

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL ANALİZİNDE KARIŞIM DAĞILIMLARI
TEMELLİ TEKNİKLERİN KULLANILMASI**

DOKTORA TEZİ

Seyit Ahmet AKDAĞ

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

MAYIS 2018

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL ANALİZİNDE KARIŞIM DAĞILIMLARI
TEMELLİ TEKNİKLERİN KULLANILMASI**

DOKTORA TEZİ

**Seyit Ahmet AKDAĞ
(301072007)**

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Önder GÜLER

MAYIS 2018

İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301072007 numaralı Doktora Öğrencisi Seyit Ahmet AKDAĞ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL ANALİZİNDE KARIŞIM DAĞILIMLARI TEMELLİ TEKNİKLERİN KULLANILMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önündesunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Önder GÜLER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mehmet KURBAN**
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Prof. Dr. Sibel MENTEŞ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ozan ERDİNÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Burak BARUTÇU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **09 Mart 2018**
Savunma Tarihi : **24 Mayıs 2018**

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının başlangıcından bitimine kadar düşünceleriyle çalışmaya yön veren, yardım ve katkılarını esirgemeyen, büyük emeği geçen değerli danışmanım Prof. Dr. Önder GÜLER'e, tez izleme komitesi üyeleri olan tezin her aşmasında tecrübeleri ve derin bilgi birikimleri ile beni destekleyen saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Sibel MENTEŞ ve Dr. Öğr. Üyesi Burak Barutçu'ya, bir dönem birlikte çalıştığımız değerli arkadaşlarım Dr. M. Berker YURTSEVEN'e, Dr. Emre ERKİN'e, Ebru ACUNER TÜRET'e, Seher ATEŞ'e ve bu süreç zarfında her zaman yanımda olan değerli aileme en içten dileklerimle sonsuz teşekkür ederim.

MART 2018

Seyit Ahmet AKDAĞ
(Elektrik Yüksek Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	42
2.2. Önerilen Tez Çalışmasının Özgünlüğü	82
3. WEIBULL DAĞILIMI.....	85
3.1. Moment Yöntemi (MM).....	91
3.2. Justus Moment Yöntemi (JMM)	94
3.3. Grafik Yöntemi (GM) (LS) (LES)	94
3.4. En Yüksek Olabilirlik Yöntemi (MLH)	96
3.5. Modified Maximum Likelihood Metodu (MMLM).....	97
3.6. Alternatif Maximum Likelihood Metodu (AMLM).....	97
3.7. WAsP Metodu (WM)	98
3.8. PD Metodu	99
3.9. Yeni Enerji Pattern Factor Metodu (NEPFM)	100
3.10. Kullanılan Diğer Dağılımlar.....	115
3.11. Uygulama	115
4. KARIŞIM DAĞILIMLARI	157
4.1. Weibull&Weibull Karışım Dağılımı Modeli (MWblWbl)	161
4.2. Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağılım (Tnd).....	165
4.3. Tek Taraftan Kesilmiş Normal Weibull Dağılımı Karışım Modeli (MTndWbl)	166
4.4. Entropi Optimizasyon Dağılımları	166
4.4.1 Maksimum entropi dağılımı.....	169
4.5. Uygulama	171
5. RÜZGAR ENERJİSİ SANTRALİ MODELLEMESİ.....	177
5.1. Bölgenin WAsP ile Modellenmesi	179
5.2. Rüzgar Türbini Güç Eğrisinin Çıkarılması	184
5.3. Dağılımlara Göre Rüzgar Türbini Ortalama Gücü ve Güç Yoğunluğu Analizi	194
5.4. WAsP ile Enerji Üretim Hesabı Yapılması	211
6. SONUÇLAR	215
KAYNAKLAR	221
ÖZGEÇMİŞ.....	239

KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
A-D	: Anderson Darling testi
AIC	: Akaike İnfomasyon Kriteri
AEP	: Yıllık Enerji Üretimi
AMLH	: Alternative Maximum Likelihood Metodu
AMM	: Alternatif Moment Metodu
EPDK	: Enerji Piyasası Düzeleme Kurumu
GM	: Grafik Metodu
GW	: Giga Watt
GWh	: Giga Watt Saat
JMM	: Justus Moment Metodu
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
kW	: Kilo Watt
kWh	: Kilo Watt Saat
K-S	: Kolmogorov Smirnov testi
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
MBrrBrr	: Mixture Burr 3P Burr 3P Dağılımı
MExpBrr	: Mixture Burr 3P Exponential Dağılımı
MGamBrr	: Mixture Burr 3P Gamma Dağılımı
MGumBrr	: Mixture Burr 3P Gumbel Dağılımı
MHNrBrr	: Mixture Burr 3P HalfNormal Dağılımı
MIGmBrr	: Mixture Burr 3P Inverse Gamma Dağılımı
MIGsBrr	: Mixture Burr 3P Inverse Gaussian Dağılımı
MLgnBrr	: Mixture Burr 3P LogNormal Dağılımı
MLH	: Maksimum Likelihood Metodu
MM	: Moment Metodu
MMLH	: Modified Maximum Likelihood Metodu
MNrmBrr	: Mixture Burr 3P Normal Dağılımı
MRylBrr	: Mixture Burr 3P Rayleigh Dağılımı
MTndBrr	: Mixture Burr 3P Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağılımı
MTrWBrr	: Mixture Burr 3P Truncated Weibull Dağılımı
MWblBrr	: Mixture Burr 3P Weibull Dağılımı
MExpExV	: Mixture Exponential ExtremeValue Dağılımı
MExpGam	: Mixture Exponential Gamma Dağılımı
MExpIGm	: Mixture Inverse Gamma Exponential Dağılımı
MExpLgn	: Mixture Exponential LogNormal Dağılımı
MExpLgs	: Mixture Exponential Logistic Dağılımı
MExpWbl	: Mixture Exponential Weibull Dağılımı
MExVExV	: Mixture ExtremeValue ExtremeValue Dağılımı

MExVGum	: Mixture ExtremeValue Gumbel Dağılımı
MExVNrm	: Mixture ExtremeValue Normal Dağılımı
MExVTnd	: Mixture ExtremeValue Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağılımı
MGamExV	: Mixture Gamma ExtremeValue Dağılımı
MGamGam	: Mixture Gamma Gamma Dağılımı
MGamGum	: Mixture Gamma Gumbel Dağılımı
MGamHnr	: Mixture Gamma HalfNormal Dağılımı
MGamIGs	: Mixture Gamma Inverse Gaussian Dağılımı
MGamLgn	: Mixture Gamma Lognormal Dağılımı
MGamLgs	: Mixture Gamma Logistic Dağılımı
MGamTnd	: Mixture Gamma Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağılımı
MGamWbl	: Mixture Gamma Weibull Dağılımı
MHnrExV	: Mixture HalfNormal ExtremeValue Dağılımı
MHnrIGm	: Mixture HalfNormal Inverse Gamma Dağılımı
MHnrGum	: Mixture HalfNormal Gumbell Dağılımı
MHnrIGs	: Mixture HalfNormal Inverse Gaussian Dağılımı
MHnrLgn	: Mixture HalfNormal LogNormal Dağılımı
MHnrLgs	: Mixture HalfNormal Logistic Dağılımı
MHnrNrm	: Mixture HalfNormal Normal Dağılımı
MHnrRyl	: Mixture HalfNormal Rayleigh Dağılımı
MIGmExV	: Mixture Inverse Gamma ExtremeValue Dağılımı
MIGmGam	: Mixture Inverse Gamma Gamma Dağılımı
MIGmGum	: Mixture Inverse Gamma Gumbel Dağılımı
MIGmLgn	: Mixture Inverse Gamma LogNormal Dağılımı
MIGmNrm	: Mixture Inverse Gamma Normal Dağılımı
MIGmRyl	: Mixture Inverse Gamma Rayleigh Dağılımı
MIGmTnd	: Mixture Inverse Gamma Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağılımı
MIGmWbl	: Mixture Inverse Gamma Weibull Dağılımı
MIGsExp	: Mixture Inverse Gaussian Exponential Dağılımı
MIGsGum	: Mixture Inverse Gaussian Gumbel Dağılımı
MIGsIGm	: Mixture Inverse Gaussian Inverse Gamma Dağılımı
MIGsLgn	: Mixture Inverse Gaussian Lognormal Dağılımı
MIGsRyl	: Mixture Inverse Gaussian Rayleigh Dağılımı
MIGsWbl	: Mixture Inverse Gaussian Weibull Dağılımı
MInWExV	: Mixture Inverse Weibull ExtremeValue Dağılımı
MInWGam	: Mixture Inverse Weibull Gamma Dağılımı
MInWNrm	: Mixture Inverse Weibull Normal Dağılımı
MInWRyl	: Mixture Inverse Weibull Rayleigh Dağılımı
MInWTnd	: Mixture Inverse Weibull Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağılımı
MLgnExV	: Mixture LogNormal ExtremeValue Dağılımı
MLgnGum	: Mixture LogNormal Gumbel Dağılımı
MLgnLgn	: Mixture LogNormal LogNormal Dağılımı
MLgnLgs	: Mixture LogNormal Logistic Dağılımı
MLgnNrm	: Mixture LogNormal Normal Dağılımı
MLgnRyl	: Mixture LogNormal Rayleigh Dağılımı
MLgnTnd	: Mixture LogNormal Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağılımı

MLgnWbl	: Mixture LogNormal Weibull Dağılımı
MLgsExV	: Mixture Logistic ExtremeValue Dağılımı
MLgsIGm	: Mixture Logistic Inverse Gamma Dağılımı
MLgsIGs	: Mixture Logistic Inverse Gaussian Dağılımı
MLgsLgs	: Mixture Logistic Logistic Dağılımı
MNrmLgs	: Mixture Logistic Normal Dağılımı
MLgsTnd	: Mixture Logistic Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağılımı
MNakNak	: Mixture Nakagami Nakagami Dağılımı
MNrmGam	: Mixture Normal Gamma Dağılımı
MNrmIGs	: Mixture Normal Inverse Gaussian Dağılımı
MNrmNrm	: Mixture Normal Normal Dağılımı
MRylWbl	: Mixture Rayleigh Weibull Dağılımı
MRylExp	: Mixture Rayleigh Exponential Dağılımı
MRylExV	: Mixture Rayleigh ExtremeValue Dağılımı
MRylGam	: Mixture Rayleigh Gamma Dağılımı
MRylGum	: Mixture Rayleigh Gumbel Dağılımı
MRylLgs	: Mixture Rayleigh Logistic Dağılımı
MRylNrm	: Mixture Rayleigh Normal Dağılımı
MRylRyl	: Mixture Rayleigh Rayleigh Dağılımı
MTndTnd	: MixtureTek Taraftan Kesilmiş Normal karışımı
MExVTrW	: Mixture Truncated Weibull ExtremeValue Dağılımı
MTrWGam	: Mixture Truncated Weibull Gamma Dağılımı
MGumTrW	: Mixture Truncated Weibull Gumbel Dağılımı
MIGmTrW	: Mixture Truncated Weibull Inverse Gamma Dağılımı
MIGsTrW	: Mixture Truncated Weibull Inverse Gaussian Dağılımı
MInWTrW	: Mixture Truncated Weibull Inverse Weibull Dağılımı
MLgnTrW	: Mixture Truncated Weibull Lognormal Dağılımı
MLgsTrW	: Mixture Truncated Weibull Logistic Dağılımı
MNrmTrW	: Mixture Truncated Weibull Normal Dağılımı
MRylTrW	: Mixture Truncated Weibull Rayleigh Dağılımı
MTrWTrW	: Mixture Truncated Weibull Truncated Weibull Dağılımı
MW	: Mega Watt
MWblTrW	: Mixture Truncated Weibull Weibull Dağılımı
MWblExV	: Mixture Weibull ExtremeValue Dağılımı
MWblGum	: Mixture Weibull Gumbel Dağılımı
MWblHNR	: Mixture Weibull HalfNormal Dağılımı
MWblInW	: Mixture Weibull Inverse Weibull Dağılımı
MWblLgs	: Mixture Weibull Logistic Dağılımı
MWblNrm	: Mixture Weibull Normal Dağılımı
MWblTnd	: Mixture Weibull Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağılımı
MWblWbl	: Mixture Weibull Weibull Dağılımı
NEPFM	: Novel Energy Pattern Factor Metodu
NPV	: Net Şimdiki Değer
OECD	: Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü
OPEC	: Petrol İhraç Eden Ülkeler Örgütü
PD	: Power Density Metodu

PV	: Fotovoltaik
REPA	: Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası
TWh	: Tera Watt Saat
WM	: WAsP Metodu
YEKDEM	: Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması

SEMBOLLER

a_0, a_1, a_2, a_3	: Katsayı
b_0, b_1, b_2, b_3	: Katsayı
c	: Weibull dağılımı ölçek parametresi (m/s)
c_0	: Katsayı
$c_{1,2}$	: Weibull Weibull dağılımı ölçek parametreleri (m/s)
CF	: Kapasite faktörü
d_0	: Katsayı
EPF	: Enerji pattern faktör
$f_{in}(x)$	: Karışım dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonu
$f_{max}(x)$	: Maksimum entropi dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonu
$f_w(v)$	: Weibull dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonu
$F_w(v)$	: Weibull dağılımı kümülatif fonksiyonu
$f_{ww}(v)$	: Weibull Weibull karışım dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonu
$f_{w1,2}(v)$	: Karışım dağılımında Weibull dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonu
$F_{ww}(v)$	: Weibull Weibull karışım dağılımı kümülatif yoğunluk fonksiyonu
$H(x)$	: Shannon entropisi
$g(v, \xi, \theta)$	: Tek taraftan kesilmiş normal dağılım olasılık yoğunluk fonksiyonu
$gf_w()$	: Weibull tek taraftan kesilmiş normal dağılım yoğunluk fonksiyonu
$G(v, \xi, \theta)$	: Tek taraftan kesilmiş normal dağılım kümülatif yoğunluk fonksiyonu
$GF_w()$	: Weibull tek taraftan kesilmiş normal dağılım kümülatif fonksiyonu
k	: Weibull dağılımı şekil parametresi (-)
$k_{1,2}$	: Weibull Weibull dağılımı şekil parametreleri (-)
L	: Olabilirlik fonksiyonu
ku	: Kurtosis
m	: Metre
m	: Pozitif sayı
m_n	: Moment fonksiyonu
m_3	: Üçüncü moment değeri
ME	: Ortalama hata (%)
$MinE$	: En küçük bağıl hata (%)
$MaxE$	: En büyük bağıl hata (%)
$V_w(v)$	: Weibull dağılımı varyansı
v_m	: Veri seti ortalama rüzgar şiddeti
$\bar{v}$	: Ortalama rüzgar şiddeti (m/s)
$\bar{v}^3$	: Veri seti küplerin ortalaması
v_i	: Veri seti rüzgar şiddeti
$\bar{v}_{ww}$	: Weibull Weibull karışım dağılımında ortalaması
$\bar{v}_{ww}^3$	: Weibull Weibull karışım dağılımında üçüncü momenti
$\bar{v}_{TN}$	: Tek taraftan kesilmiş normal dağılım ortalaması
$\bar{v}_{TNW}$	: Weibull tek taraftan kesilmiş normal dağılım ortalaması
$\bar{v}_{TNW}^3$	: Weibull tek taraftan kesilmiş normal dağılım üçüncü momenti

