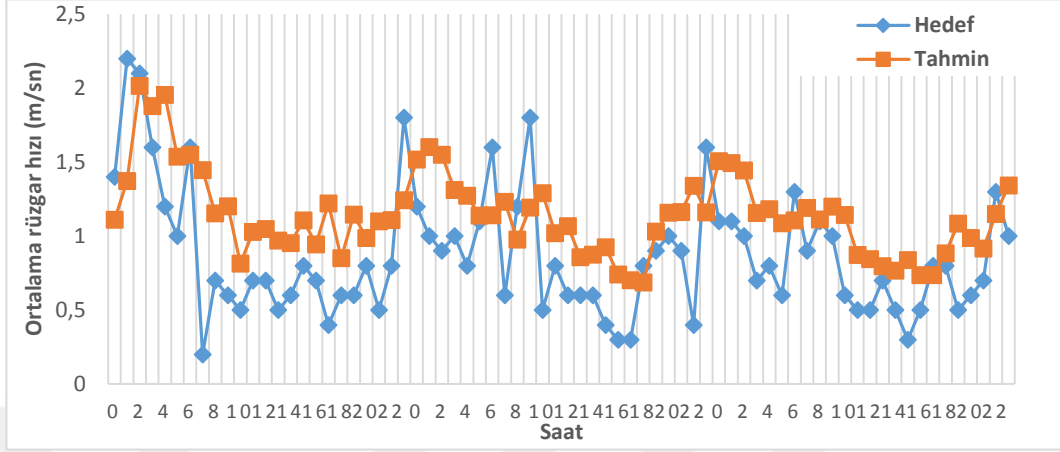
Şekil 4.4. YSA ile Karabük Kahyalar için günlük tahminler.



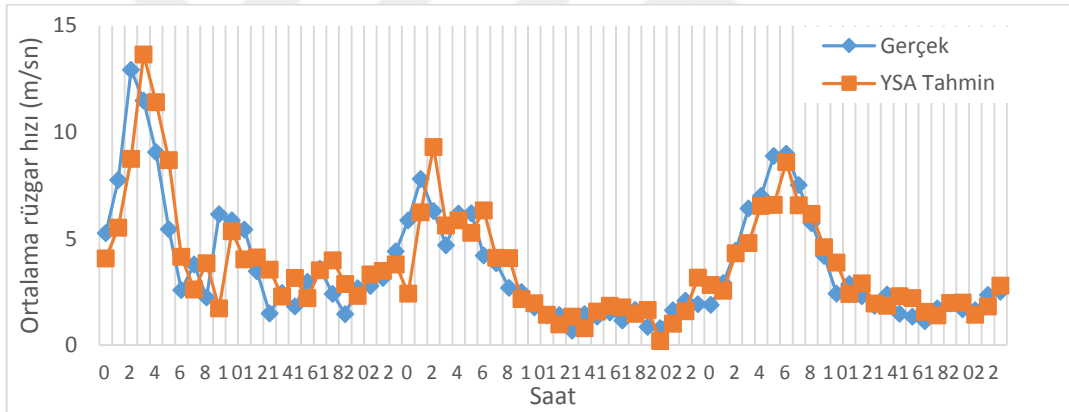
Şekil 4.5. YSA ile İzmir Çeşme Mersinkoy için günlük tahminler.

YSA ile saatlik ortalama hız olarak önceki 48 saatlik veriyle 49. saatin ortalama rüzgar hız değeri tahmin edilmiştir. YSA ile yapılan saatlik ortalama hız tahminleri Karabük, Kahyalar ve Mersinkoy için 1 yıllık rüzgar hız veriler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

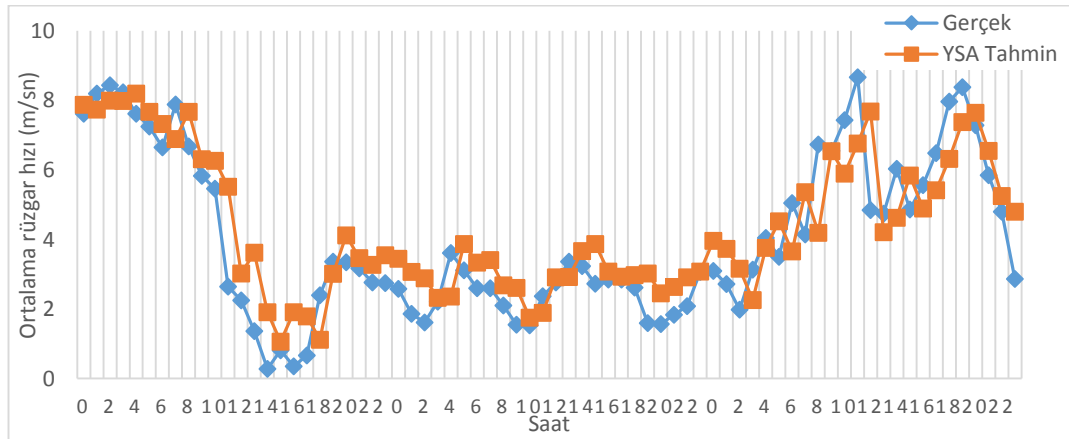
Her üç ölçüm istasyonu verilerinin %80'i eğitim, %20'si test için kullanılmış ve test sonuçları Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de, gösterilmiştir.



Şekil 4.6. YSA ile Karabük için saatlik tahminler.



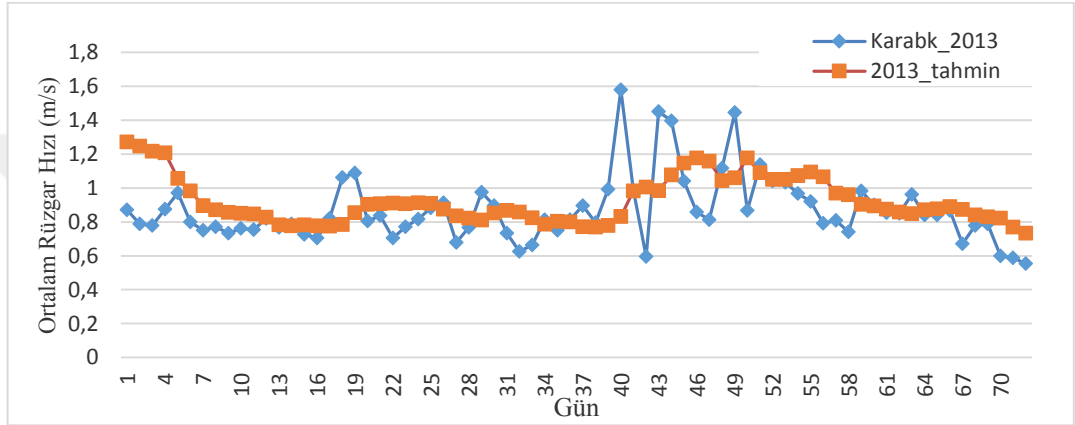
Şekil 4.7. YSA ile Karabük Kahyalar için saatlik tahminler



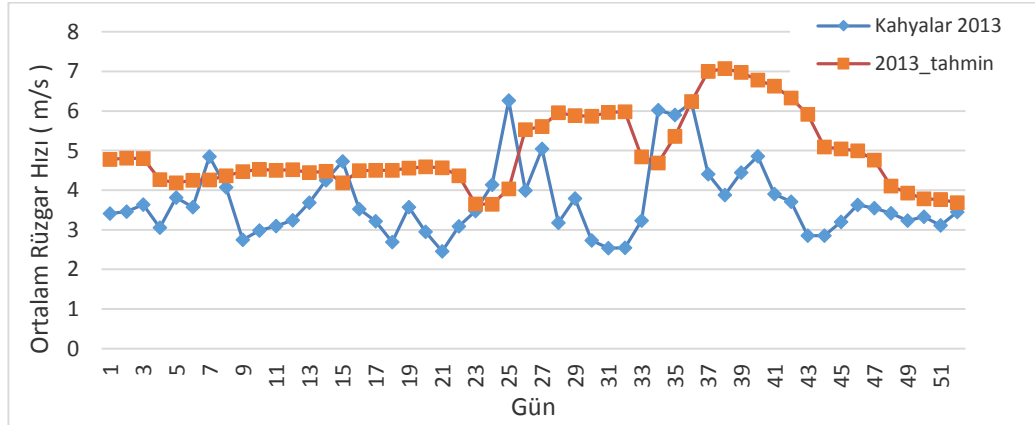
Şekil 4.8. YSA ile İzmir Çeşme Mersinkoy için saatlik tahminler.