$\overline{v^3}_{TN}$	: Tek taraftan kesilmiş normal dağılım üçüncü momenti
N	: Evrensel uzay
N_k	: Alt kümelerin eleman sayısı
$RMSE$	: Karasel ortalama hata
P_{ts}	: Zaman serisi güç yoğunluğu
p_i	: Ağırlık katsayısı
π	: Pi sayısı
$\Gamma(.)$	: Gamma fonksiyonu
σ_v	: Weibull dağılımı standart sapması
ρ	: Hava yoğunluğu (kg/m ³)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : AB ülkelerinin yenilenebilir enerji kullanımı (1000 TEP).....	14
Çizelge 1.2 : AB ülkelerinin yenilenebilir enerji kullanım oranları (%).....	15
Çizelge 1.3 : AB ülkeleri kurulu güç değişimi.....	16
Çizelge 1.4 : Seçilmiş ülkelerin kapasite faktörleri.....	20
Çizelge 1.5 : Farklı bölgelerin kapasite faktörleri (%).....	21
Çizelge 1.6 : REPA rüzgar enerjisi ekonomik potansiyeli.....	23
Çizelge 1.7 : Fiyat aralıklarına göre ihale sonuçları.....	26
Çizelge 1.8 : Seçilmiş rüzgar enerjisi santllarının kapasite faktörleri (%).....	26
Çizelge 1.9 : Yük tevzi merkezlerine göre aylık kapasite faktörleri (%).....	27
Çizelge 2.1 : Weibull ve Rayleigh dağılımına göre üretim karşılaştırması.....	54
Çizelge 2.2 : Weibull dağılımı parametre belirleme yöntemleri karşılaştırması.....	56
Çizelge 2.3 : WAsP üretim tahmin hataları.....	73
Çizelge 2.4 : Rüzgar türbinleri enerji simülasyonu.....	74
Çizelge 2.5 : WAsP enerji üretim tahmin hataları.....	75
Çizelge 2.6 : WAsP ve dağılımların güç yoğunluğu tahmini karşılaştırılması.....	77
Çizelge 3.1 : NEPFM modelleme hatası.....	101
Çizelge 3.2 : Şekil parametresi için NEPFM metodu katsayıları.....	102
Çizelge 3.3 : NEPFM için hata analizi sonuçları.....	102
Çizelge 3.4 : Gamma fonksiyonu açılımı katsayıları.....	103
Çizelge 3.5 : Hata analizi sonuçları $\Gamma(1 + \frac{1}{k})$ için.....	104
Çizelge 3.6 : MSV hata analizi sonuçları (%).....	105
Çizelge 3.7 : Ülkemizde ölçülen veri seti ile yapılan uygulama.....	106
Çizelge 3.8 : Şekil parametresi.....	106
Çizelge 3.9 : Ölçek parametresi.....	107
Çizelge 3.10 : MSV hata analizi sonuçları (%).....	107
Çizelge 3.11 : AMM hata analizi.....	111
Çizelge 3.12 : AMM şekil parametresi için katsayılar.....	111
Çizelge 3.13 : AMM ve MLH yöntemlerini 16 bölge için karşılaştırılması.....	112
Çizelge 3.14 : Ölçüm noktaları ile ilgili bilgiler.....	116
Çizelge 3.15 : Ankara hata analizi sonuçlar.....	118
Çizelge 3.16 : Ayvalık hata analizi sonuçları.....	121
Çizelge 3.17 : Belen hata analizi sonuçları.....	124
Çizelge 3.18 : Biga hata analizi sonuçları.....	127
Çizelge 3.19 : Datça hata analizi sonuçları.....	130
Çizelge 3.20 : Gebze hata analizi sonuçları.....	133
Çizelge 3.21 : Gökçeada hata analizi sonuçları.....	136
Çizelge 3.22 : Karaman hata analizi sonuçları.....	139
Çizelge 3.23 : Kırklareli hata analizi sonuçları.....	142
Çizelge 3.24 : Kocadağ hata analizi sonuçları.....	145
Çizelge 3.25 : Konya hata analizi sonuçları.....	148

Çizelge 3.26 : Raman hata analizi sonuçları.....	151
Çizelge 3.27 : Sinop hata analizi sonuçları.....	154
Çizelge 4.1 : Weibull ve Weibull&Weibull dağılımı parametreleri.....	172
Çizelge 4.2 : Maksimum entropi dağılımı parametreleri.....	172
Çizelge 4.3 : Moment değerleri.....	173
Çizelge 4.4 : Kapasite faktörü değerleri (%).....	174
Çizelge 4.5 : Kapasite faktörü hata değerleri (%).....	175
Çizelge 4.6 : Kapasite faktörü ortalama mutlak hata değerleri (%).....	175
Çizelge 5.1 : Türbin enerji üretimleri ve kapasite faktörleri.....	183
Çizelge 5.2 : Nacel anemometreye göre belirlenen türbin güçleri.	190
Çizelge 5.3 : Nacel anemometreye göre belirlenen türbin hataları (kW).	191
Çizelge 5.4 : Nacel anemometreye esme sayıları.	192
Çizelge 5.5 : Nacel anemometre kullanılarak yönlere göre türbin gücü çıktıları.	193
Çizelge 5.6 : Veri seti hata analizi sonuçları.	196
Çizelge 5.7 : Kullanılan karışım ve MEP dağılımları.....	198
Çizelge 5.8 : Standart dağılımlar kullanılması sonucu ortalama güç hata analizi. ..	204
Çizelge 5.9 : Standart dağılımlar kullanılması sonucu güç yoğunluğu hata analizi..	205
.....	205
Çizelge 5.10 : Karışım dağılımların ortalama güç hata analizi sonuçları.....	208
Çizelge 5.11 : Karışım dağılımların güç yoğunluğu analizi sonuçları.	210

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Türkiye dış ticaret açığına enerji kaynakları ithalatının etkisi.	2
Şekil 1.2 : Dünya enerji tüketiminin kaynaklara göre değişimi.	5
Şekil 1.3 : Bölgesel enerji tüketim değişimi.	6
Şekil 1.4 : Dünya elektrik üretiminin değişimi.	7
Şekil 1.5 : Seçilmiş ülkelerin demografik yapıları.	8
Şekil 1.6 : Elektrik üretiminde kullanılan kaynakları değişimi.	9
Şekil 1.7 : Haziran 2002-2017 arası dörder aylık petrol fiyatı değişimi.	10
Şekil 1.8 : ABD eklenen kurulu gücün kaynaklara göre oranı.	13
Şekil 1.9 : AB ülkelerinde eklenen kapasitenin kaynaklara göre değişimi.	16
Şekil 1.10 : Dünya rüzgar kurulu gücü değişimi.	19
Şekil 1.11 : Rüzgar enerjisi ile elektrik üretimi (TWh).	20
Şekil 1.12 : Fransa rüzgar enerjisi santrallerinin bölgesel kapasite faktörü.	21
Şekil 1.13 : Farklı yükseklikler için REPA haritaları.	23
Şekil 1.14 : Türkiye kurulu rüzgar gücü değişimi.	24
Şekil 1.15 : Türkiye rüzgar enerjisinden elektrik üretimi.	25
Şekil 1.16 : Santral kapasite faktörü karşılaştırması.	27
Şekil 1.17 : Konumlandırma ve türbin tipinin kapasite faktörüne etkisi.	28
Şekil 1.18 : Trakya tevzi merkezine bağlı santrallerin üretim dağılımı.	29
Şekil 1.19 : Batı Anadolu tevzi merkezine bağlı santrallerin üretim dağılımı.	30
Şekil 1.20 : Doğu Akdeniz tevzi merkezine bağlı santrallerin üretim dağılımı.	31
Şekil 1.21 : Trakya yük tevzi merkezinde aylık bazda saatlik üretimler.	32
Şekil 1.22 : Batı Anadolu yük tevzi merkezinde aylık bazda saatlik üretimler.	34
Şekil 1.23 : Doğu Akdeniz yük tevzi merkezinde aylık bazda saatlik üretimler.	36
Şekil 1.24 : Trakya yük tevzi merkezi günlük kapasite faktörü.	38
Şekil 1.25 : Batı Anadolu bölgesi günlük kapasite faktörü.	38
Şekil 1.26 : Doğu Akdeniz bölgesi günlük kapasite faktörü.	39
Şekil 1.27 : Trakya Bölgesinde beş santralinin saatlik elektrik üretimi değişimi.	41
Şekil 2.1 : Hata analizi sonuçları.	58
Şekil 2.2 : Mevsimsel rüzgar şiddeti frekans dağılımı.	61
Şekil 2.3 : Weibull ve normal&normal karışım dağılımı.	62
Şekil 2.4 : Rüzgar türbini güç eğrisi modelleme teknikleri.	69
Şekil 2.5 : Güç eğrisi modelleme tekniklerine göre kapasite faktörleri.	69
Şekil 2.6 : Türbini güç eğrisi modelleme tekniklerine göre kapasite faktörleri.	70
Şekil 2.7 : Rüzgar türbini güç eğrisi ölçüm sonuçları.	72
Şekil 2.8 : Gerçekleşen üretimin üretim tahminine oranı.	74
Şekil 2.9 : WAsP sonucu türbin bazında üretim hataları.	76
Şekil 2.10 : Rüzgar türbini üretim karşılaştırması.	76
Şekil 2.11 : Farklı simülasyon programlarına göre hatalar.	77
Şekil 2.12 : WAsP WindSim simülasyon sonuçları karşılaştırması.	78
Şekil 2.13 : WAsP ve WindSim rüzgar şiddeti tahmin hataları (%).	79

Şekil 2.14 : Rüzgar şiddeti değişiminin türbin çıkışı üzerine olası etkisi.....	80
Şekil 2.15 : Rüzgar türbini enerji üretimini etkileyen faktörler.....	81
Şekil 3.1 : Ölçek parametresinin ortalamaya oranının değişimi.....	86
Şekil 3.2 : Farklı ölçek parametreleri için Weibull dağılımı.	88
Şekil 3.3 : Farklı şekil parametreleri için Weibull dağılımı.	88
Şekil 3.4 : Weibull dağılımı güç yoğunluğu.....	88
Şekil 3.5 : Farklı parametrelere göre Weibull dağılımı güç yoğunluğu.	89
Şekil 3.6 : Şekil parametresinde değişimin güç yoğunluğuna etkisi.	90
Şekil 3.7 : Şekil parametresinin enerji üretimine etkisi.	90
Şekil 3.8 : Ölçek parametresinin kapasite faktörüne etkisi.....	91
Şekil 3.9 : Moment yöntemi algoritması.	95
Şekil 3.10 : EPF ile şekil parametresinin değişimi.	100
Şekil 3.11 : NEPFM hata analizi.	103
Şekil 3.12 : Şekil parametresine göre Gamma fonksiyonu ve önerilen model.....	103
Şekil 3.13 : Gamma fonksiyonu açılım hatası.	104
Şekil 3.14 : Bölgelerin frekans dağılımı.	109
Şekil 3.15 : Şekil parametresinin C_v göre değişimi.....	110
Şekil 3.16 : Yöntemlerin karşılaştırılması.	111
Şekil 3.17 : 750 kW türbinin zaman serisi ve Weibull dağılımı kapasite faktörü. ..	113
Şekil 3.18 : 1600 kW türbinin zaman serisi ve Weibull dağılımı kapasite faktörü.	114
Şekil 3.19 : Ankara rüzgar histogramı ve kullanılan dağılımlar.....	117
Şekil 3.20 : Ayvalık rüzgar histogramı ve kullanılan dağılımlar.....	120
Şekil 3.21 : Belen rüzgar histogramı ve kullanılan dağılımlar.	123
Şekil 3.22 : Biga rüzgar histogramı ve kullanılan dağılımlar.	126
Şekil 3.23 : Datça rüzgar histogramı ve kullanılan dağılımlar.	129
Şekil 3.24 : Gebze rüzgar histogramı ve kullanılan dağılımlar.	132
Şekil 3.25 : Gökçeada rüzgar histogramı ve kullanılan dağılımlar.....	135
Şekil 3.26 : Karaman rüzgar histogramı ve kullanılan dağılımlar.....	138
Şekil 3.27 : Kırklareli rüzgar histogramı ve kullanılan dağılımlar.....	141
Şekil 3.28 : Kocadağ rüzgar histogramı ve kullanılan dağılımlar.	144
Şekil 3.29 : Konya rüzgar histogramı ve kullanılan dağılımlar.....	147
Şekil 3.30 : Raman rüzgar histogramı ve kullanılan dağılımlar.	150
Şekil 3.31 : Sinop rüzgar histogramı ve kullanılan dağılımlar.	153
Şekil 4.1 : a) Yengeç verisi için frekans dağılımı (kesikli çizgi tek bileşenli, sürekli çizgi karışım dağılımı) b) Karışım dağılımı için toplanmış iki ayrı dağılım ve oluşan karışım dağılımı.....	157
Şekil 4.2 : Çeliklerin mukavemeti ile ilgili dağılım.....	162
Şekil 4.3 : Gaz moleküllerinin dağılımı.....	167
Şekil 4.4 : Farklı olasılık değerlerine göre entropi grafiği.....	168
Şekil 4.5 : 80 metredeki rüzgar şiddeti frekans dağılımı.	172
Şekil 4.6 : Gerçek veri seti ve dağılımlar.....	173
Şekil 5.1 : IEC standartı algoritması.....	178
Şekil 5.2 : WAsP ile modellenen rüzgar santralinde türbin dağılımı.	179
Şekil 5.3 : Aylık bazda ortalama şiddetler ve saatlik rüzgar profili.	179
Şekil 5.4 : Seçilmiş yükseklikler için rüzgar şiddeti frekans dağılımı.....	180
Şekil 5.5 : Aylık bazda rüzgar gülü.	181
Şekil 5.6 : 10 metre verileri simülasyon sonucu (Şiddet ve Güç Yoğunluğu).....	181
Şekil 5.7 : 10 metre verileri simülasyon sonucu (Ölçek ve Şekil Parametreleri). ...	182
Şekil 5.8 : 30 metre verileri simülasyon sonucu (Şiddet ve Güç Yoğunluğu).....	182
Şekil 5.9 : 30 metre verileri simülasyon sonucu (Ölçek ve Şekil Parametreleri). ...	182

Şekil 5.10 : 50 metre verileri simülasyon sonucu (Şiddet ve Güç Yoğunluğu).	182
Şekil 5.11 : 50 metre verileri simülasyon sonucu (Ölçek ve Şekil Parametreleri)..	183
Şekil 5.12 : Türbinlerin konumları ve yükseklikleri.....	183
Şekil 5.13 : IEC standardında belirlenen örnek NTF.	186
Şekil 5.14 : Nacel anemometreye göre türbin çıktıları.	187
Şekil 5.15 : Nacel anemometreye göre türbin hataları.	188
Şekil 5.16 : T11 türbinine ait NTF.....	189
Şekil 5.17 : Veri seti analizinde standart dağılımlar.....	195
Şekil 5.18 : Karışım dağılımları örnekleri.	200
Şekil 5.19 : Standart dağılımların güç yoğunluğu ortalama güç hataları.	207
Şekil 5.20 : WAsP sonuçları.....	212
Şekil 5.21 : WAsP turbine editor programı sonuçları.....	213

RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL ANALİZİNDE KARIŞIM DAĞILIMLARI TEMELLİ TEKNİKLERİN KULLANILMASI

ÖZET

Günümüzde enerji kaynakları, uluslararası ilişkilere yön veren, ülkelerin sınırlarının tekrar çizilmesine neden olan, birçok savaşın çıkmasına ve ekonomik krizlere neden olmuş, üretim sektörlerinin temel girdisi olmanın yanında sosyoekonomik kalkınmanın sağlanabilmesi ve sürdürülebilmesi için vazgeçilemez niteliklere sahip temel öğelerden biri olarak değerlendirilmektedir.

Elektrik enerjisine sürekli, yeterli, kaliteli, ekonomik şekilde erişiminin sağlanabilmesinin doğrudan ekonomik etkileri vardır ve bu da sosyal refah düzeyi üzerinde etkilidir. Elektrik enerjisi, depolama maliyetinin yüksek olması ve büyük ölçekte elektrik enerjisi depolama teknolojilerinin yeterince gelişmemiş olması nedeniyle genel enerji zinciri içindeki diğer enerji çeşitlerinden farklıdır. Elektrik enerjisi üretiminde kullanılan kaynakların seçimini etkileyen faktörler şu şekilde sıralanabilir; ülkelerin nüfus piramidi, büyüme-gelişme hızları, enerji kaynaklarının günümüz fiyatı ve gelecekte olabilecek fiyat dalgalanma riski, enerji kaynağının elde edilme kolaylığı ve sürekliliği, kaynak için başka ülkelere olan bağımlılık, ülkelerinin coğrafi konumlarının sağlamış olduğu fırsatlar veya coğrafi konumlarının oluşturduğu sorunlar, ulusal ve/veya uluslararası güvenlik-tehdit algılamaları ile çevre ve sağlık etkileridir.

Elektrik enerjisi üretiminde kullanılacak kaynaklarının belirlenmesi, teknik, ekonomik, ve çevresel değişkenler ile bu kaynakları kullanmanın dışsal etkileri de dikkate alınarak çözülmesi gereken bir optimizasyon problemidir. Elektrik enerjisi üretiminde kullanılacak kaynak seçimi elektrik şebekesinin planlanmasını, elektrik enerjisi fiyatını ve ürün ile hizmet fiyatlarının oluşmasını etkilemektedir. Ayrıca şebeke ilk yatırım maliyetleri üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Enerji çevrim sektöründe kullanılan fosil enerji kaynaklarından oluşan sera gazı salınımlarının azaltılması günümüzde önemli hale gelmiştir. Diğer taraftan bu kaynakların kullanımına bağlı olarak fosil enerji kaynaklarının rezervlerinin azalması ve kömür hariç bu kaynakların dünyanın belirli bölgelerine yoğun olarak dağılması, enerji güvenliği için ülkeleri yerli ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanmaya zorlamaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının ekonomiye kazandırılması ile kaynak çeşitliliği artacak, sera gazı salınımlarının azalmasında bu kaynaklar etkili olacak ve ekosistem korunacaktır. 2016 yılı sonu itibarıyla kurulu fotovoltaik (PV) gücü 303 GW seviyesine ulaşmış, 375 TWh'lik üretim gerçekleşmiş ve dünya elektrik talebinin % 1,8'i PV'den karşılanmıştır. Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) güneş ve rüzgar enerjisi santrallerinin 2016 yılında eklenen kapasite içerisinde ki oranı sırasıyla % 39 ve % 26'dır. Avrupa Birliği (AB) ülkelerinde ise 2009-2015 yılları arasında kurulu güç artışında 81860 MW ile PV ilk sıradadır. Bunu 75045 MW net kapasite artışı ile rüzgar enerjisi takip etmektedir.

Dünya kurulu rüzgar enerji gücü 1996 yılında dünya elektrik tüketiminin % 0,09'unu karşılarken, 2005 yılında bu oran % 0,67 olmuş ve 2015 yılında ise karşılama oranı % 3,7 seviyesine ulaşmıştır. Danimarka'nın elektrik tüketiminin 2006 yılında % 16,78 rüzgar enerjisinden karşılanmışken, 2016 yılında % 36,8'i rüzgar enerjisinden sağlanmıştır. Danimarka'yı sırasıyla İrlanda (% 27), Portekiz (% 24,7), Güney Kıbrıs (% 19,7), İspanya (% 19), Almanya (% 16), ve Romanya (% 12,5) takip etmektedir. İspanya ve Danimarka'da bazı günler rüzgar enerjisi santrallerinin toplam günlük üretimi elektrik tüketiminden fazla olabilmektedir. Gerek rüzgar türbini kapasitelerinin artması, gerekse azalan üretim maliyetlerinin etkisiyle rüzgar enerjisi kullanımı her geçen gün artmaktadır. Rüzgar enerjisi santralleri 2016 yılında Avrupa ülkelerinde yaklaşık 300 TWh elektrik üreterek elektrik tüketiminin % 10,4'ini karşılamışlardır. Avrupa Birliği (AB) ülkelerinde rüzgar kurulu gücü doğalgazdan sonra ikinci büyük güç durumuna gelmiştir. Birçok Avrupa ülkesinin orta ve uzun vadeli elektrik enerji üretim tüketim planlamasında rüzgar enerjisi kaynakları önemli bir yer tutmaktadır.

Rüzgar enerjisi fizibilite analizleri sırasında yapılan ekonomik ve teknik potansiyel analizlerin hatalı olması sonucunda enerji maliyetleri de hatalı belirlenmiş olur. Bu belirsizlikler yatırım maliyetlerini, dolayısıyla da enerji üretim maliyetlerini, yatırımın geri dönüş riskini ve yatırımcıyı etkilemektedir. Yatırımcılar için yapılması gereken bu belirsizliklerin en aza indirilmesidir. Günümüzde rüzgar enerjisi elektrik üretimi potansiyeli belirlenmesinde sıklıkla Weibull dağılımı kullanılmaktadır. Bu dağılımın kullanılma nedeni, dünyanın birçok bölgesinde rüzgar dağılımına iyi uyduğunun tecrübe edilmesi, dağılımın esnek bir yapıya sahip olması, parametrelerinin belirlenmesindeki kolaylık, parametre sayısının az olması ve parametrelerin bir yükseklik için belirlenmesinin ardından farklı yükseklikler için tahmin edilebilmesi gibi faktörler olarak sıralanabilir. Fakat son yıllarda yapılan çalışmalar rüzgar dağılımının dünyanın her yerinde Weibull dağılımı ile temsil edilemeyeceğini ya da farklı dağılımlar ile yapılan modellemeler sonucu elde edilen başarının Weibull dağılımı ile yapılan modellemelerden daha iyi olabileceği gösterilmiştir.

Bu tez kapsamında, Weibull dağılımı parametrelerinin belirlenmesi için mevcut yöntemler özetlenmiş ve Weibull dağılımını parametrelerinin belirlenmesi için mevcut yöntemlere alternatif olabilecek yeni yöntemler geliştirilmiştir. Geliştirilen parametre belirleme yöntemlerinin doğruluğu, literatürde olan verilerin kullanılması sonucunda gerek rüzgar şiddetinin dağılımının modellenmesi ile gerekse de rüzgar türbini enerji üretim tahminlerinde olan başarısı ile ortaya konmuştur. Ayrıca geliştirilen parametre belirleme yöntemi rüzgar enerjisi modellemelerinde kullanılan dağılımların karşılaştırılmasının yapılması için ülkemizde ölçülmüş rüzgar şiddeti verileri kullanılarak çeşitli dağılımlar ile modellemeler yapılmıştır. Bunlara ek olarak 60 standart dağılım kullanılarak ülkemizde rüzgar şiddeti ölçülmüş, 13 bölge bu dağılımlar ile analiz edilmiş ve üç farklı hata analizi yöntemine göre dağılımların başarısı karşılaştırılmıştır. Bu tez çalışmasındaki amaçlardan bir tanesi, rüzgar şiddeti verilerinin modellenmesinde ve bir rüzgar türbinin enerji üretiminin belirlenmesinde karışım dağılımlarının kullanılabilirliğinin ve başarısının analizidir. Bu kapsamda önce teorik olarak güçleri 225 kW ile 3000 kW arasında değişen, rüzgar çiftliklerinde çok sık kullanılan, 33 farklı rüzgar türbini ile Weibull, Weibull&Weibull karışım dağılımı ve üç farklı maksimum entropi dağılımları (MEP) dağılımı kullanılarak enerji üretim doğruluğu belirlenmeye çalışılmıştır. Karışım dağılımlarının parametre belirleme yöntemlerinin enerji üretim tahmini üzerine etkisi örnek çalışmada

incelenmiştir. Daha sonra ise ülkemizde bir rüzgar santralinde olan rüzgar türbininin gerçekleşmiş enerji üretimi, ticari bir paket programın sonuçları (WAsP), standart dağılımlar, karışım dağılımları ve MEP dağılımları kullanılarak modellenmiştir. Bu çalışmada kullanılan 109 karışım dağılımının 96'sı, ilk defa bu çalışmada kapsamında rüzgar enerjisi potansiyel analizinde kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan 109 dağılımdan MWblWbl dağılımı için parametreler MLH, MOM ve LES ile belirlenmiştir. MTndTnd dağılımının parametreleri ise MLH ve LES ile belirlenmiştir.

UTILIZATION OF TECHNIQUES BASED ON MIXTURE DISTRIBUTIONS FOR WIND ENERGY POTENTIAL ANALYSIS

SUMMARY

Energy security problem, increasing energy consumption, depletion of conventional energy sources and the environmental concerns are driving many countries worldwide to utilize renewable energy sources. Among renewable energy sources, wind energy has become a promising renewable energy source due to the mature technology and low energy generation cost. Wind energy is considered as highly variable in terms of both temporal and geographical aspects. For this reason wind characteristics evaluation is a basic task in wind farm project site selection. The variation of wind speed can be represented by statistical distributions to estimate the available wind energy potential. When the probability distribution of wind speed is determined, then its characteristics can be obtained.

Probability distribution models provide the quantitative information about the long term characteristics of wind speed at a measurement site. These models allow us to determine the available wind energy potential and wind turbine energy output.

Various models have been used to describe wind speed distribution. Weibull distribution model has been considered as a more representative model to describe wind frequency variations compared to a sample of measured data due to the measurement uncertainty, errors and lack of wind data. Moreover, standards recommend to utilize Weibull distribution to estimate wind energy potential of site. So, Weibull distribution has been used as a default option to estimate electrical energy output of wind turbine or wind farm for numerous commercial wind energy programs such as WAsP and Windrose. For these reasons, Weibull distribution has gained a great acceptance to model wind speed distribution. It is significant to emphasize that Weibull distribution is not able to represent for all wind speed distribution encountered in the world such as sites with high percentages of null wind speeds, short time horizons and bimodal shape distributions.

Parameter estimation of Weibull distribution is a critical topic due to the accuracy of feasibility analysis and maximization of wind farm electrical energy output. Frequency discrepancies may appear between measured wind speed frequency and estimated Weibull distribution frequency. To overcome this problem, several numerical and graphical methods have been developed in the literature to estimate Weibull distribution parameters such as Equivalent Energy Method (EEM), Graphical Method (GM), Justus Moment Method (JMM), Maximum Likelihood Method (MLH), Modified Maximum Likelihood Method (MMLH), Moment Method (MM), a Novel Energy Pattern Factor Method (NEPFM) and Power Density Method (PD) methods. These parameter estimation methods have their own advantages and disadvantages. These parameter estimation methods are compared several times considering various criteria. The main objective of the present thesis is to introduce novel methods to estimate Weibull distribution parameters. These

methods are called Alternative Moment Method (AMM) and Novel Energy Pattern Factor Method. These methods are expressed in an analytical form and do not need an iterative procedure. The efficiency and accuracy of the introduced methods are compared with commonly used parameter estimation methods. To evaluate the introduced estimation methods, wind turbines energy output is calculated from the time series and introduced AMM method is compared. It was shown that energy output estimation from AMM method has a good agreement with the time series energy output. Result of the comparisons showed that introduced methods are estimate distribution parameters accurately.

This is essential in order to make a decision about the economic feasibility of a wind power project and, furthermore, about the selection of the most suitable site for installing a wind farm as well, through the estimation of the Annual Energy Production (AEP) of each wind turbine. Moreover, almost every commercial software that offers estimations of AEP is based on the Weibull distribution.

The results of the literature survey showed that in some cases parameter estimation methods can provide dramatically different results for the distribution parameters. So, in such cases, the typical Weibull distribution underestimates or over estimates annual energy production (and thus the capacity factor) by about 12%.

Performance of distribution parameter estimation methods may depend on various factors such as sample size, measured data format, data recording interval, shape of data distribution, selected goodness of fit test and statistical judgment criteria. So, it can be concluded that there is not a single, universally accepted, best method to estimate Weibull distribution parameters.

In this context, fitting methods must be analysed separately due to the error related to their use. It is widely accepted that parameter estimation methods have vital effects on the success of Weibull distribution. However, there is not a single, universally accepted, best method to estimate Weibull distribution parameters. Thus, literature shows us that this topic is still open to exploration. In this thesis to achieve this goal, alternative Weibull distribution parameter estimation methods are developed.