4.3. ANALİTİK YAKLAŞIM MODELİ UYGULAMA VE BULGULAR

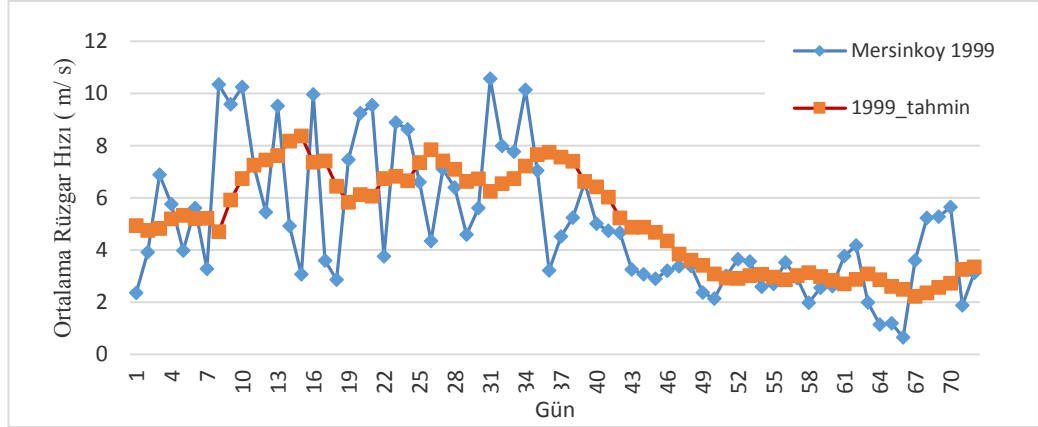
Önerilen diğer analitik tabanlı modeller günlük ve saatlik tahminler için iki farklı şekilde oluşturulmuştur. Günlük modelde önceki 7 günün ortalama ve standart sapması kullanılarak 8. günün ortalama rüzgar hızı tahmin edilmiştir. Bu şekilde yapılan günlük tahminler Karabük, Kahyalar ve Mersinkoy için 1 yıllık veriler üzerinde gerçekleştirilmiş ve Şekil 4.9 Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Analitik model ile Karabük için günlük tahminler.

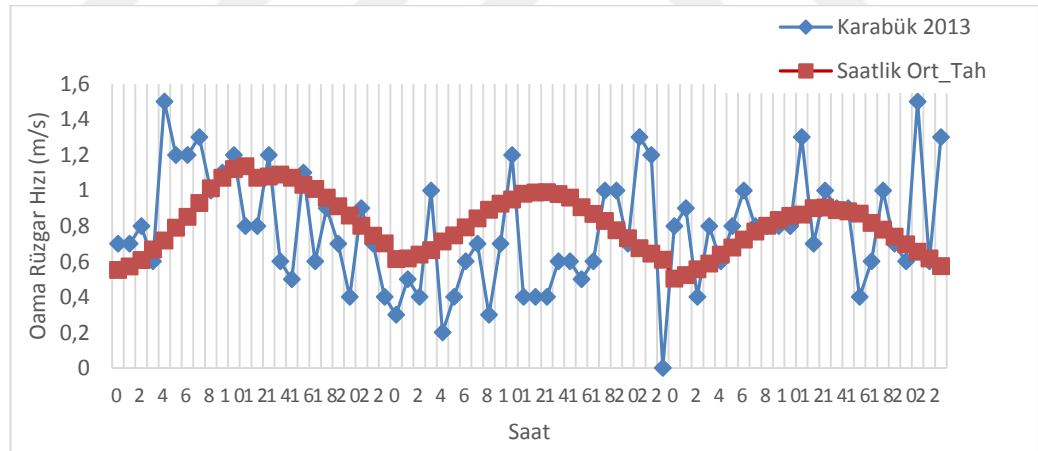


Şekil 4.10. Analitik model ile Karabük Kâhyalar için günlük tahminler.

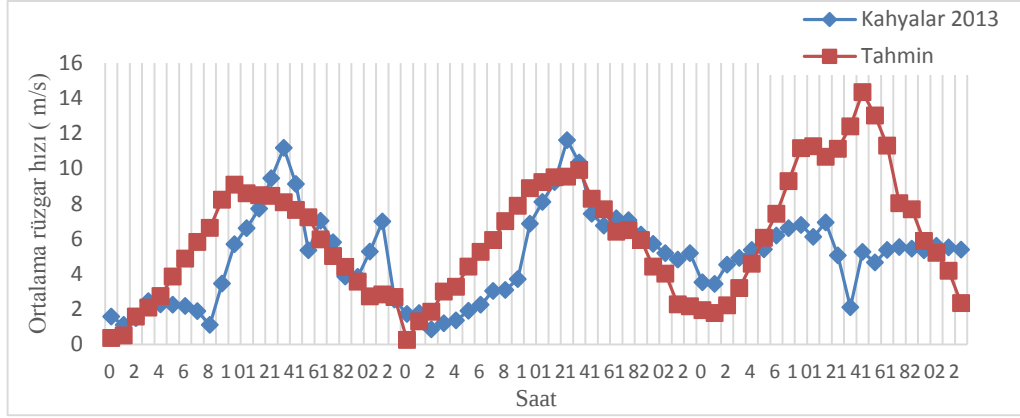


Şekil 4.11. Analitik model ile İzmir Çeşme Mersinkoy için günlük tahminler.

Önerilen analitik yaklaşımlı model ile saatlik ortalama hız için önceki 48 saatlik veriyle 49. saatin ortalama rüzgar hızı tahmin edilmiştir. Böyle yapılan saatlik ortalama hız tahminleri Karabük, Kahyalar ve Mersinkoy için 1 yıllık rüzgar hız veriler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her üç ölçüm istasyonu verilerinin %80'i eğitim, %20'si test için kullanılmış ve test sonuçları Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de, gösterilmiştir.

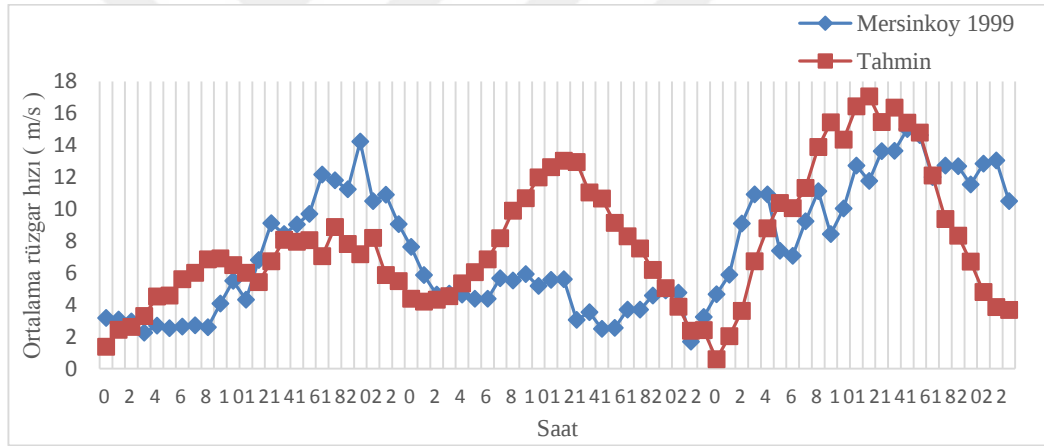


Şekil 4.12. Analitik model ile Karabük için saatlik tahminler.



Şekil 4.13. Analitik model ile Karabük Kahyalar için saatlik tahminleri.

YSA ile tüm veriler için hesaplanan performans değerleri ve analitik tabanlı önerilen model için elde edilen performans değerleri Çizelge 4.8’de özetlenmiştir.



Şekil 4.14. Analitik model ile İzmir Çeşme Mersinkoy için saatlik tahminler.

Önerilen analitik model grafikleri incelendiğinde yıllık, mevsimsel ve günlük trend etkisini modellediği ancak saatlik ve günlük dalgalanmaları tahminde zayıf olduğu görülmektedir. Bu haliyle ölçüm verileri eksik istasyonların eksik verilerini tamamlamada kullanılabileceği ve genel değerlendirme sonuçları bozmayacağı düşünülebilir. Ayrıca YSA ve ARIMA modelleri ile hibrit olarak kullanımı da mümkündür. Önerilen analitik yaklaşım modeli YSA ile kıyaslandığında performans değerlendirmelerinde tahmin değerleri ile gerçek değerler arasındaki korelasyon incelendiğinde, ortalama hız düşük istasyonlarda YSA dan daha yüksek ilişki katsayısına (korelasyona) sahip olduğu görülmektedir (Çizelge 4.8).

Çizelge 4.8. YSA ve önerilen model tahminleri ve gerçek verilerin korelasyon ve performans değerleri.