As stated earlier, in some regions of the world, the use of these widely adopted and recommended distributions lead to incorrect results. For instance, this phenomenon is present when the frequency of the wind speed shows a bimodal distribution. Distributions resulting from mixing two or more component distributions are designated as “mixture” or “compound”. Generally, mixture density functions are an important area of statistics with a wide range of applications. They can, primarily, be used in cases that the characteristic of interest may show a marked difference between different classes of the population, which is difficult to ascertain. Therefore, the population as a whole can be treated as a mixture population and thus gives rise to a mixture population problem. For example, in biology, it is often required to measure a certain characteristic of a population consisting of individuals with different ages. Another important area is often met in engineering where the observations are times to failure of a sample of items. Often failures can occur for more than one reason and each cause of failure yields a sub-population with an underlying distribution. Mixture distributions are even more useful because they are additionally able to represent heterogeneous wind regimes in which there is evidence of bimodality or bitangentiality or, simply, unimodality.

It has been recognized for more than three decades that the mixture Weibull distribution is an appropriate distribution to use in modelling the lifetimes of the units that have more than one failure cause. However, due to the lack of a systematic statistical procedure for fitting an appropriate distribution to such a mixed data set, it has not been widely used.

The Truncated Normal-Weibull mixture distribution (MTNrWbl) takes into account the frequency of null winds, whereas the MWblWbl do not. It can, therefore, better represent wind regimes with high percentages of null wind speeds. However, calculation of the MTrNrWbl is markedly slower.

The main objective of this study is to show that the estimation of the annual energy production and the capacity factor for installed wind turbine using 106 mixture distributions which 96 of them are used firstly in this thesis. Moreover 3 MEP distributions performance and 60 standart distributions are used to estimate the energy potential and energy output.

Observed wind speed frequency histograms of the selected site showed either unimodal or bimodal wind speed distributions, the mixture distributions are generally the more appropriate distributions even in cases that the wind speed data set does not show a bimodal distribution.

1. GİRİŞ

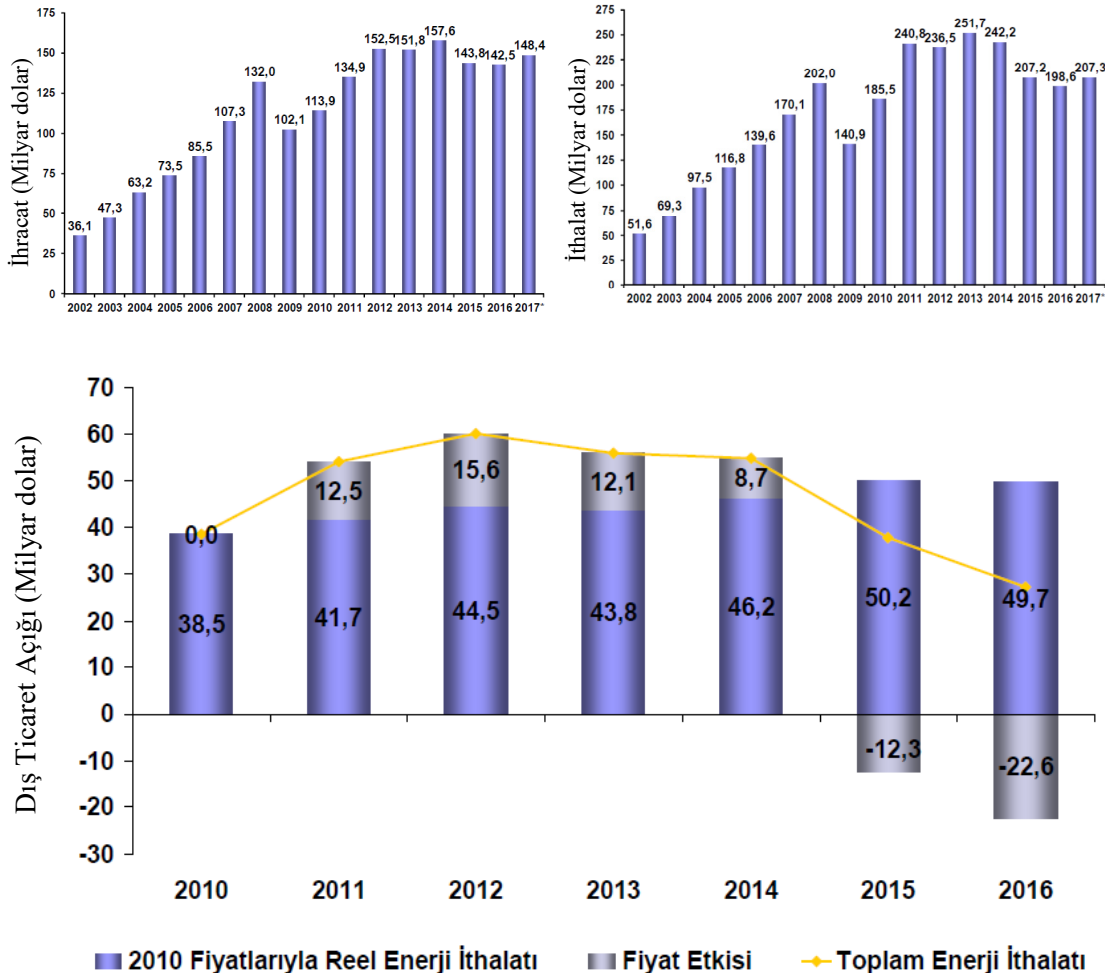
İnsanoğlu, sanayi devrimine kadar tarım yapılan topraklara ve ticaret yollarına hâkim olabilmek için mücadelede bulunmuştur. Sanayi devrimi ile beraber sanayi sektöründe makineleşme hızlanmış ve hızla gelişen sanayinin enerji ihtiyacı enerji kaynaklarının önemini ortaya çıkarmıştır. Günümüzde ise enerji kaynakları, uluslararası ilişkilere yön veren, ülkelerin sınırlarının tekrar çizilmesine neden olan, birçok savaşın çıkmasına ve ekonomik krizlere neden olmuştur ve üretim sektörlerinin temel girdisi olmanın yanında sosyoekonomik kalkınmanın sağlanabilmesi ve sürdürülebilmesi için vazgeçilemez niteliklere sahip temel öğelerden biri olarak değerlendirilmektedir.

Enerji kaynaklarının dünya üzerindeki dağılımının homojen olmaması dünya dengelerini etkilemiştir. Buna bağlı olarak, bazı ülkeler stratejik olarak değerlendirilen enerji kaynaklarına (petrol, doğalgaz ve nükleer yakıtlar) sahip ve üretici durumundadır. Geri kalan ülkeler ise, bu enerji kaynaklarına ihtiyaç duyan, enerji kaynaklarının tüketicisi durumunda olan ülkelerdir. Günümüzde enerji kaynaklarının çeşitliliği ve ekonomik rezerv miktarı bakımından az sayıda ülke kendine yeterlidir. Buna bağlı olarak da enerji kaynaklarının ticareti gelişmekte ve enerji güvenliği konusuna verilen önem her geçen gün artmaktadır.

Enerji kaynaklarına erişim önceliği ve sürekliliği, ekonomik gelişmeleri etkilemiştir. Yakın gelecekte, enerji kaynaklarına dönemsel olarak ulaşma konusunda sorunların yaşanacağı tahmin edilmektedir. Bu nedenle, yeterli, ekosisteme zararsız, kaliteli, ucuz ve zamanında ulaşılabilecek enerji kaynaklarına sahip olabilmek için büyük bir yarış dünyanın süper güçleri ve ekonomik blokları arasında devam etmektedir. Bununla birlikte enerji arz güvenliği için uzun dönemde milli enerji stratejilerinin geliştirilmesi gerekmektedir [1]. Sanayi devriminden günümüze kadar geçen süreçte enerji kaynaklarına ulaşma konusunda zaman zaman çeşitli sorunlar oluşmuştur. Daha da ötesi, enerji kaynaklarını elde edebilme ve elde tutabilme konusu 1. ve 2. dünya savaşlarının çıkmasında temel nedenlerden olmuştur. Ayrıca enerji kaynakları bu savaşların sonucunu etkileyen faktörlerden bir tanesini oluşturmuştur. Bununla

birlikte enerji kaynakları Avrupa Birliği'nin temelini oluşturan iki topluluğun kurulmasını sağlayan temel birleştirici güç olmuştur. Bu topluluklar; Avrupa Kömür ve Çelik Topluluğu ile Avrupa Atom Enerjisi Topluluğu'dur.

Farklı enerji kaynaklarına uzun yıllar yetecek kadar sahip olmayan özellikle gelişmekte olan ülkeler, enerji kaynaklarının fiyatlarındaki dalgalanmalar neticesinde, sosyal refah, enflasyon ve ekonomik gelişmeleri ile ilgili çeşitli sorunlarla karşı karşıya kalabilmektedirler. Gelişmekte olan bir ülke olan Türkiye'nin 1990 yılında birinci enerji kaynakları bakımından dışa olan bağımlılığı % 51,6 iken, 2000 yılında % 67,2 ve 2015 yılında % 75,9'a ulaşmıştır [2]. Enerji kaynakları bakımında dışa olan bağımlılığın (enerji ithalatının) ülkemizin dış ticaret açığında etkisi Şekil 1.1'de gösterilmiştir [3].



Şekil 1.1 : Türkiye dış ticaret açığına enerji kaynakları ithalatının etkisi.

Şekil 1.1'den de görülebileceği gibi dış ticaret açığında enerji ithalatı önemli bir yer tutmaktadır. Türkiye doğalgaz ithalatında dünyada beşinci, kömür ithalatında

yedinci, petrol ithalatında on üçüncü ve enerji ithalatında onuncu sıradadır. Enerji fiyatlarının değişimi, enerji konusunda dışa bağımlı olan ülkelerin ekonomisinde ciddi sorunlara neden olabilmektedir. Enerji kaynakları konusunda dışa olan bağımlılık, bir taraftan dış ticaret açığının yükselmesine sebep olurken, diğer taraftan ise enerji güvenliğini ve genel güvenliği tehdit etmesi muhtemel sonuçlar ortaya çıkarmakta, diğer yandan da ülkemizin dış politikadaki hareket alanını daraltmaktadır. Bütün bu nedenlerle, enerji konusu günümüzde devletlerin uluslararası politikalarını belirlemede etkili olan en önemli öğelerden biri durumuna gelmiştir.

Enerji, ekonomi ve ekosistemin dengede tutulabilmesi önemlidir. Eğer, ekosistemin geri dönüşü olmayacak şekilde kirletilerek enerji üretilirse ve yaşam imkânları yok olursa enerjinin bir önemi kalmayacaktır. Fakat enerji olmadan da günümüz yaşamının devamı mümkün değildir. Yani enerji olmazsa ekosistemin temiz olması da bir anlam ifade etmemektedir. Enerji kaynakları kullanılırken ekosistem yok edilmemelidir. Enerji sanayi sektörünün temel girdisidir ve ekonomik üretimin temelidir. Enerji olmadan ekonomik büyüme ve gelişme olmayacaktır. Bu nedenlerle enerji, ekonomi ve ekosistem arasında sürdürülebilir kalkınma için bir denge sağlanmalıdır.

Enerji kaynakları konvansiyonel ve yenilenebilir kökenli kaynaklar olarak ikiye ayrılmaktadır. Konvansiyonel enerji kaynakları fosil kökenli yakıtlardan oluşmaktadırlar. Fosil yakıtlar bitki ve hayvan gibi organik kalıntıların uzun yıllar boyunca yer altında uygulanan basınç ve yer küreden ısı geçişi sonucu kimyasal bir süreç geçirmesi ile oluşmuşlardır. Bu nedenle fosil yakıtlar kısa zaman aralığında yeniden oluşmayan enerji kaynaklarıdır. Fosil kökenli yakıtlar yeryüzünde depo edilmiş şekilde bulunurlar ve bu yakıtların tüketimleri ile ters orantılı olarak belirli bir ömürleri vardır. Yeni rezerv keşifleri ve bilinen rezervler için yapılan yeni kapasite artışı bu yakıtların tahmini ömürlerini artırmaktadır. Örneğin 1980'li yıllarda olan mevcut rezervlere göre (610 milyar varil) petrol için öngörülen ömür ile 2014 yılında mevcut bilinen rezervlere (1 trilyon 700 milyar varil) göre öngörülen ömür yaklaşık 40 yıl olup, birbiri ile yaklaşık aynıdır [4]. Diğer bir ifade ile petrolün tüketimi artmasına rağmen petrolün kalan ömründe değişimin olmaması veya çok az olmasının nedeni yeni petrol rezervlerin bulunması ya da teknolojik gelişmelerin de

etkisiyle mevcut rezervlerin tahmini kapasitelerinin artmış olmasındandır. Aynı durum doğalgaz ve kömür için de geçerlidir [5].

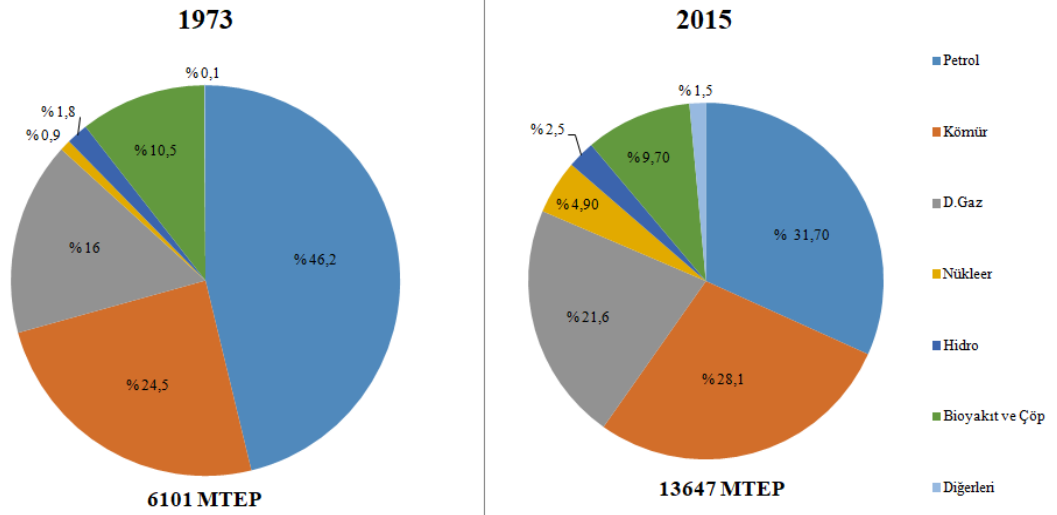
Fosil kökenli enerji kaynaklarının ömürlerinin sınırsız olmamasına rağmen günümüzde bu enerji kaynaklarının yeterince mevcut olmamasından söz edilebilmesi mümkün değildir. Buna karşın, kömür hariç, stratejik nitelikleriyle öne çıkan petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtların belirli yerlerde toplanması, bu kaynakları ithal eden ülkeler için enerji güvenliği açısından ciddi riskler taşımaktadır ve bununla birlikte çeşitli sorunları da beraberinde getirebilmektedir. Bütün bu nedenlerden dolayı yenilenebilir enerji kaynakları önem kazanmış ve yenilenebilir enerji kaynakları konusunda yapılan çalışmalar artmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynakları, belirli bir ömrü olmayan ve insan ömrü süresince kendini yenileyebilen ve tükenmeyen enerji kaynakları olarak kabul edilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının büyük bir bölümü güneş enerjisinin form değiştirmesiyle veya yer kabuğunun derinliklerinden yayılan ısınn etkisiyle meydana gelmişlerdir. Bu kaynakların önemi, enerji güvenliği sağlayarak fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltması, fosil yakıt fiyatlarının kararsızlığına karşı üreticiye güven vermesi, sera gazları emisyonlarını azaltmasına bağlı olarak ekosistemin korunmasına katkı sağlaması ve yeni iş imkânları sağlaması nedeniyle giderek artmaktadır.

Nüfus artışı, yaşam standartlarındaki gelişmeler, teknolojik yenilikler, kentleşme ve sanayileşme enerji talebinde hızlı bir artışı da beraberinde getirmektedir. 1973-2015 yılları arasında dünya nüfusu yaklaşık 3,91 milyardan 7,27 milyara (1,85 katına) ulaşmış ve kişi başına tüketilen enerji miktarı ise 1,21 katına çıkmıştır. Enerji talebi artış hızı nüfus artış hızının yaklaşık 1,20 katıdır. Dünya enerji talebi konusunda hazırlanan senaryolar ve yapılan tahminler nüfus artışıyla paralel olarak enerji tüketiminde olan artışın da uzun yıllar daha devam edeceği üzerinedir [6]. Hızla artan enerji talebini karşılamak kadar, bunun için kullanılan enerji kaynaklarının ekosistem ile uyumlu olması da önemlidir.

1973-2015 döneminde dünya enerji tüketiminin kaynak bazında değişimi Şekil 1.2' de sunulmaktadır [7]. 1973 yılında, dünya enerji tüketiminin % 46,2'si petrolden, % 24,5'i kömürden, % 16'sı doğalgazdan ve % 10,5 atıklar ve biyokütleden karşılanmıştır. Günümüze kadar geçen dönemde bu paylarda önemli olarak

değerlendirilebilecek değişiklikler olmuştur. Örneğin, 2015 yılında kömürün toplam nihai enerji tüketiminde payı artmış ve % 28,1'e çıkmıştır. Petrolün payında önemli miktarda azalma olmuş ve % 31,7'e inmiştir. Doğalgazın payı ise % 21,6'ya ulaşmıştır.



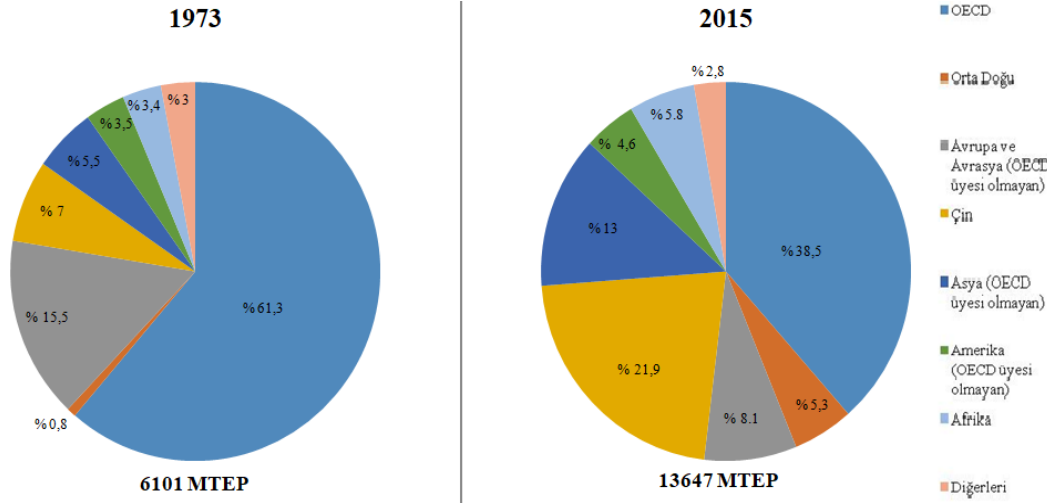
Şekil 1.2 : Dünya enerji tüketiminin kaynaklara göre değişimi.

Küresel enerji tüketiminde fosil kaynaklara olan yüksek bağımlılık oranında, önümüzdeki 5-10 yıl zarfında kayda değer oranda ve ciddi bir değişimin olması beklenmemektedir.

Bölgeler bazında enerji tüketimi değişimi Şekil 1.3'de gösterilmektedir [7]. 1973-2015 arasındaki dönemde, OECD üyesi ülkelerin toplam enerji tüketiminden aldıkları pay % 61,3'den % 38,5'e gerilemiştir. Asya kıtasında olan ülkelerin payı ise (Çin hariç) % 5,5'den % 13'e ulaşmıştır. Enerji tüketiminden Çin'in aldığı pay ise % 7'den % 21,9'a yükselmiştir. OECD üyesi ülkelerinin enerji tüketimi % 40 artmasına rağmen dünya enerji tüketiminden aldıkları pay azalmıştır. Bu ülkelerin dünya enerji tüketiminden aldıkları payın azalma eğiliminin devam etmesi beklenirken, gelişmekte olan ülkelerin bu duruma ters olarak enerji taleplerinde nüfus artışları hızlarının da etkisiyle güçlü, devamlı ve kararlı artış eğilimi vardır. Bu ülkelerin hızla artan enerji talebini karşılamak, enerjide dışa olan bağımlılığı azaltmaları ve olası enerji krizlerinden daha az etkilenmeleri için var olan ekonomik enerji potansiyellerini en kısa dönemde kullanılabilir hale getirmesi, yerli ve yenilenebilir kaynaklarından yararlanmaları gerekmektedir.

Dünyada tüketilen enerji miktarının sürekli artması ve fosil yakıtların hızlı bir şekilde tüketilmesi, son yıllar içerisindeki fosil kökenli enerji kaynaklarının fiyatlarında artış

beklentisi oluşturmaktadır. Diğer bir ifade ile yakın gelecekte enerji kaynaklarının bol ve ucuz olduğu dönemin bitmesi beklenmektedir. Kısa dönem zarfında dünyanın çeşitli bölgelerinde enerji kaynakları için siyasal gerginlikler ortaya çıkacak ya da savaşların olma olasılığı olduğu dönemler gelecektir.



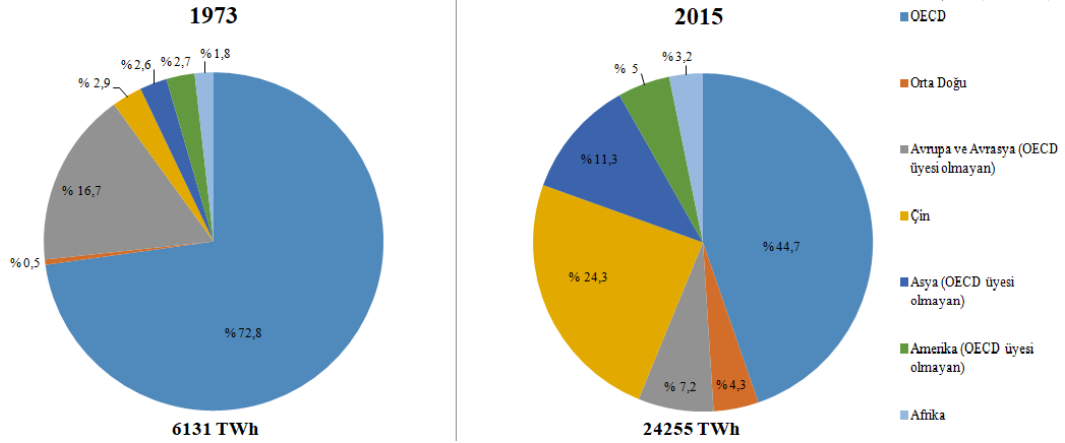
Şekil 1.3 : Bölgesel enerji tüketim değişimi.

Tarihsel süreçte, elektrik enerjisi dönüşüm sektörünün küresel enerji tüketiminden aldığı pay kararlı ve kuvvetli bir artış eğilimi göstermiştir. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) tahminlerine göre şebekeye bağlı elektrik enerjisi kullanmayan 1,2 milyardan fazla insan vardır. Bu da yaklaşık 2014 yılı sonu itibariyle dünya nüfusunun % 15' ini oluşturmaktadır [8]. Bu insanların büyük bir bölümü gelişmekte olan ülkelerde yaşamaktadır. 1950'li yıllardan itibaren dünyada hızla yayılan merkezi elektrik şebekeleri ile elektrik enerjisi talebinde güçlü, devamlı ve kararlı bir talep artışı görülmektedir. Şebekeye bağlı olmadan elektrik tüketen insanların da şebeke üzerinden elektrik tüketmeleri ile elektrik tüketiminde olan artışın uzun yıllar devam etmesi beklenmektedir. Şekil 1.4'de 1973-2015 yılları arasında bölgesel olarak elektrik enerjisi üretim değişimi gösterilmektedir.

1973 ile 2015 arasında olan dönemde, bölgesel bazda elektrik enerjisi üretim miktarlarında önemli değişimler olmuş ve farklı üretim artış hızları ortaya çıkmıştır. OECD üyesi ülkelerinin elektrik enerjisi üretiminde olan payı, 1973'de % 72,8 iken, 2015'de % 44,7'e gerilemiştir.

1973 yılında dünya elektrik enerjisi üretimi 6131 TWh olarak gerçekleşmiştir. Günümüze kadar geçen süreçte ise elektrik enerjisi üretimi, güçlü, devamlı ve kararlı artış eğilimi göstererek 2015 yılı itibariyle 3,95 kat artarak 24255 TWh düzeyine

ulaşmıştır. Elektrik üretimi ile tüketiminin birbirlerine çok yakın olduğu dikkate alındığında Çin ve Orta Doğu'nun dünya elektrik tüketiminden aldıkları pay sekiz katından fazla artarken, OECD üyesi ülkelerin elektrik tüketiminden aldıkları pay önemli ölçüde azalmıştır. Ülkelerin nüfus yapıları, kentleşme ve gelişme hızları, iklim yapıları gibi faktörlerden dolayı elektrik enerjisi tüketimindeki artış ülkeler ve bölgeler bazında farklı oranlarda gerçekleşmiştir.

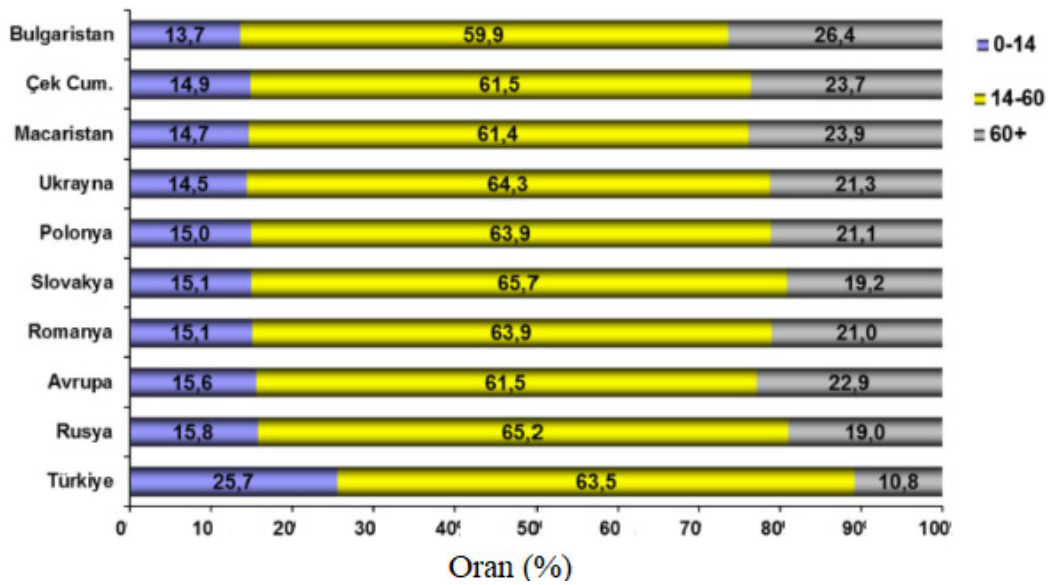


Şekil 1.4 : Dünya elektrik üretiminin değişimi.

Şekil 1.5’de, seçilmiş bazı ülkelerin demografik yapıları gösterilmiştir [3]. Genç nüfusun fazla olduğu ülkelerde enerji talebinin daha hızlı artması beklenmektedir. 2015 yılında üretilen 24255 TWh’lik elektrik enerjisinin % 68,6’lık kısmı, yani toplam elektrik üretimin üçte ikisi dünyadaki 10 ülke tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu ülkeler; Almanya (% 2,6), Amerika (% 17,7), Brezilya (% 2,4), Çin (% 24,1), Fransa (% 2,3), Hindistan (% 5,7), Japonya (% 4,3), Kanada (% 2,8), Kore (% 2,3) ve Rusya (% 4,4)’dır. Elektrik enerjisinde olan talep artışında küreselleşme olgusunun da etkisi vardır. Bu bağlamda, elektrik enerjisi talep artışında ülkeler ayrımında farklı büyüme hızları oluşmuştur.