YSA	Günlük Ortalama			Saatlik Ortalama		
Performans Kriteri	Karabük	Kâhyalar	Mersinkoy	Karabük	Kâhyalar	Mersinkoy
Korelasyon	0,4246	0,2041	0,4629	0,4945	0,8391	0,9219
RMSE	0,2113	0,1686	2,3663	0,0533	0,0903	0,0657
Ki Kare	0,0440	0,2791	1,0310	0,2063	0,4808	0,3243
Önerilen Model	Günlük Ortalama			Saatlik Ortalama		
Performans Kriteri	Karabük	Kâhyalar	Mersinkoy	Karabük	Kâhyalar	Mersinkoy
Korelasyon	0,6625	0,3828	0,2527	0,3752	0,5216	0,4275
RMSE	0,4200	1,5190	2,7885	0,8302	3,0162	5,4551
Ki Kare	0,1090	0,5277	1,2054	0,4981	2,5898	3,2869

4.4. OLASILIK DAĞILIM MODELLERİ UYGULAMA VE BULGULAR

Olasılık dağılım fonksiyonları ile rüzgar enerjisi potnsiyel tahminlemesi için, Karabük merkez, Karabük Kahyalar ve Eskipazar RGİ verileri kullanılmıştır. Karabük rüzgar 2010 hız verilerini kullanarak Weibull, Rayleigh, Lognormal ve Maksimum Entropi dağılım fonksiyonları ile rüzgar enerjisi potansiyeli hesaplanmıştır. Karabük Eskipazar bölgesinde 2007 yılı rüzgar hızı ve yönü bilgilerine bağlı olarak Weibull, Rayleigh ve Lognormal kullanılarak rüzgar karakteristiklerinin değişimi incelenmiş, rüzgar güç yoğunluğu hesaplamaları yapılmıştır. Karabük Kahyalar RGİ hız verilerini değerlendirmek için ise Weibull ve Burr dağılım fonksiyonları kullanılmıştır. Olasılık dağılımların parametrelerini tahmin için EKKM, MOM ve MM metotları kullanılmıştır. Lognormal dağılımının parametrelerini tespit etmek için, maksimum olabilirlik yöntemi (MOM) ve moment metodu kullanılmıştır.

Çizelge 4.9. Eskipazar için model parametrelerin metotlara göre değerleri.

Dağılımlar Parametreleri	Weibull		Rayleigh	Lognormal	
	k	c	θ	α	β
En Küçük Kareler Metodu	1,858	1,9658	1,329	---	---
MOM	1,8776	7,7033	1,9806	0,5818	0,1847
MM	1,4025	1,993	1,449	1,731	0,8192

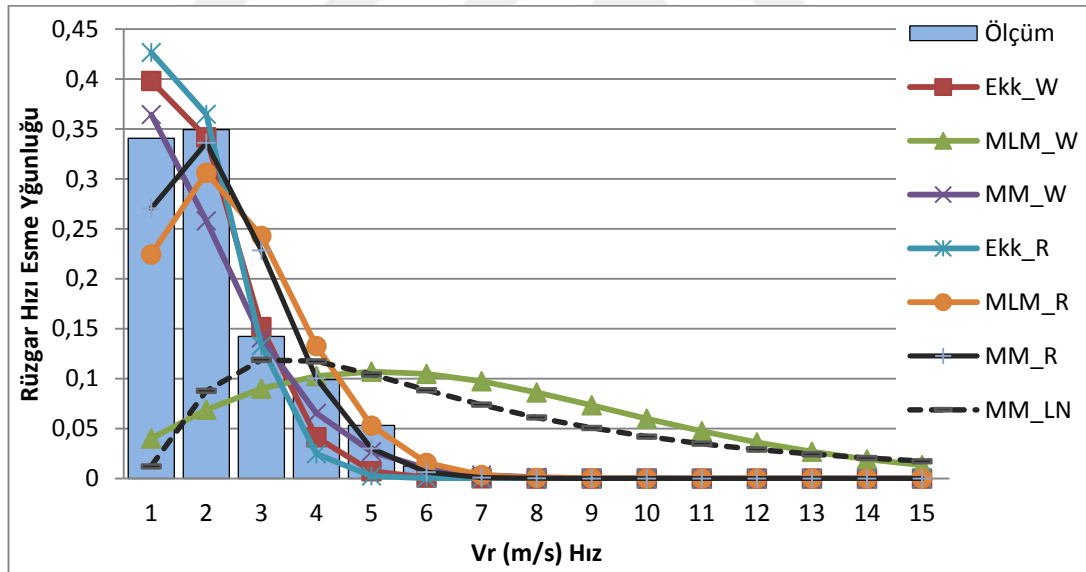
Güç yoğunluğu değeri, bir RGİ bölgesinin rüzgar enerjisi potansiyeli hakkında bilgi veren önemli bir ölçüttür. Elde edilen güç yoğunluğuna göre de bir sınıflandırma

yapılabilir. Ortalama güç yoğunluğuna göre rüzgar enerjisi açısından ölçüm noktaları için sınır değerler aşağıda verilmiştir [19].

- Uygun değil ($P/A < 100 \text{ W/m}^2$)
- Değerlendirilebilir ($100 \text{ W/m}^2 < P/A < 300 \text{ W/m}^2$)
- İyi ($300 \text{ W/m}^2 < P/A < 700 \text{ W/m}^2$)
- Çok iyi ($P/A \geq 700 \text{ W/m}^2$)

Çizelge 4.10. Ölçüm verileri ve modeller için hesaplanan güç yoğunlukları.

Güç Yoğunluğu	<u>Weibull Dağılımı</u>				<u>Rayleigh Dağılımı</u>			<u>Lognormal Dağıl.</u>	
	En				En				
	Küçük				Küçük				
	Kareler	Moment			Kareler	Moment		Moment	
	Metodu	MOM	Metodu	Metodu	Metodu	MOM	Metodu	MOM	Metodu
Ölçüm Verileri	9,6067	3,7845	270,6501	7,1942	2,8438	11,7711	8,0376	3,5123	232,423



Şekil 4.15. Model grafikleri ve ölçüm verileri histogramı.

Eskipazar için ölçüm verileri ile modellerle elde edilen ortalama güç yoğunluğu değerleri Çizelge 4.10'da gösterilmiştir. Güç yoğunluğu açısından hem verilerden elde edilen, hemde tahminlenen değerlere bakıldığında Eskipazar MGM istasyonu bölgesi rüzgar enerjisi yatırımı için uygun olmadığı görülmektedir. Modellere baktığımızda güç yoğunluğunu; Rayleigh ve Weibull dağılımları moment metodu ile elde edilen parametreler için en az hata ile en iyi modelleyen dağılım fonksiyonlarıdır. Yine

Çizelge 4.10 göre Eskipazar MGM istasyonu bölgesinin Rayleigh dağılımına uyduğu söylenebilir. Çizelge 4.9 hesaplanan parametrelerle gerçek ve tahmin edilen rüzgar hız frekans dağılım değerleri çizelge 4.11 de verilmiştir.

Çizelge 4.11. Eskipazar rüzgar hız ölçümleri ve parametre tahmin metotlarına göre model frekans değerleri.

V	Ölçüm Frekansı	Weibull Dağılımı			Rayleigh Dağılımı			Lognormal Dağılımı	
		En Küçük Kareler Metodu	MOM Metodu	Moment Metodu	En Küçük Kareler Metodu	MOM Metodu	Moment Metodu	MOM Metodu	Moment Metodu
1	0,3407	0,398	0,0398	0,3645	0,4266	0,2244	0,2705	0	0,0122
2	0,3493	0,3416	0,0689	0,258	0,3649	0,3062	0,3363	0,913	0,0877
3	0,1422	0,1515	0,0899	0,1407	0,1329	0,2428	0,2284	0,1676	0,1188
4	0,0988	0,0412	0,1024	0,0654	0,0244	0,1327	0,1004	0,0008	0,1173
5	0,0531	0,0073	0,107	0,0269	0,0024	0,0527	0,0301	0	0,1041
6	0,0123	0,0009	0,1047	0,0101	0,0001	0,0156	0,0063	0	0,0885
7	0,0030	0,0001	0,0972	0,0035	0	0,0035	0,0009	0	0,0738
8	0,0002	0	0,0861	0,0011	0	0,0006	0,0001	0	0,0611
9	0,0003	0	0,0732	0,0003	0	0,0001	0	0	0,0506
10	0,0000	0	0,0599	0,0001	0	0	0	0	0,0419
11	0,0000	0	0,0473	0	0	0	0	0	0,0348
12	0,0000	0	0,0361	0	0	0	0	0	0,029
13	0,0000	0	0,0267	0	0	0	0	0	0,0243

Karabük Kahyalar ölçüm istasyonu için 2013-2014 yıllarının 10 ayını kapsayan rüzgar hızı ve yönü verilerine dayalı olarak rüzgar karakteristiklerinin değişimi Weibull ve Burr dağılımı kullanılarak incelenmiş, rüzgar güç yoğunluğu hesaplamaları yapılmıştır. Karabük ve Kahyalar RGİ ölçüm verilerinden hesaplanan ortalama hız, standart sapma ve güç yoğunluğu bilgileri Çizelge 4.12’de verilmiştir. RGİ hız verilerinden elde edilen güç yoğunluğu değerine göre Karabük MGM RGİ bölgesi rüzgar enerjisi yatırımı açısından çok zayıf bir bölgedir. Kahyalar RGİ bölgesi ise güç yoğunluğu değerleri açısından rüzgar enerjisi yatırımında değerlendirilebilir bir bölgedir.

Weibull dağılımının parametrelerini tahmin için EKKM, MOM ve MM metotları kullanılmıştır. Burr dağılımının parametrelerini tespit etmek için, ilk defa en küçük kareler yöntemi ile k ’nın artan değerlerine bağlı olarak iteratif işlemler ile a ve b katsayılarının bulunması için yeni bir yaklaşımla Eşitlikler elde edilmiştir. Dahası Burr olasılık dağılımı fonksiyonun parametreleri maksimum olabilirlik metodu (MOM) ile hesaplanmıştır. Hesaplanan parametre değerleri Çizelge 4.13 de verilmiştir.