Gelişmekte olan ülkeler dünya nüfusunun yaklaşık % 70’ini oluşturmalarına karşın elektrik tüketimleri dünya elektrik talebinin % 40’ı seviyesindedir. Artan nüfusa ve hızlı şekilde büyüyen ekonomiye sahip olan ve tarım sektöründen sanayi sektörüne doğru dönüşüm ile gelişim geçiren özellikle Güney Asya’da bulunan ülkelerin elektrik talebi hızlı bir şekilde artmaktadır. Buna karşın, enerji tüketimi bakımından belirli bir olgunluk ve doygunluk seviyesine erişmiş ve nüfus artış hızları çok düşük olan gelişmiş ülkelerin elektrik talebinde olan artışın çok düşük seviyelerde olacağı tahmin edilmektedir. Gelişmiş ülkelerde, düşük nüfus artış hızına uygun, kişi başı

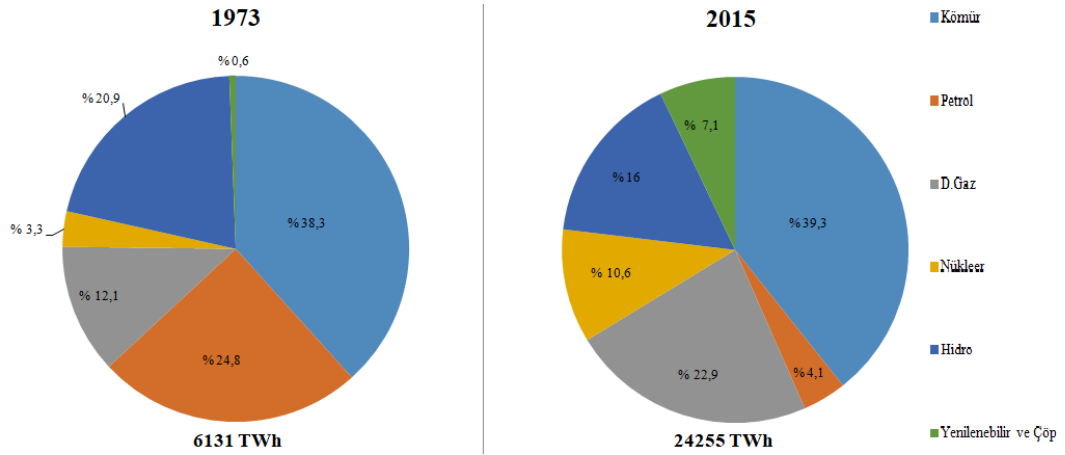
belli elektrik enerjisi tüketim düzeyine, olgunluğuna ve doygunluğa ulaşmış enerji talep yapısı olduğu görülmektedir. Buna karşın, yüksek bir nüfus artış hızı olan, hızlıca kentleşen ve sanayileşme geçiren gelişmekte olan ülkelerdeki mevcut yönelimler ve tahminler ise tam tersi yöndedir. Gelişmiş ülkelerde elektrik talep artışını sınırlayan çeşitli faktörler vardır. Bu faktörler, enerjinin etkin ve verimli kullanılması için yapılan enerji verimliliği çalışmaları, enerji tüketiminin ve enerji yoğunluğunun yüksek olduğu çeşitli üretim faaliyetlerinin bırakılıp gelişmekte olan ülkelere kaydırılması ya da azaltılması, düşük enerji tüketimi ve yüksek getirisi olan teknoloji ağırlıklı üretim alanlarına yönelme ve hizmet sektörünün büyümesidir.



Şekil 1.5 : Seçilmiş ülkelerin demografik yapıları.

Elektrik enerjisinin sürekli, yeterli, kaliteli, ekonomik şekilde erişiminin sağlanabilmesinin doğrudan ekonomik etkileri vardır ve bu da sosyal refah düzeyi üzerinde etkilidir. Elektrik enerjisi, sanayinin ve modern hayatın temel girdisi olması nedeni ile her alanda önemlidir. Elektrik enerjisi, depolama maliyetinin yüksek olması ve büyük ölçekte elektrik enerjisi depolama teknolojilerinin yeterince gelişmemiş olması nedeniyle genel enerji zinciri içindeki diğer enerji çeşitlerinden farklıdır. Elektrik enerjisi üretiminde kullanılan kaynakların seçimini etkileyen faktörler şu şekilde sıralanabilir; ülkelerin nüfus piramidi, büyüme-gelişme hızları, enerji kaynaklarının günümüz fiyatı ve gelecekte olabilecek fiyat dalgalanma riski, enerji kaynağının elde edilme kolaylığı ve sürekliliği, kaynak için başka ülkelere olan bağımlılık, ülkelerinin coğrafi konumlarının sağlamış olduğu fırsatlar veya coğrafi konumlarının oluşturduğu sorunlar, ulusal ve/veya uluslararası güvenlik-

tehdit algılamaları ile çevre ve sağlık etkileridir. Dünyada elektrik enerjisi üretiminde kullanılan kaynakların bu süreçte değişimi aşağıdaki Şekil 1.6’da sunulmuştur [7].



Şekil 1.6 : Elektrik üretiminde kullanılan kaynakları değişimi.

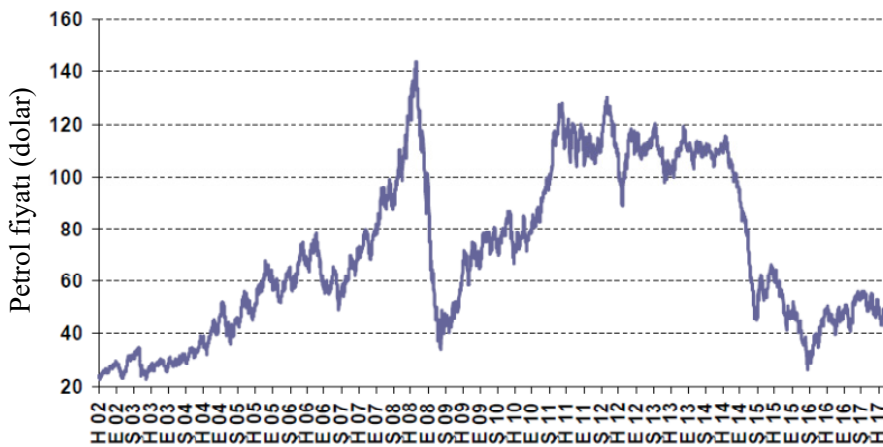
1973 yılında dünya elektrik üretiminin % 38,3 ‘ü kömür kaynaklı iken, bu oran 2015 yılında hafif bir artışla % 39,3’e yükselmiştir. Nükleer enerjinin payı % 3,3 seviyesinden Japonya’da yaşanan nükleer kaza nedeni ile son dönemde azalmasına rağmen % 10,6 seviyesine erişmiştir. Petrolün elektrik üretiminde kullanılması ise yaşanan petrol krizleri ve kaynak fiyatında olan istikrarsızlığın da etkisiyle ciddi oranda gerilemiştir.

Elektrik üretiminde 2015 yılında kömürden en çok faydalanan ülkeler; Almanya (284 TWh, % 2,98), Amerika (1472 TWh, % 15,42), Çin (4109 TWh , % 43,08), Güney Afrika (229 TWh, % 2,40), Hindistan (1042 TWh, % 10,92) ve Japonya (343 TWh, % 3,6)’dır. Kömürün dünyanın birçok bölgesinde rezervi olan bir enerji kaynağı olması, fiyatının diğer enerji kaynaklarına göre daha kararlı olmasının da etkisiyle, kömürün elektrik enerjisi sektöründe kullanılan enerji kaynakları içindeki payı, geçtiğimiz kırk yıllık dönem zarfında küçük değişimler göstermiş olup, günümüzde yaklaşık % 40 seviyesindedir. Bu oran kömürün dünya coğrafyasındaki dağılımının da etkisiyle bölgeler ve ülkeler bazında ciddi oranda değişmemektedir. Buna karşın teknik, ekonomik, arz güvenliği gibi çeşitli kavramlardan dolayı elektrik üretiminde kömürün payı bazı ülkelerde azalırken, bazılarında ise çok ciddi artış eğilimleri ortaya çıkmıştır.

Doğalgaz kaynaklı elektrik enerjisi üretiminin ayrıntıları incelendiğinde, 5543 TWh’lik toplam üretimin % 62’si on ülkeye aittir. Amerika (1373 TWh, % 24,77), Rusya (530 TWh, % 9,56), Japonya (410 TWh, % 7,40), İran (222 TWh, % 4,01),

Suudi Arabistan (189 TWh, % 3,41) ve Meksika (186 TWh, % 3,36) en büyük paya sahiptir. Bu ülkeleri sırasıyla Çin, Mısır, Tayland ve Birleşik Arap Emirlikleri takip etmektedir [7].

Petrol kaynaklı elektrik enerjisi üretimi incelendiği zaman, en çok üretim yapan ilk on ülkenin 990 TWh'lik toplam üretimden 565 TWh ile % 57 paya sahip oldukları görülmektedir. İlk üç ülke sırasıyla Suudi Arabistan (150 TWh, % 15,15), Japonya (103 TWh, % 10,40) ve Irak (50 TWh, % 5,10)'dır. Bu ülkeleri, Kuveyt, Pakistan, İran, Amerika, Mısır, Meksika ve Brezilya takip etmektedir. Petrolün elektrik üretiminde kullanım oranı 1970'lerde % 25 seviyesinde iken, günümüzde % 4'e kadar inmiştir. Şekil 1.7'de Haziran 2002 ile Haziran 2017 arasında petrol fiyatlarını değişimi gösterilmiştir [3]. Şekilden de görülebileceği gibi petrol fiyatları kısa dönemde çok hızlı değişebilmektedir. Şekil 1.7'den de görülebileceği gibi bazı dönemler petrol fiyatlarından ciddi dalgalanmalar oluşmaktadır. Örneğin, petrol fiyatları dönemsel pik olduğu 2008 yılından çok kısa bir süre sonra yaklaşık % 80'lere varan düşüşle 30 dolar seviyesine inmiştir. Günümüz için değerlendirme yapılırsa en dip noktaların biri olan (27 dolar) Şubat 2016 fiyatları, Şubat 2017 ile karşılaştırıldığı zaman yaklaşık % 120 artış olduğu görülmektedir. Dönemsel olarak dünya piyasalarında oluşan yüksek petrol fiyatları, OPEC ülkelerinde olan çeşitli konulardaki istikrarsızlıklar, çevresel nedenlerden dolayı elektrik sektöründe petrol kullanımı yerini doğalgaz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına bırakmıştır. Bununla birlikte petrol halen birçok ülkenin elektrik üretiminin önemli bir bölümünü karşılayan enerji kaynağıdır.



Şekil 1.7 : Haziran 2002-2017 arası dörder aylık petrol fiyatı değişimi.

1973 yılında başlayan petrol krizinin ardından, petrol ithal eden ülkeler enerji kaynakları bakımından dışa bağımlılıklarının getirebileceği olası etkilerin bir kısmını

tecrübe etmiştir. Enerji konusunda dışa olan bağımlılığı en aza indirmek için alternatif enerji kaynakları konusunda çalışmalar hızlanmış ve enerji verimliliği ile tasarrufu konuları önem kazanmıştır. Enerji üretiminde kaynak seçimini etkileyen temel faktörler maliyet ve enerji güvenliğidir.

Elektrik enerjisi sektöründe Şili'de başlayan ve 1990'lı yıllarda dünyada uygulaması hızlanan serbestleşme faaliyetlerinin de etkisiyle, elektrik ticaretinin diğer bir ifade ile elektrik ithalat ve ihracatının yenilenebilir enerji kaynaklarının da etkisi ile önümüzdeki yıllarda daha da artacağı tahmin edilmektedir. Elektrik üretiminde kullanılan enerji kaynaklarının elektrik üretimi içinde yüklendikleri işlevlerde, petrol krizlerinden sonra ülkeler ve bölgeler bazında dikkate değer değişimler görülmüştür.

Hızla artan enerji talebinin karşılanabilmesi, ekosistemle uyumlu enerji tüketimi ve enerji güvenliği için yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru bir yönelme gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının dünya elektrik üretimindeki payı hızlı bir şekilde artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının ekonomiye kazandırılması ile kaynak çeşitliliği artacak, sera gazı salınımlarının azalmasında bu kaynaklar etkili olacak ve ekosistem korunacaktır.

Elektrik enerjisi çevrim sektöründe kullanılan enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi, sınırlı enerji kaynağına sahip olan diğer bir ifade ile enerji kaynakları öz yeterliği düşük olan ülkeler bakımından önemlidir. Elektrik enerjisi çevrim sektörüne yapılan yatırımlar ciddi finansman gereksinimine ihtiyaç duyarlar. Elektrik enerjisi santrallerinin üretime geçme sürelerinin kısa olmaması nedeniyle, elektrik üretiminde kullanılacak enerji kaynağı seçiminde yerli enerji kaynaklarından mümkün olduğunca fazla yararlanmak ve kaynak çeşitliliğinin oluşturulması, enerji arz güvenliği bakımından da önemlidir. Elektrik enerjisi üretiminde kullanılacak kaynaklarının belirlenmesi, teknik, ekonomik, ve çevresel değişkenler ile bu kaynakları kullanmanın dışsal etkileri de dikkate alınarak çözülmesi gereken bir optimizasyon problemidir. Elektrik enerjisi üretiminde kullanılacak kaynak seçimi elektrik şebekesinin planlanmasını, elektrik enerjisi fiyatını ve ürün ile hizmet fiyatlarının oluşmasını etkilemektedir. Ayrıca şebeke ilk yatırım maliyetleri üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Kaynak seçimi; geleceğe yönelik kısa, orta ve uzun dönemdeki olası fiyat değişimleri, arz güvenliği ve enerji kalitesi sorunları dikkate alınarak yapılmalıdır. Enerji çevrim sektöründe kullanılan fosil enerji kaynaklarından

oluşan sera gazı salınımlarının azaltılması önemli hale gelmiştir. Diğer taraftan bu kaynakların kullanımına bağlı olarak fosil enerji kaynaklarının rezervlerinin azalması ve kömür hariç bu kaynakların dünyanın belirli bölgelerine yoğun olarak dağılması, enerji güvenliği için ülkeleri yerli ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanmaya zorlamaktadır.

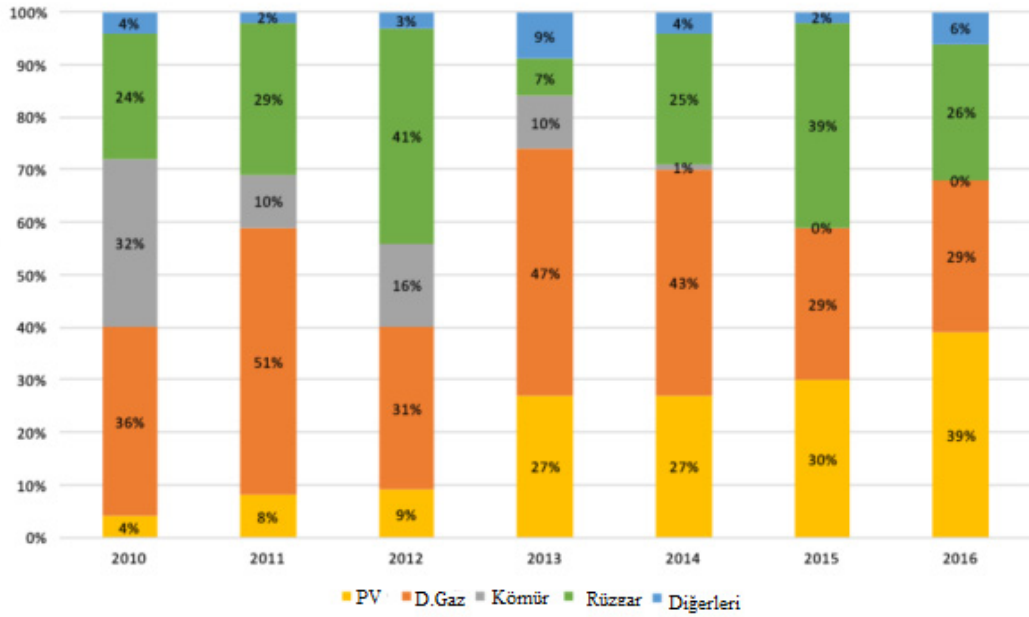
Yenilenebilir enerji kaynakları, belirli bir ömrü olmayan ve insan ömrü süresince kendini yenileyebilen, tükenmeyen enerji kaynakları olarak kabul edilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının büyük bir bölümü güneş enerjisinin form değiştirmesiyle veya yer kabuğunun derinliklerinden yayılan ısıнын etkisiyle meydana gelmişlerdir. Bu kaynakların önemi, enerji güvenliği sağlayarak fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltması, fosil yakıt fiyatlarının kararsızlığına karşı üreticiye güven vermesi, sera gazları emisyonlarını azaltmasına bağlı olarak ekosistemin korunmasına katkı sağlaması ve yeni iş imkânları sağlaması nedeniyle giderek artmaktadır.

Hidrolik enerji kaynaklarının elektrik üretiminden aldıkları pay yaklaşık % 16 seviyesindedir. OECD üyesi ülkelerde bu pay % 37 seviyesindedir. ABD, Japonya, Fransa, Norveç, İsveç gibi gelişmiş ülkeler hidroelektrik potansiyelinin büyük bir kısmını kullandığı için bu ülkelerin hidroelektrik kapasitenin yüksek miktarda artması beklenmemektedir [9]. Buna karşılık gelişmekte olan ülkelerin ise değerlendirilmemiş yüksek miktarda hidroelektrik potansiyeli mevcuttur. Bunun nedeni ise gelişmiş ülkelerin ekonomik hidroelektrik potansiyelinin büyük bir kısmını kullanmış olmasındandır. Fakat gelişmekte olan Asya, Orta ve Güney Amerika ülkelerinde yararlanılmamış hidrolik kaynakların kullanılmasına yönelik çalışmalar bulunmaktadır.

Dünyada kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarının (hidroelektrik hariç) dünya elektrik üretiminde olan payı 1973 yılında % 0,6 seviyesinde iken 2015 yılında % 7,1 seviyesine ulaşmıştır. 2016 yılı sonu itibarıyla kurulu PV gücü 303 GW seviyesine ulaşmış, 375 TWh'lik üretim gerçekleşmiş ve dünya elektrik talebinin % 1,8'i PV'den karşılanmıştır [10]. Bununla birlikte Honduras'ın elektrik enerji tüketiminin % 12,5'i, Yunanistan'ın % 7,4'ü, İtalya'nın % 7,3'ü, Almanya'nın % 7'si PV'den karşılanmıştır [10]. PV modül fiyatları 1956 yılında 300 dolar/Watt seviyesindeyken 1970'lerde 50 dolar/Watt seviyesine ve 1990'larda 10 dolar/Watt seviyesinden, günümüzde 0,4 dolar/Watt seviyesine inmiştir. Buna bağlı olarak dünyanın birçok

bölgesinde PV sistemlerle elektrik üretme maliyeti konvansiyonel sistemlerle elektrik üretim maliyeti ile yarışır duruma gelmiştir. Bu da PV kurulu gücünün hızla artmasına neden olmuştur.

Amerika’da 2010-2016 döneminde kurulan elektrik santrallerinin kaynaklara göre değişimi Şekil 1.8’de sunulmuştur. Daha önce de ifade edildiği gibi elektrik enerjisi optimum üretim kaynağı seçimi birçok değişken dikkate alınarak çözülmesi gereken bir optimizasyon problemidir.



Şekil 1.8 : ABD eklenen kurulu gücün kaynaklara göre oranı.

Amerika’da güneş ve rüzgar enerjisi santrallerinin 2016 yılında eklenen kapasite içerisindeki oranı % 39’dur. Ayrıca Amerika’da son 10 yıllık dönemde ortalama PV kurulu güç artışı % 68’dir. AB ülkelerinin yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak ürettikleri enerji (1000 TEP) aşağıdaki Çizelge 1.1’de gösterilmektedir [11]. Çizelge 1.1’den de görülebileceği gibi AB 28 ülkelerinin enerji tüketiminde yenilenebilir enerji kullanımı 2004-2014 arası dönemde % 72,5 artmıştır. Aynı dönemde Almanya’da ise yenilenebilir enerji kullanımı ton eş değer petrol (TEP) olarak yaklaşık % 250 artmıştır. Yenilenebilir enerji kullanımında hızlı artışın temel nedenleri arasında fosil enerji fiyatlarında meydana gelen ani değişimler, yenilenebilir enerji dönüşüm sistemlerinde meydana gelen verim artışı yenilenebilir enerji dönüşüm sistemlerinin ilk kurulum maliyetlerinde meydana gelen azalmalar enerji arz güvenliği sorunu, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi

ve Kyoto Protokolü gibi uluslararası antlaşmalar ile Avrupa Birliği'nin yayınlamış olduğu direktiflerinin etkisi vardır.

Avrupa Birliği ülkelerinde 2004-2014 yılları arasında yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretiminde kullanılma oranları Çizelge 1.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1 : AB ülkelerinin yenilenebilir enerji kullanımı (1000 TEP).

Ülkeler	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
AB (28)	113134	119606	125934	135872	145422	152270	167890	164267	180577	192838	195814
AB (19)	80017	83042	89174	97578	104371	109360	120953	117399	129022	140240	142329
Belçika	760	875	932	1267	1637	1867	2238	2695	2824	2914	2857
Bulgaristan	1009	1124	1173	995	1091	1153	1504	1438	1638	1826	1842
Çek.	1875	1970	2158	2366	2416	2593	2900	3032	3247	3641	3656
Danimarka	2447	2514	2540	2833	2811	2794	3113	3064	2974	3085	3144
Almanya	14568	16851	20040	23328	23087	24280	27712	29456	32086	33680	36018
Estonya	681	692	645	745	755	865	988	977	1056	1122	1186
İrlanda	282	366	422	466	545	632	620	721	727	755	854
Yunanistan	1571	1643	1778	1679	1654	1809	1974	1992	2266	2487	2329
İspanya	8816	8398	9164	10003	10316	12383	14635	13955	14645	17562	18003
Fransa	15769	15728	15279	16247	18385	18610	20647	17530	20326	22628	21002
Hırvatistan	1847	1855	1778	1581	1708	1912	2167	1886	1944	2313	2292
İtalya	12193	13329	14201	15953	18787	19295	19395	18224	21093	23500	23644
G.Kıbrıs	48	48	50	67	75	77	82	96	107	109	111
Letonya	1837	1854	1840	1794	1782	2089	1964	2071	2331	2137	2371
Litvanya	849	900	956	964	1054	1170	1185	1162	1198	1288	1358
Lüksemburg	51	72	77	85	89	83	88	81	91	101	120
Macaristan	950	1189	1242	1337	1610	1851	1922	1857	1963	2049	2051
Malta	0	1	1	1	1	1	5	7	9	9	13
Hollanda	1881	1970	2158	2267	2556	2896	3064	3208	3916	4373	4555
Avusturya	6618	7043	7010	7765	8230	8333	8784	8274	9353	9425	9370
Polonya	4321	4549	4766	4850	5402	6023	6846	7439	8466	8512	8054
Portekiz	3800	3475	4222	4506	4341	4786	5642	5381	4563	5629	5848
Romanya	4594	4984	4831	4718	5336	5275	5708	5028	5242	5561	6090
Slovenya	822	774	768	726	835	980	1098	1002	1027	1124	1180
Slovakya	745	861	864	962	1033	1223	1404	1387	1434	1467	1441
Finlandiya	8728	8164	8768	8755	9212	7982	9433	9183	9973	9930	10068
İsveç	13147	14826	14388	15294	15620	15819	16997	16546	18524	16770	16660
İngiltere	2929	3553	3885	4321	5058	5490	5780	6577	7556	8843	9696
İzlanda	2333	2384	3105	3850	4506	4731	4791	5199	5071	5272	5223
Norveç	10542	12956	11526	12742	13254	12049	11520	11914	13742	12498	12965
Arnavutluk	704	694	699	461	548	664	862	575	625	812	621
Sırbistan	1859	1937	1846	1767	1635	1958	2064	1811	1861	2005	2068
Moldova	112	103	111	102	111	112	206	245	254	295	303

AB ülkelerinde yenilenebilir enerjisi kaynaklarının elektrik üretiminde kullanılma oranı ortalama % 27,5'dir. Ülkeler bazından incelendiğinde bu oran % 3,3 ile % 109,6 arasında değişmektedir. Dünyada en fazla enerji tüketilen ülkelerden biri olan Almanya'da % 9,4 olan oran üç kat artarak 2014 yılında % 28,2'ye çıkmıştır. Avrupa Birliği ülkelerinde yenilenebilir enerji kaynakları kullanımında olan bu artışın temel sebebi iklim değişikliği ve sera gazları salınımları ile ilgili dünyada yapılan anlaşmalar, yürütülen sosyal projeler, yenilenebilir enerji kaynakları teknolojilerinde meydana gelen gelişmelere bağlı olarak verim artışı ile ilk yatırım maliyeti buna bağlı olarak enerji üretim maliyetinin düşmesi ve enerji güvenliği problemidir. Ayrıca, özellikle rüzgar ve güneş enerjisi sistemlerinde verimin artması, kurulum

maliyetlerinin ile fiyatlarının düşmesi ve uygulanan destek politikaları kurulu gücün artması sağlanmıştır.

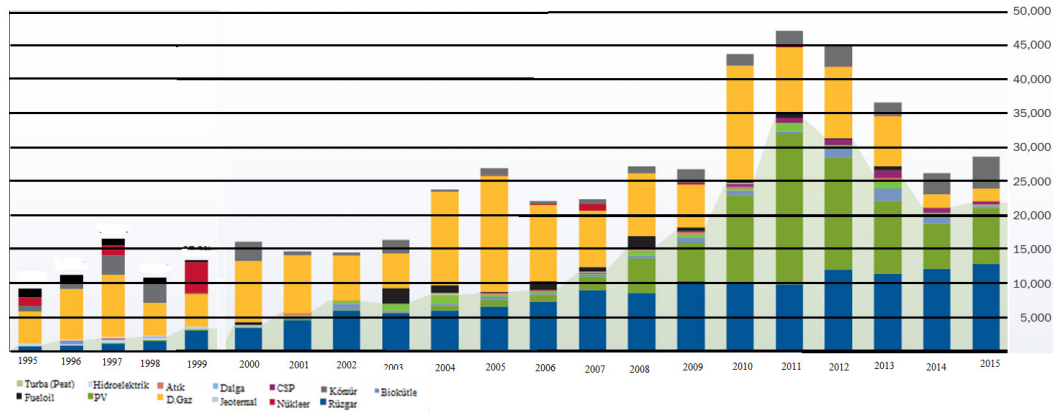
Çizelge 1.2 : AB ülkelerinin yenilenebilir enerji kullanım oranları (%).

Ülkeler	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
AB-28	14,4	14,9	15,4	16,1	17,0	19,0	19,7	21,7	23,5	25,4	27,5
Almanya	9,4	10,5	11,8	13,6	15,1	17,4	18,1	20,9	23,6	25,3	28,2
Avusturya	61,8	62,4	62,4	64,6	65,2	67,8	65,7	66,0	66,5	68,0	70,0
Belçika	1,7	2,4	3,1	3,6	4,6	6,2	7,1	9,1	11,3	12,4	13,4
Bulgaristan	9,1	9,3	9,3	9,4	10,0	11,3	12,7	12,9	16,1	18,9	18,9
Çek Cum.	3,6	3,7	4,0	4,6	5,2	6,4	7,5	10,6	11,6	12,8	13,9
Danimarka	23,8	24,6	24,0	25,0	25,9	28,3	32,7	35,9	38,7	43,1	48,5
Estonya	0,6	1,1	1,5	1,5	2,1	6,1	10,4	12,3	15,8	13,0	14,6
Finlanda	26,7	26,9	26,4	25,5	27,3	27,3	27,7	29,4	29,5	30,9	31,4
Fransa	13,8	13,7	14,1	14,3	14,4	15,1	14,8	16,3	16,4	16,8	18,3
Hırvatistan	35,5	35,8	35,2	34,0	33,8	35,9	37,6	37,6	38,8	42,2	45,3
Hollanda	4,4	6,3	6,5	6,0	7,5	9,1	9,6	9,8	10,4	10,0	10,0
İzlanda	93,1	94,9	93,5	113,7	90,8	92,9	92,4	93,9	95,4	96,7	97,1
İngiltere	3,5	4,1	4,5	4,8	5,5	6,7	7,4	8,8	10,7	13,8	17,8
İrlanda	6,0	7,2	8,7	10,4	11,2	13,4	14,5	17,2	19,5	20,8	22,7
İspanya	19,0	19,1	20,0	21,7	23,7	27,8	29,8	31,6	33,5	36,7	37,8
İsveç	51,2	50,9	51,8	53,2	53,6	58,3	56,0	59,9	60,0	61,8	63,3
İtalya	16,1	16,3	15,9	16,0	16,6	18,8	20,1	23,5	27,4	31,3	33,4
Kıbrıs	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,6	1,4	3,4	4,9	6,6	7,4
Letonya	46,0	43,0	40,4	38,6	38,7	41,9	42,1	44,7	44,9	48,8	51,1
Litvanya	3,6	3,8	4,0	4,7	4,9	5,9	7,4	9,0	10,9	13,1	13,7
Lüksemburg	2,8	3,2	3,2	3,3	3,6	4,1	3,8	4,1	4,6	5,3	5,9
Macaristan	2,2	4,4	3,5	4,2	5,3	7,0	7,1	6,4	6,1	6,6	7,3
Malta	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	1,1	1,6	3,3
Norveç	97,3	96,8	100,2	98,5	99,6	104,7	97,9	105,5	104,4	106,9	109,6
Polonya	2,1	2,7	3,0	3,5	4,4	5,8	6,6	8,2	10,7	10,7	12,4
Portekiz	27,5	27,7	29,3	32,3	34,1	37,6	40,7	45,9	47,6	49,1	52,1
Romanya	28,4	28,8	28,1	28,1	28,1	30,9	30,4	31,1	33,6	37,5	41,7
Slovakya	15,4	15,7	16,6	16,5	17,0	17,8	17,8	19,3	20,1	20,8	23,0
Slovenya	29,3	28,7	28,2	27,7	30,0	33,8	32,2	31,0	31,6	33,1	33,9
Yunanistan	7,8	8,2	8,9	9,3	9,6	11,0	12,3	13,8	16,4	21,2	21,9

Şekil 1.9 AB ülkelerinde yıllık kapasite artışının kaynak türüne göre değişimini göstermektedir [12].