Çizelge 4.12. Karabük ve Kahyalar RGİ gözlemlenen rüzgar güç yoğunluğu değerleri.

Gözlem İstasyonu	Ortalama Hız (m/s)	Standart Sapma (m/s)	Ölçülen Güç Yoğunluğ (W/m ²)	Güç Yoğunluğu Sınıfı
Karabük	1,3636	0,7773	5,4334	Zayıf
Kahyalar	3,3914	2,2136	103,7443	Orta

Çizelge 4.13. Karabük ve Kahyalar'ın Weibull ve Burr fonksiyonları parametre tahmin metotlarına göre dağılım parametreleri.

Gözlem İstasyonu		Weibull		Burr		
		k	c	a	b	K
Karabük	EKM	0,3474	0,2357	7,0906	0,1347	0,116
	MOM	1,9554	4,7375	12,7352	1,0054	0,0494
Kahyalar	EKM	1,1572	3,2089	1,6052	5,31	2,981
	MOM	1,8408	7,305	16,9304	1,0026	0,0292

Karabük ve Kahyalar RGİ verileri ile hesaplanan Weibull ve Burr dağılım parametreleri Çizelge 4.13 verilmiştir. Hesaplanan bu parametreler ile elde edilen rüzgar hız frekansları ve gerçek frekanslar kıyaslanmış; Weibull ve Burr dağılım modelleri performans değerleri; belirlilik (determinasyon) katsayısı ve hata kareleri toplamının karekökü (HKTK: RMSE) değerleri Çizelge 4.14'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre Burr dağılım modelinde Weibull dağılım modelinden daha başarılı bir şekilde Karabük ve Kahyalar rüzgar hız HKTK kriterine göre daha iyi modellenmiştir.

Çizelge 4.14. Karabük ve Kahyalar için Weibull ve Burr dağılım modelleri performans ölçümleri.

Gözlem istasyonu	Ölçüt	Weibull EKM	Weibull MOM	Burr EKM	Burr MOM
Karabük	RMSE	0,1939	0,2147	0,1796	0,1404
	R ²	0,5177	0,7375	0,4544	0,7533
Kahyalar	RMSE	0,024	0,0643	0,0209	0,0347
	R ²	0,9835	0,9811	0,982	0,9816

Weibull ve Burr dağılımları ile güç yoğunluğu ve ortalama hız tahminleri ise Çizelge 4.15 ve Çizelge 4.16'da verilmiştir. Bu sonuçlara göre EKKM ile hesaplanan Burr dağılım parametreleriyle gerçek değerlere en yakın güç yoğunluğu sonuçları elde edilmiştir. Yine ortalama hızı ise Burr dağılımı Kahyalar RGİ için en az hata ile tahmin etmiştir.

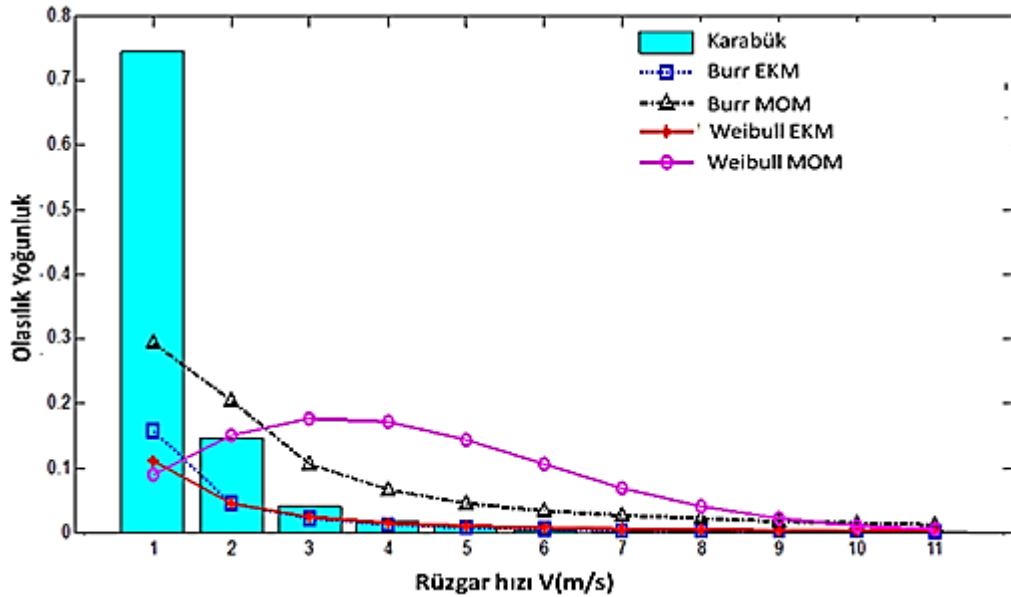
Çizelge 4.15. Karabük ve Kahyalar RGİ ölçülen ve modellerle hesaplanan güç yoğunlukları.

Gözlem İstasyonu	Ölçülen (W/m^2)	Weibull EKM	Weibull MOM	Burr EKM	Burr MOM
Karabük	7,1011	19,6904	138,1251	14,7921	86,6853
Kahyalar	103,7443	117,2848	536,9436	94,9225	301,5609

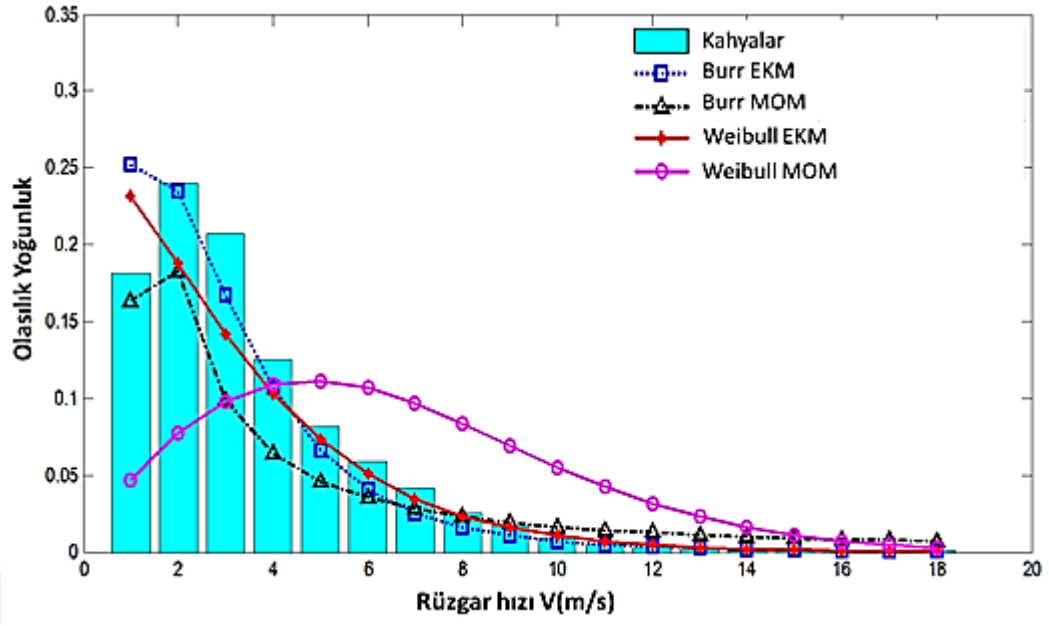
Çizelge 4.16. Karabük ve Kahyalar'ın ölçülen ve tahminlenen rüzgar hız ortalamaları.

Gözlem İstasyonu	Ölçülen Ortalam Hız (m/s)	Weibull EKM	Weibull MOM	Burr EKM	Burr MOM
Karabük	1,3169	0,6238	4,1584	0,5726	2,5184
Kahyalar	3,3914	3,0196	6,4102	2,8797	3,3208

Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de rüzgar hız frekans dağılımı histogram grafikleri ve modellerin ürettiği frekanslarla oluşturulan grafikler verilmiştir. Grafiksel olarak değerlendirildiğinde, hem Karabük hemde Kahyalar RGİ verileri için Burr dağılım (EKKM ile hesaplanan katsayıları kullanan) modeli rüzgar hız frekansına en uygun grafik olarak görülmektedir.



Şekil 4.16. Karabük merkez için Weibull ve Burr dağılım fonksiyonları grafikleri.



Şekil 4.17. Karabuk Kahyalar için Weibull ve Burr dağılım fonksiyonları grafikleri.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. SONUÇLAR

Dünyada ve Türkiye’de enerji tüketimi sürekli yıldan yıla artmaya devam etmektedir. İnsanların enerji talebinin kesintisiz, en düşük maliyetle ve istenen kalitede karşılanması, arz güvenliğinin ve sürdürülebilirliğin sağlanması çok önemlidir. Bu nedenle kesintisiz elektrik enerjisi üretimi, iletimi ve dağıtım planlamaları yapabilmek için üretim ve tüketim tahminlerinin yapılması gerekmektedir. Özellikle enerji kaynağı olarak ülkemizin dışa bağımlılığını ortadan kaldırmak ve çevreye zarar vermeyen yerli- yenilenebilir alternatif enerji kaynaklarının kullanımını sağlamak için enerji kaynaklarının potansiyelinin ve enerji üretimlerinin iyi tahmin edilmesi gerekmektedir.

Bu maksatla yapılan bu çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Karabük rüzgar hız potansiyeli ve tahminleri için; Kahyalar RGİ kurulmuş ve ölçümler yapılmış, MGM Karabük İl Müdürlüğü’nden Karabük merkez ve Eskipazar ilçesi RGİ ölçüm verileri temin edilmiştir.
- Elde edilen veriler incelenmiş; Kahyalar RGİ verileri çizelge (Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2) ve grafiklerle (Şekik 3.3 ve Şekik 3.4) özetlenmiştir. Aylık ortalama maksimum rüzgar hızı ve aylık ortalama minimum rüzgar hızı, Ağustos ayında sırasıyla 4.70 m/s ve Ocak ayında 2,64 m/s olarak ölçülmüştür. Yıllık ortalama rüzgar hızı yaklaşık 3.37 m/s olarak tespit edilmiştir..

- Bu çalışmada enerji tahmini yöntemleri yapılan tarama sonuçlarına göre; yatırım (potansiyel) tahminleri, üretim tahminleri ve tüketim tahminleri olarak Çizelge 3.6’da sınıflandırılmıştır. Ayrıca rüzgar güç tahmin modelleri Çizelge 3.3’de özetlenmiştir. Rüzgar enerjisi işletme ve tahmin programları ve geliştirici ülkeleri Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5’de verilmiştir
- Rüzgar enerjisi üretiminde rüzgar hızının şiddeti çok önemli olduğundan, rüzgar hızını tahmin etmek için stokastik modellerle Karabük verileri tahmin edilmiştir. Ölçülen verilere dayalı oluşturulan ARIMA(5,0,0), ARIMA(14,0,0), ARIMA(16,0,0) ve ARIMA(1,1,9) modelleri; Çizelge 4.1, Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’de özet istatistiksel bilgileri verilmiştir. Hata değerlerinde de görüldüğü gibi, AR(p) modellerinin ARIMA(1,1,9) modelinden daha iyi sonuç verdiği ortaya çıkmıştır. Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6 incelendiğinde performans sonuçları birbirine yakın olup ARIMA(5,0,0), ARIMA(14,0,0) AİC bilgi kriterine, korelasyon ilişkisine ve hatalarla birlikte parametre sayısı göz önüne alındığında, ARIMA(14,0,0) modelinin Karabük rüzgarlarını tahminlemek için kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır.
- Rüzgar hızını zaman düzleminde günlük ve saatlik olarak ÇKA YSA modeli ile tahminlenmiştir. Oluşturulan ÇKA YSA programının da Karabük rüzgar verilerini tahmininde kullanılabileceği tespit edilmiştir. Tahmin grafikleri incelendiğinde ÇKA tahmin modellerinden hesaplanan günlük ve saatlik tahmin eğrileri gerçek rüzgar hızı eğrilerine oldukça uygun olduğu görülmüştür. Hesaplanan sonuçlar ileri beslemeli ÇKA ağı Tahmin modelinin, günlük ve saatlik ortalama rüzgar hızı tahmini için genelleme kapasitesine ulaştığını göstermektedir.
- Rüzgar hızını yılın gün numarasına ve günün saatine göre tahminlemek için analitik yaklaşımli günlük ve saatlik tahmin modelleri önerilmiştir. Önerilen modllerle tahminler yapılmış ve YSA ÇKA modeli ile kıyaslanmıştır. YSA ve önerilen analitik yaklaşıma dayalı model karşılaştırıldığında günlük ortalama rüzgar hız tahminleri açısından; gerçek sonuçlarla, tahmin sonuçlarının korelasyonu incelendiğinde düşük hızlı bölgelerde analitik yaklaşımli model

korelasyonu daha yüksektir. Yüksek rüzgar hızına sahip ölçüm istasyonunda YSA modellerin korelasyonu daha yüksektir. RMSE ve Ki Kare performansı bakımından incelendiğinde YSA modeller, önerilen analitik yaklaşım modelinden daha başarılıdır.

- Yapılan çalışmada a, b, c, d reel katsayıları deneme yoluyla genelde 1 seçilerek hesaplamalar yapılmıştır. Model katsayıları en küçük kareler tahmincisi veya farklı bir metotla analitik yöntemin katsayıları hesaplanırsa daha yüksek performans gösterebilir. Başka bir çalışmada önerilen analitik yaklaşım metodunun katsayıları en küçük kareler metodu ile hesaplandıktan sonra tahminler YSA, ARIMA modelleriyle karşılaştırılabilir. Ayrıca analitik yaklaşım metodu geçen yıl bilgileri kullanılarak gelecek yılın günlük ortalama rüzgar hızı olarak mevsimsel etkiyle birlikte simüle edebileceği ve aynı şekilde bir yıllık verileri saatlik ortalamalar olarak tahmin edebileceği görülmektedir. Model eksik verileri olan ölçüm istasyonlarının, veri tamamlama işini yapabilecek potansiyeli taşımaktadır.
- Karabük İl Meteoroloji işleri genel müdürlüğünce Eskipazar bölgesinde veri alınan 10 m yüksekliğe sahip genel ölçüm direğinin bulunduğu noktanın rüzgar enerjisi potansiyeli düşüktür. Ortalama güç yoğunluğu 100 W/m^2 değerinden daha küçük olduğundan dolayı rüzgar gücü sınıflanmasında zayıf potansiyeli gösteren rüzgar gücü sınıfına girmektedir (Çizelge 2.6). Sonuç olarak ölçüm noktası rüzgar ile elektrik üretmek için yatırıma uygun değildir.
- Yapılan istatistiksel analiz ve rüzgar verilerinin karakterizasyonunda, Eskipazar rüzgar hızı dağılım verilerini Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu, Rayleigh ve Lognormal fonksiyonlarından daha iyi modellediği, Şekil 4.1 ve Çizelge 4.3 incelendiğinde anlaşılmaktadır. Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3 incelenmesinde rüzgar güç yoğunluğunu ise moment metodu ile hesaplanan parametreler için, Rayleigh dağılımının daha iyi modellediği görülmektedir.

- Karabük MGM il müdürlüğü RGİ verileri; Weibull, Rayleigh, Lognormal ve Maksimum Entropi dağılımı ile modelleme çalışmasında, en uygun modelin Weibull dağılım modeli olduğu görülmüştür [101].
- Ayrıca Karabük MGM il müdürlüğü RGİ verileri; Weibull ve Burr dağılım fonksiyonları ile de modellenmeye çalışılmıştır. Karabük RGİ verilerini, Burr dağılım modelinin Weibull'dan daha iyi modellediği Şekil 4.16, Çizelge 4.14 ve Çizelge 4.15 incelendiğinde görülmektedir.
- Burr olasılık yoğunluk fonksiyonun Karabük Kahyalar rüzgar hızı dağılım verilerini modelleyebildiği Şekil 4.17'de görülmektedir. Burr dağılımının parametrelerini tahmin etmek için, ilk defa en küçük kareler yöntemi ile k 'nın artan değerlerine bağlı olarak iteratif işlemler ile a ve b katsayılarının bulunması için, yeni bir yaklaşımla denklemler elde edilmiştir.
- Kahyalar RGİ verilerine göre, bu istasyonun güç yoğunluğu $103,744 \text{ W/m}^2$ olarak tesbit edilmiş ve Çizelge 2.6'ya göre elektirik üretimi açısından çok ekeonomik olmasa da orta, yani değerlendirilebilir rüzgar enerjsisi potansiyeline sahiptir. Bu bölgedeki güç yoğunluğu değerlerinin küçük çaplı uygulamalarda kullanılabileceği ortaya çıkmıştır.

Bu çalışmada özellikle rüzgar hızının tahminlenmesi ile ilgili olarak zaman bazlı tahmin çalışmalarında bulunulmuştur. İlk olarak stokastik süreç içeren ARIMA modelleriyle Karabük rüzgar hızları modellenerek tahminlenmiş, Karabük iline ait ARIMA modelleri oluşturulmuştur. Ayrıca zaman eksenli olarak yapay sinir ağları kullanılarak günlük ve saatlik rüzgar hızları tahmin edilmiştir. Bununla birlikte yeni analitik bir yaklaşımla günlük ve haftalık günlük ve saatlik ortalama olarak Karabük rüzgar hızını tahmin eden bir model önerilmiştir. Model başarımı YSA ile kıyaslanmıştır. Ayrıca yatırım amaçlı ve rüzgar potansiyelini hesaplamada kullanılan ve rüzgar hızını karakterize eden olasılıksal dağılım modelleri incelenmiştir. Karabük rüzgar verileri özellikle Weibull ve Burr dağılımı modeli ile incelenmiştir. Burr dağılım modelinin parametreleri hesabı için, literatürde ilk defa en küçük kareler yöntemi ile hesaplama denklemleri farklı bir yaklaşımla elde edilmiştir.

5.2. ÖNERİLER

Bu çalışmada stokastik yöntemlerden ARIMA modelleri, Karabük verileri için oluşturulmuş ve yine saatlik ve günlük ortalamaları tahmin etmek için analitik bir model önerilmiştir. Ayrıca olasılık dağılım modelleri ile Karabük rüzgar hızı karakterizasyonu analiz ve tahmin edilmiştir. Karabük rüzgar hız ve potansiyeli tahmininde araştırılması gereken hususlar ve daha iyi sonuçlar elde etmek için aşağıdaki öneriler sıralanabilir.

- Rüzgar enerjisi yatırımı açısından yapılan ölçüm verileri değerlendirilmiştir. Karabük REPA haritasına göre daha verimli olan bölgeler için, ölçümler yapılarak Karabük'ün gerçek rüzgar enerji potansiyeli, tahmin ve tesbit edilebilir.
- Grafikler ve tablolar değerlendirildiğinde analitik yaklaşım modelinin geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca YSA ile birlikte hibrit olarak da kullanılabilir. Buna ilave olarak ARIMA modelleri ile de hibrit kullanım denenebilir. Önerilen analitik yaklaşım modeli düzeltme terimi/leri ve optimizasyon teknikleri ile geliştirilebilir.
- Rüzgar hızı frekans dağılımının modellenmesinde tek modlu olmayan (bimodal olan) veriler, bilinen dağılım fonksiyonları ile uyumlu olmadığı durumlarda, veriler çeyreklikler şeklinde incelenerek, bu modellerin kombinasyonu ile modelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Ataseven, M. S., "Türkiye'deki Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu, Ocak 2018", **Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (TUREB)**, (2018).
2. Özpınar, M. A., "Yenilenebilir Enerji Santrallerinde Yapay Sinir Ağları Yöntemiyle Enerji Üretiminin Modellenmesi Ve Planlanması", **Doktora Tezi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, (2007).
3. Hocaoglu, F. O., "Rüzgar Ve Güneş Verilerinin Sinyal İşleme Yöntemleriyle Analizi Ve Sistem Modellemesi", **Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**, (2008).
4. Köse, B., Güneşer, M. T., Yazıcı, M., and Yılmaz, S. H., "Estimation of Wind Energy Potential Eskipazar Using Rayleigh , Lognormal and Weibull Distribution Model", **ISITES2015 Valencia -Spain**, (2015).
5. Durak, M. and Özer, S., "Rüzgar Enerjisi, Teori ve Uygulama", **TUREB**, (2008).
6. YEGM, "Ritim Bilgi", [Http://Www.Ritm.Gov.Tr/AboutUs/Ritm.Php](http://www.Ritm.Gov.Tr/AboutUs/Ritm.Php) (Erişim:Mayıs 2018), .
7. Aksoy, S. A., Eryiğit, E., Hashimova, N., İşbilir, M., Avşar, Z. M., Köksal, G., ve Terciyanlı, E., "Rüzgâr Gücü Üretimi İçin Tahmin Ve Teklif Sistemi Tasarımı", **Endüstri Mühendisliği Dergisi**, 3–4: 4–15 .
8. Özdamar, A., "Dünya Ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisinden Yararlanılması Üzerine Bir Araştırma", **Mühendislik Bilimleri Dergisi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi**, 6 (2-3), Denizli., 133–145 (2000).
9. Gasch, R. and Tvele, J., "Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 567 (2012).
10. Yörükoğulları, E., "Yenilenebilir Enerji Kaynakları", **Anadolu Üniversitesi Yayını**, 207 (2013).
11. Yazar, Y., "Türkiye'nin enerjideki durumu ve geleceği", **Seta Analiz**, 1–24 (2010).
12. Kaya, K. Ve Koç, E., "Enerji üretim santralleri maliyet analizi", **Mühendis Ve Makina**, 56 (660), S. 61-68, (2015).
13. Türkçü, S. İ., "Türkiye'nin Rüzgar Enerjisi Politikaları Ve Entegre Sistemlere Entegrasyonu", **Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, (2005).

14. Özgür, M. A., "Kütahya Rüzgar Karakteristiğinin İstatistiksel Analizi ve Elektrik Üretimine Uygulanabilirliği", *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği ABD Doktora Tezi*, 298 (2006).
15. İnternet: Strateji Geliştirme Başkanlığı, E. V. T. K. B., "Dünya ve Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Görünümü", http://www.enerji.gov.tr/Resources/Sites/1/Pages/Sayi_15/mobile/index.html#p=9.
16. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği (TÜREB), "Türkiye Rüzgar Enerjisi Sektör Toplantısı Sonuç Raporu", (2018).
17. Köse, B., Atila, Ü., Güneşer, M. T., Ve Recebli, Z., "An Approach To Estimate Hourly & Daily Mean Wind Speed And Comparison With Artificial Neural Network", *10th International Clean Energy Symposium, 24-26 October 2016, Istanbul, Turkey*, (October): 24–26 (2016).
18. İnternet: Rica, C., "http://Gwec.Net/Wp-Content/Uploads/Vip/GWEC_PRstats2017_EN-003_FINAL.Pdf".
19. WindEurope, "Wind in power 2017", (February): 1–12 (2018).
20. İnternet: "<http://Files.Gwec.Net/Register/Success/?File=/Files/GWR2016.Pdf>", .
21. S. K., Morthorst, P.-E., and Awerbuch, S., "The economics of wind energy", *A Report By The European Wind Energy Association*, (2009).
22. Şenel, M. C. and Koç, E., "Dünyada ve Türkiye’de rüzgar enerjisi durumu genel değerlendirme", *Mühendis Ve Makina*, Cilt-56 (663): 46–56 (2015).
23. Ateş, A. M., "Otonom Rüzgâr Türbinlerinde Sistem Karakteristiklerinin Belirlenmesi ve Optimizasyonu", *Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2012).
24. Mathew, S., "Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics", *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*, 1-246 (2007).
25. Güzel, B., "Açık Deniz Rüzgar Enerjisi, Fizibilite Adımları İle Bozcaada Ve Gökçeada Örnek Çalışması", *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü*, (2012).
26. Yerebakan, M., "Rüzgar Enerjisi", *İTO (İstanbul Ticaret Odası) Yayını, 2001-33*, (2001).
27. Akdağ, S. A., Dinler, A., ve Menten, Ş. S., "Rüzgar Karakteristiğinin Analizi", *IV. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu IV. Yeksem 2007, İstanbul*, (2007).
28. Yeter, P., "Rüzgar Karakteristiği Ve Enerjisine Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi", *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2011).
29. Tanrıöver, M., "Rüzgâr ve Güneş Enerjili Güç Sistemleri Ders Notu", *Yıldız*

Teknik Üniversitesi, İstanbul, (2011).

30. Hatipoğlu, A., "Rüzgâr Santrallerinde Rüzgâr Karakteristiği ve Saha Topografisine Göre Türbin Seçimi ve Yerleştirilmesi", *Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2010).
31. Özdamar, A., "Farklı Anma Güçlü Rüzgar Türbinlerinin Çeşitli Kriterlere Göre Karşılaştırılması", 17–27 (2001).
32. Thapar, V., Agnihotri, G., and Sethi, V. K., "Critical analysis of methods for mathematical modelling of wind turbines", *Renewable Energy*, 36 (11): 3166–3177 (2011).
33. Köse, B., "Rüzgar Enerjisi Sistemleri Ders Notları", *Karabük Üniversitesi, Karabük*, (2015).
34. Rüstemoğlu, S., "Akiş Alan Modellemesi Ve İstatistiksel Enerji Öngörüsü: Maslak Örneği", *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2010).
35. TRUEPOWER, AWS, "Wind Resource Assessment Handbook", *The New York State Energy Research And Development Authority (NYSERDA)*, (2010).
36. Wu, J., Wang, J., and Chi, D., "Wind energy potential assessment for the site of Inner Mongolia in China", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 21: 215–228 (2013).
37. Solyalı, D., Altunç, M., Tolun, S., and Aslan, Z., "Wind resource assessment of Northern Cyprus", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 55: (2016).
38. Türksoy, F., "Rüzgar Verisi Ölçümü Ve Analizi", *Wind Energy Symposium (5 – 7 April 2001) İzmir*, 87–103 (2001).
39. GH and Partners, "GH WindFarmer: Theory Manual", 64 (2009).
40. Carta, J. A., Ramírez, P., and Velázquez, S., "A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis. Case studies in the Canary Islands", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 13 (5): 933–955 (2009).
41. Murthy, K. S. R. and Rahi, O. P., "A comprehensive review of wind resource assessment", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 72 (July 2016): 1320–1342 (2017).
42. Köse, B., Düz, M., Güneşer, M. T., and Recebli, Z., "Estimating Wind Energy Potential With Predicting Burr Lsm Parameters : A Different Approach", *Sigma J Eng & Nat Sci*, 36 (2): 387–402 (2018).
43. Biçen, C., "Box-Jenkins Zaman Serisi Analiz Yöntemi ile İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağları Tahminlerinin Karşılaştırması", *Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Biyoistatistik Programı*, Ankara, (2006).
44. Baran, T. and Bacanlı, Ü. G., "Uygun stokastik model seçim ölçütlerinin

- değerlendirilmesi", *Teknik Dergi/Technical Journal Of Turkish Chamber Of Civil Engineers*, 17 (4): 3987–4002 (2006).
45. Can, M., "İşletmelerde Zaman Serileri Analizi İle Tahmin", *Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü*, (2012).
 46. Çebi, H., "Yapay Sinir Ağları", 1. Ed., *Ekin Yayınevi*, 133 (2011).
 47. Monteiro, C., Keko, H., Bessa, R., Miranda, V., Botterud, A., Wang, J., and Conzelmann, G., "A Quick Guide to Wind Power Forecasting :", *Argonne National Laboratory*, (2009).
 48. Foley, A. M., Leahy, P. G., Marvuglia, A., and McKeogh, E. J., "Current methods and advances in forecasting of wind power generation", *Renewable Energy*, 37 (1): 1–8 (2012).
 49. Zhao, X., Wang, S., and Li, T., "Review of evaluation criteria and main methods of wind power forecasting", *Energy Procedia*, 12: 761–769 (2011).
 50. Johnson, G. L. ., "Wind Energy Systems", Electronic. Ed., 449 (2006).
 51. Altınay, G., "Aylık Elektrik Talebinin Mevsimsel Model ile Orta Dönem Öngörüsü", 1–23 (2010).
 52. Suganthi, L. and Samuel, A. A., "Energy models for demand forecasting - A review", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 16 (2): 1223–1240 (2012).
 53. Oliveira, W. S. De, Fernandes, A. J., and Gouveia, J. B., "Economic metrics for wind energy projects", (May 2014): (2011).
 54. Hau, E., "Wind Turbines; Fundamentals, Technologies, Application, Economics", *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, (2006).
 55. Blanco, M. I., "The economics of wind energy", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 13 (6–7): 1372–1382 (2009).
 56. Lackner, M. A., Rogers, A. L., and Manwell, J. F., "Uncertainty Analysis in MCP-Based Wind Resource Assessment and Energy", 130 (August 2008): 1–10 (2017).
 57. Yılmaz, V. and Aras, H., "Statistical analysis of wind speed data", XVIII: (2005).
 58. Ramírez, P. and Carta, J. A., "The use of wind probability distributions derived from the maximum entropy principle in the analysis of wind energy. A case study", *Energy Conversion And Management*, 47 (15–16): 2564–2577 (2006).
 59. Lo Brano, V., Orioli, A., Ciulla, G., and Culotta, S., "Quality of wind speed fitting distributions for the urban area of Palermo, Italy", *Renewable Energy*, 36 (3): 1026–1039 (2011).
 60. Güçlüer, D., "Kısa Süreli Rüzgâr Enerjisi Tahminleri Ve Ülkemiz Açısından Önemi", *ICCI Bildiriler Kitabı*, 67–73 (2011).
 61. Şahin, A. D., "Türkiye Rüzgarlarının Alan-Zaman Modellemesi", *Doktora Tezi*,

İstanbul Teknik Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü, (2001).

62. Wu, Y. and Hong, J., "A literature review of wind forecasting technology in the world", *IEEE*, 504–509 (2007).
63. Giebel, G., Brownsword, R., Kariniotakis, G., Denhard, M., and Draxl, C., "The State-Of-The-Art in Short-Term Prediction of Wind Power A Literature Overview", *Technical Report, ANEMOS.Plus*, 1–109 (2011).
64. Hodge, B., Zeiler, A., Brooks, D., Blau, G., Pekny, J., and Reklatis, G., "Improved Wind Power Forecasting with ARIMA Models", *21st European Symposium On Computer Aided Process Engineering – ESCAPE 21, Halkidiki, Yunanistan*, (2011).
65. Bivona, S., Bonanno, G., Burlon, R., Gurrera, D., and Leone, C., "Stochastic models for wind speed forecasting", *Energy Conversion And Management*, 52 (2): 1157–1165 (2011).
66. Carapellucci, R. and Giordano, L., "A methodology for the synthetic generation of hourly wind speed time series based on some known aggregate input data", *Applied Energy*, 101: 541–550 (2013).
67. Türksoy, F., "Saatlik ve aylık rüzgar verisiyle rüzgar enerjisi modellemesi", *Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (1997).
68. Yalta, A. Talha., "Zaman Serileri Ekonometrisine Giriş: Box-Jenkins Yöntemi", *TÜBA, Ekonometri 2*, <http://Www.Acikders.Org.Tr>, 0 (Ekim): (2011).
69. Erdoğan, E., "Zaman Serilerinde Arima Modelleri", *Yüksek Lisans Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, 142 S, Muğla*, (2006).
70. Kaynar, O. and Taştan, S., "Zaman serisi analizinde MLP yapay sinir ağları ve ARIMA modelinin karşılaştırılması", *Erciyes Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 33: 161–172 (2009).
71. Öztemel, E., "Yapay Sinir Ağları", 3. Ed., *Papatya Yayıncılık Eğitim*, İstanbul, (2012).
72. Gavin, H., "The Levenberg-Marquardt method for nonlinear least squares curve-fitting problems", *Department Of Civil And Environmental Engineering, Duke University*, 1–15 (2011).
73. Tutak, T. and Güder, Y., "Matematiksel Modellemenin Tanımı, Kapsamı ve Önemi", *Turkish Journal Of Educational Studies*, 1 (1): 173–190 (2014).
74. Erdem, E. and Shi, J., "ARMA based approaches for forecasting the tuple of wind speed and direction", *Applied Energy*, 88 (4): 1405–1414 (2011).
75. Juban, J., Siebert, N., and Kariniotakis, G. N., "Probabilistic Short-term Wind Power Forecasting for the Optimal Management of Wind Generation", *2007 IEEE Lausanne Power Tech*, 683–688 (2007).
76. Celik, A. N., "Review of Turkey's current energy status: A case study for wind

- energy potential of Çanakkale province", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 15 (6): 2743–2749 (2011).
77. Morgan, E. C., Lackner, M., Vogel, R. M., and Baise, L. G., "Probability distributions for offshore wind speeds", *Energy Conversion And Management*, 52 (1): 15–26 (2011).
 78. İlkılıç, C., Aydın, H., and Behçet, R., "The current status of wind energy in Turkey and in the world", *Energy Policy*, 39 (2): 961–967 (2011).
 79. Gökçek, M., Bayülken, A., and Bekdemir, Ş., "Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Kırklareli, Turkey", *Renewable Energy*, 32 (10): 1739–1752 (2007).
 80. Akpınar, S. and Akpınar, E. K., "Estimation of wind energy potential using finite mixture distribution models", *Energy Conversion And Management*, 50 (4): 877–884 (2009).
 81. Eskin, N., Artar, H., and Tolun, S., "Wind energy potential of Gökçeada Island in Turkey", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 12 (3): 839–851 (2008).
 82. Akdağ, S. A. and Güler, Ö., "Evaluation of wind energy investment interest and electricity generation cost analysis for Turkey", *Applied Energy*, 87 (8): 2574–2580 (2010).
 83. Ucar, A. and Balo, F., "Evaluation of wind energy potential and electricity generation at six locations in Turkey", *Applied Energy*, 86 (10): 1864–1872 (2009).
 84. Ulgen, K. and Hepbasli, A., "Determination of Weibull parameters for wind energy analysis of Izmir, Turkey", *International Journal Of Energy Research*, 26 (6): 495–506 (2002).
 85. Fyrripiis, I., Axaopoulos, P. J., and Panayiotou, G., "Wind energy potential assessment in Naxos Island, Greece", *Applied Energy*, 87 (2): 577–586 (2010).
 86. Xydis, G., Koroneos, C., and Loizidou, M., "Exergy analysis in a wind speed prognostic model as a wind farm sitting selection tool: A case study in Southern Greece", *Applied Energy*, 86 (11): 2411–2420 (2009).
 87. Weigt, H., "Germany's wind energy: The potential for fossil capacity replacement and cost saving", *Applied Energy*, 86 (10): 1857–1863 (2009).
 88. Mirhosseini, M., Sharifi, F., and Sedaghat, A., "Assessing the wind energy potential locations in province of Semnan in Iran", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 15 (1): 449–459 (2011).
 89. Mostafaeipour, A. and Abarghoeei, H., "Harnessing wind energy at Manjil area located in north of Iran", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 12 (6): 1758–1766 (2008).
 90. Najafi, G. and Ghobadian, B., "LLK1694-wind energy resources and development in Iran", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 15 (6): 2719–2728 (2011).

91. Ghorashi, A. H. and Rahimi, A., "Renewable and non-renewable energy status in Iran: Art of know-how and technology-gaps", ***Renewable And Sustainable Energy Reviews***, 15 (1): 729–736 (2011).
92. Bakhoda, H., Almassi, M., Moharamnejad, N., Moghaddasi, R., and Azkia, M., "Energy production trend in Iran and its effect on sustainable development", ***Renewable And Sustainable Energy Reviews***, 16 (2): 1335–1339 (2012).
93. Elhadidy, M. A. and Shaahid, S. M., "Feasibility of hybrid (wind + solar) power systems Dhahran, Saudi Arabia", ***Renewable Energy***, 16: 970–976 (1999).
94. Almalki, S. J. and Nadarajah, S., "Modifications of the Weibull distribution: A review", ***Reliability Engineering And System Safety***, 124: 32–55 (2014).
95. Genc, A., Erisoglu, M., Pekgor, A., Oturanc, G., Hepbasli, A., and Ulgen, K., "Estimation of wind power potential using weibull distribution", ***Energy Sources***, 27 (9): 809–822 (2005).
96. Arslan, T., Bulut, Y. M., and Altin Yavuz, A., "Comparative study of numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy potential", ***Renewable And Sustainable Energy Reviews***, 40: 820–825 (2014).
97. Carta, J. A., Bueno, C., and Ramirez, P., "Statistical modelling of directional wind speeds using mixtures of von Mises distributions: Case study", ***Energy Conversion And Management***, 49 (5): 897–907 (2008).
98. Liu, F. J. and Chang, T. P., "Validity analysis of maximum entropy distribution based on different moment constraints for wind energy assessment", ***Energy***, 36 (3): 1820–1826 (2011).
99. Bury, K., "Statistical distributions in engineering", ***1st Ed., UK: Cambridge University Press; 1999, .***
100. Justus, C. G., Hargraves, W. R., Mikhail, A., and Graber, D., "Methods for Estimating Wind Speed Frequency Distributions", ***Journal Of Applied Meteorology***, 17 (3): 350–353 (1978).
101. Köse, B., Küçük, A. Z., Ordu, B., ve Çay, Y., "Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Tahminlenmesinde Kullanılan Olasılık Dağılım Fonksiyonlarına Genel Bir Bakış Ve Karabük Rüzgar Verilerine Uygulanması", ***Bilim Ve Teknoloji Dergisi A-Uygulamalı Bilimler Ve Mühendislik***, 14 (2): 183–190 (2013).
102. Chang, T. P., "Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application", ***Applied Energy***, 88 (1): 272–282 (2011).
103. Carneiro, T. C., Melo, S. P., Carvalho, P. C. M., and Braga, A. P. de S., "Particle Swarm Optimization method for estimation of Weibull parameters: A case study for the Brazilian northeast region", ***Renewable Energy***, 86: (2016).
104. Saleh, H., Abou El-Azm Aly, A., and Abdel-Hady, S., "Assessment of different methods used to estimate Weibull distribution parameters for wind speed in Zafarana wind farm, Suez Gulf, Egypt", ***Energy***, 44 (1): 710–719 (2012).

105. Usta, I. and Kantar, Y. M., "Analysis of some flexible families of distributions for estimation of wind speed distributions", ***Applied Energy***, 89 (1): 355–367 (2012).
106. Akpınar, S. and Kavak Akpınar, E., "Wind energy analysis based on maximum entropy principle (MEP)-type distribution function", ***Energy Conversion And Management***, 48 (4): 1140–1149 (2007).
107. Chellali, F., Khellaf, A., Belouchrani, A., and Khanniche, R., "A comparison between wind speed distributions derived from the maximum entropy principle and Weibull distribution. Case of study; Six regions of Algeria", ***Renewable And Sustainable Energy Reviews***, 16 (1): 379–385 (2012).
108. Putnam, P. C, "Power from the wind", ***1st Ed., New York: Van Nostrand Reinhold; 1948., .***
109. S, Z. and J, J., "Computation of special functions", ***1st Ed., New York: Wiley; 1996. P. 444., .***
110. Kul, S., "P değeri nedir? Nasıl yorumlanır?", ***Erişim 20.06.2018: Http://Www.P005.Net/Pdegerinedir, .***
111. Ozdamar, A., Gursel, K. T., Orer, G., and Pekbey, Y., "Investigation of the potential of wind-waves as a renewable energy resource: By the example of Cesme - Turkey", ***Renewable And Sustainable Energy Reviews***, 8 (6): 581–592 (2004).



EK AÇIKLAMALAR A.

BURR DAĞILIM FONKSİYONU İKİNCİ TÜREV DENKLMLERİ

$$\begin{bmatrix} a_{i+1} \\ b_{i+1} \\ k_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ k_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial S_1}{\partial a} & \frac{\partial S_1}{\partial b} & \frac{\partial S_1}{\partial k} \\ \frac{\partial S_2}{\partial a} & \frac{\partial S_2}{\partial b} & \frac{\partial S_2}{\partial k} \\ \frac{\partial S_3}{\partial a} & \frac{\partial S_3}{\partial b} & \frac{\partial S_3}{\partial k} \end{bmatrix}_{(a_i, b_i, c_i)}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}_{(a_i, b_i, c_i)} \quad (\text{A.1})$$

$$S_{1a} = \frac{\partial S_1}{\partial a} = \sum \left[-\frac{1}{a^2} + (k+1) \frac{\left(\log \left(\frac{x}{b} \right) \right)^2}{\left[2 + \left(\frac{x}{b} \right)^a + \left(\frac{b}{x} \right)^a \right]} \right] \quad (\text{A.2})$$

$$S_{1b} = \frac{\partial S_1}{\partial b} = \sum \left[-\frac{1}{b} - \frac{(k+1)}{b} \frac{\left[\left(1 + \left(\frac{b}{x} \right)^a \right) + a \left(\frac{b}{x} \right)^a \log \left(\frac{x}{b} \right) \right]}{\left[1 + \left(\frac{b}{x} \right)^a \right]^2} \right] \quad (\text{A.3})$$

$$S_{1k} = \frac{\partial S_1}{\partial k} = \sum \frac{\log \left(\frac{x}{b} \right)}{\left(1 + \left(\frac{b}{x} \right)^a \right)} \quad (\text{A.4})$$

$$S_{2a} = \frac{\partial S_2}{\partial a} = \sum -\frac{\log \left(\frac{b}{x} \right)}{\left[2 + \left(\frac{x}{b} \right)^a + \left(\frac{b}{x} \right)^a \right]} \quad (\text{A.5})$$

$$S_{2b} = \frac{\partial S_2}{\partial b} = \sum \frac{-\frac{a}{b}}{\left[2 + \left(\frac{x}{b} \right)^a + \left(\frac{b}{x} \right)^a \right]} \quad (\text{A.6})$$

$$S_{2k} = \frac{\partial S_2}{\partial k} = \sum \frac{1}{(k+1)^2} \quad (\text{A.7})$$

$$S_{3a} = \frac{\partial S_3}{\partial a} = \frac{\log \left(\frac{x}{b} \right) \left(\frac{x}{b} \right)^a}{\left[1 + \left(\frac{x}{b} \right)^a \right]} = \sum \frac{\log \left(\frac{x}{b} \right)}{\left[1 + \left(\frac{b}{x} \right)^a \right]} \quad (\text{A.8})$$

$$S_{3b} = \frac{\partial S_3}{\partial b} = \sum -\frac{\frac{a}{b}}{\left[1 + \left(\frac{b}{x} \right)^a \right]} \quad (\text{A.9})$$

$$S_{3k} = \frac{\partial S_3}{\partial k} = \sum -\frac{1}{k^2} \quad (\text{A.10})$$

ÖZGEÇMİŞ

Bayram KÖSE 1974 yılında Çorum’da doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Sungurlu Lisesi Matematik Bölümü’nden 1993 yılında mezun oldu. Selçuk Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Matematik Bölümü’nden mezun olduktan sonra 1998-2000 yıllarında İzmir Özel Envar Dersanesi’nde Matematik ve Geometri öğretmeni olarak çalıştı. Daha sonra 2000-2005 yıllarında İzmir Kemalpaşa Bağyurdu Kazım Dirik İlköğretim Okulu’nda (İÖO) ve İzmir Gazi Osman Paşa İÖO’nda çalıştı. Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü’ndeki yüksek lisans eğitimini “Pistonlu ve Merkezkaç Rüzgar Su Pompalarının Karşılaştırılması” tezi ile 2004 yılında bitirdi.

İzmir Anadolu İmam Hatip Lisesinde 2005-2009 yılları arası çalıştı ve 2009 yılında MEB’nın Eğitim Araştırma ve Geliştirme Dairesi (EARGED) ile TÜBİTAK ortak projesi olan İÖO’ları 6., 7., ve 8. Sınıf öğrencileri, Fen Bilimleri ve Matematik proje yarışması, “Bu Benim Eserim” (BBE) projesinde İzmir Bölgesi ve ili temsilcisi pozisyonunda Matematik Uzmanı ve proje eğitmeni olarak çalıştı. 2009 yılında İzmir İlk Kurşun Lisesinde 2010 yılına kadar Matematik öğretmeni olarak çalıştı. 2010 yılında askerliğini kısa dönem olarak tamamladı. Askerlik dönüşü 2010 Eylül’den 2011 Nisan’a kadar İzmir Anadolu İmam Hatip Lisesinde çalıştı.

Nisan 2011’den beri Karabük Üniversitesi Eskipazar MYO’da Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Ana Bilim Dalı’ndaki doktora eğitimini Temmuz 2018’de “Rüzgar Hız ve Potansiyelinin Stokastik Süreçlerle Modellenerek Karabük İlinde Uygulanması” başlıklı tez ile tamamladı. Evli ve 4 çocuğu olan Bayram Köse, İngilizce bilmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Karabük Üniversitesi, Eskipazar MYO, Eskipazar / KARABÜK

Tel : (505) 695 2179;

E-posta : bayramkose@karabuk.edu.tr ve matematikcibkose@gmail.com