AB ülkelerinde 2009-2015 yılları arasında 81860 MW PV net kapasite artışını, 75045.9 MW net kapasite artışı ile rüzgar enerjisi takip etmektedir. Dünyada yaşanan ve AB ülkelerini de etkileyen ekonomik kriz sonucu yenilenebilir enerji kaynakları için devletlerin vermiş olduğu teşvikler yavaşlamıştır. Bu nedenle PV güç artışında

bir yavaşlama görülmüştür. AB'nin birçok ülkesinde güneş enerjisi potansiyeli iyi değildir, fakat araştırma ve geliştirme çalışmalarının geliştirilmesi için verilen destekler AB ülkelerinde güneş enerjisi kurulu gücünün artmasını sağlamıştır. Dünya toplam rüzgar enerjisi kurulu gücünün büyük bir kısmı uzun yıllar AB ülkelerinde olmuştur. Son yıllarda ise ABD, Çin, Hindistan'ın rüzgar enerjisi kurulu gücü hızlı bir şekilde artmıştır.



Şekil 1.9 : AB ülkelerinde eklenen kapasitenin kaynaklara göre değişimi.

Aşağıda verilen Çizelge 1.3'de AB ülkelerinde 2009-2015 yılları arasında kurulu güç değişimi (MW) kaynaklara göre gösterilmektedir.

Çizelge 1.3 : AB ülkeleri kurulu güç değişimi.

	2009		2010		2011		2012		2013		2014		2015		Toplam
Kaynak	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	Net
Rüzgar	10163	115	9295	107	9616	216	11895	207	11159	324	11791.4	423.5	12800	281	75045,9
D.gaz	6630	404	28280	0	9718	934	10535	5495	7491	10146	2338.9	2962	1867	4254	42664,9
PV	4600	0	12000	0	21000	0	16750	0	11010	0	8000	0	8500	0	81860
Kömür	2406	3200	4056	1550	2147	840	3065	5441	1900	7723	3305	7256	4714	8051	-12468
FuelOil	573	472	0	245	700	1147	7	3204	220	2792	0	1122	0	3282	-10764
Biokütle	581	39	573	45	234	60	1338	43	1455	750	990	370	232	518	3578
Atık	442	24	149	0	690	0	50	0	180	80	68	0	119	0	1594
Nükleer	439	1393	145	535	331	6253	22	1205	120	0	0	100	1825	0	-6604
B. Hidro	338	166	208	26	606	22	424	158	1216	19	436	14.9	239	0	3061,1
CSP	120	0	405	0	472	0	833	0	419	0	0	0	370	0	2619
K. Hidro	54,5	0,6	25	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	87,9
Diger Gaz	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
Jeotermal	3,9	0,5	25	0	32	0	5	0	10	0	45	0	0	0	120,4

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıldığı elektrik üretim sistemlerinde ilk kurulum maliyetleri yüksektir, buna karşılık bu sistemlerin yakıt maliyetleri yoktur ve bakım maliyetleri düşüktür. Bu tesislerden bir tanesi de rüzgar enerjisi tesisleridir.

Bu nedenle rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinin optimum boyutlandırılması ve doğru konumlandırılmaları gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgar enerjinin potansiyelinin belirlenmesi ile ilgili dünyada gerek bölgesel gerekse de global olarak birçok çalışma yapılmıştır ve yapılmaktadır. Enerji kaynaklarının potansiyeli belirlenirken brüt enerji potansiyeli, teknik enerji potansiyeli, ekonomik enerji potansiyeli ve değerlendirilmiş enerji potansiyeli kavramları doğru bir şekilde belirlenmelidir. Brüt potansiyel bir bölgede olan toplam teorik rüzgar enerjisi potansiyelini ifade etmektedir. Teknik potansiyel ise mevcut teknolojik duruma göre işlenebilecek potansiyeldir. Ekonomik potansiyel ise mevcut ekonomik şartlar altında, diğer enerji üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında, kullanılması uygun olan potansiyeli ifade eder. Değerlendirilmiş potansiyel ise enerji üretiminde kullanılan rüzgar enerjisi kaynağının kullanımının bir göstergesidir.

Yeryüzüne güneş ışınları dünyanın şekli, hareketi ve yeryüzünün homojen olmayan yapısı nedeni ile farklı açılarla gelmektedir. Bunun sonucunda sıcaklık, yoğunluk ve basınç farkları oluşmaktadır. Rüzgar en basit anlamda, yüksek basınçtan alçak basınca doğru olan hava hareketidir ve oluşumunda dünyanın şekli, coğrafi yapısı, dünyanın hareketi, dünyanın dönüş hızı, sıcaklık farkları, yoğunluk farkları, kara ve denizlerin dağılımı, basınç farkları gibi çeşitli faktörler etkilidir. Atmosferik hareketler alan ve zaman yönünden dört grup altında sınıflandırılmaktadırlar. Bunlar; genel sirkülasyon, sinoptik ölçek, mezo ölçek ve mikro ölçektir. Genel sirkülasyonun zaman ölçeği bir hafta ile bir yıl arasında iken mikro ölçekte bir dakikadan daha kısa sürededir. Rüzgar küresel rüzgarlar ve yerel rüzgarlar olarak sınıflandırılmaktadır. Küresel rüzgara ticaret rüzgarları, yerel rüzgarlar ise kara ve deniz meltemleri, dağvadi meltemleri, örnek olarak verilebilir.

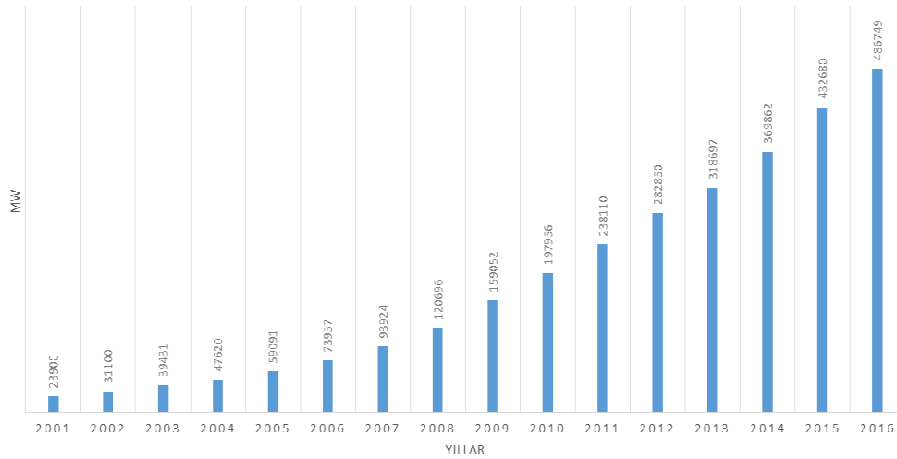
Hareket halinde olan hava bir enerji potansiyeline sahiptir. Rüzgar enerjisinin mekanik güç olarak günümüzden 7000 yıl önce Mısır'da gemileri hareket ettirmek ve daha sonra Çin, İran ve Afganistan'da tahılları öğütülmesi ile su pompalanması için kullanıldığına dair kanıtlar bulunmaktadır [13]. 12. ve 19. yüzyıllar arasında Avrupa'da rüzgar değirmeni sayısı hızla arttı, 19. yüzyılın sonlarına 25 m çapında kanat kullanan değirmenler tasarlanmıştır. Rüzgar değirmenleri sadece tahıl öğütmek için değil, aynı zamanda göller ile bataklıkları boşaltmak ve su pompalamak için de kullanılmıştır. 19. yüzyılın başında, Fransa'da yaklaşık 20000 rüzgar değirmeni bulunuyor, Hollanda'da endüstride kullanılan gücün % 90'ı rüzgar enerjisinden

sağlanıyordu. Danimarka'da mühendis Dane Poul LaCour 1891'de rüzgar enerjisinden elektrik üretimini gerçekleştirdi. 1904 yılında rüzgar enerjisi Hollanda endüstrisinin enerji tüketiminin % 11'ini sağlıyordu ve Almanya'da 18000'den fazla rüzgar değirmeni bulunuyordu. 1920-1930 yılları arasında ABD'de yaklaşık 600000 yel değirmeni inşa edildi. 1930 yılında Rusya'da 30 metre kanat çapı olan ve 75 kW gücünde üç kanatlı bir rüzgar türbinini Yalta'ya kurdu ve 1941 yılına kadar bu türbin elektrik üretmiştir. Rusya'da ardından 5 MW gücünde bir rüzgar türbini üzerinde çalışıldı. I. ve II. Dünya Savaşı sırasında ilerleyen aerodinamik bilgisinin de etkisi ile rüzgar enerjisi teknolojisi hızla gelişti ve bu dönemde enerji üretiminde Avrupa'da sıklıkla kullanılan enerji kaynağı haline geldi. 1941 yılında Putnam'ın 1250 kW gücünde rüzgar türbini geliştirmiş ve şebekeye bağlı olarak elektrik üretmiştir. Danimarka'da 1957 yılı ile 1966 yılları arasında çalışan 200 kW gücünde rüzgar türbini 2,2 milyon kWh elektrik üretmiştir, yaklaşık ortalama kapasite faktörü % 12'dir. Ardından yaşanan düşük fosil yakıt fiyatları döneminde ise rüzgar enerjisi kullanımı azalmıştır. Petrol krizlerinin etkisi ile rüzgar enerjisine verilen önem tekrar arttı, gelişen aerodinamik bilgisi ve kontrol sistemleri ile büyük güçlü rüzgar türbinleri tasarlanıp üretildi. Enerji fiyatlarının tekrar düşmesi ile rüzgar enerjisi kurulu güç artışı yavaşlamıştır.

Rüzgar enerjisi potansiyelini belirlemek için gerek deniz üstü gerekse de kara alanlarını inceleyen çeşitli çalışmalar yapılmıştır [14-20]. Farklı zamanlarda çeşitli kriterler (türbin göbek yüksekliği, türbin gücü, türbin tipi, enerji santrali kurulacak alan ile ilgili sınırlamalar, karaya uzaklık, üretim maliyeti, türbinler arası uzaklık gibi...) dikkate alınarak rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesi için yapılan çalışmalar ekonomik rüzgar enerjisi potansiyelinin ilgili dönemde dünya elektrik enerjisi tüketiminin daha fazla bir ekonomik potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Büyük bir enerji potansiyeline sahip olan rüzgar enerjisinin kurulu gücü hızlı bir şekilde dünyanın birçok ülkesinde artmaktadır. Son 16 yıllık dönemde dünya rüzgar enerjisi kurulu güç gelişimi Şekil 1.10'da gösterilmektedir [21].

Dünya rüzgar enerjisi kurulu gücü 2001 yılında 23900 MW'dan 2016 yılında 486749 MW seviyesine ulaşmıştır. Bu kurulu güçte en çok paya sahip ilk on ülke sırasıyla Çin (168732 MW, % 34,7), ABD (82184, % 16,9), Almanya (51018, % 10,3), Hindistan (28700, % 5,9), İspanya (23074, % 4,7) İngiltere (14543, % 3), Fransa (12066, % 2,5), Kanada (11900, % 2,4), ve Brezilya (10740, % 2,2)'dir. Bu ilk on

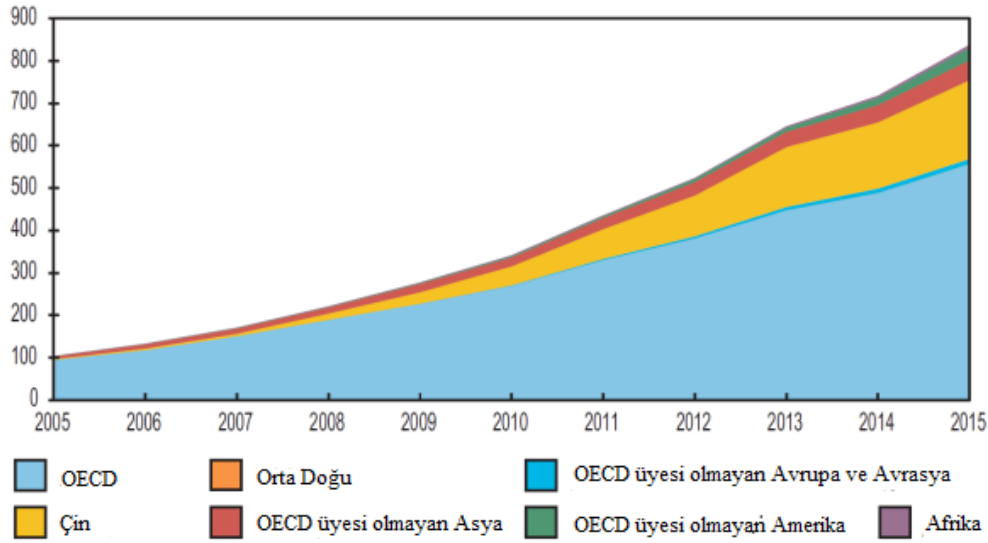
ülke kurulu gücün % 84'üne sahiptir. Bu da rüzgar enerjisi kurulu gücünün hızla artacağını bir göstergesidir. Dünya kurulu rüzgar enerji gücü 1996 yılında dünya elektrik tüketiminin % 0,09'unu karşılarken, 2005 yılında bu oran % 0,67 olmuş ve 2015 yılında ise karşılama oranı % 3,7 seviyesine ulaşmıştır. Rüzgar enerjisinin dünya elektrik üretimi içinde ki değişimi Şekil 1.11'de TWh olarak gösterilmektedir [7]. Rüzgar enerjisinin gerek dünya elektrik üretimi içinde ki payı gerekse de kurulu güç içindeki payının artması beklenmektedir ve 2020 yılında dünya rüzgar enerjisi kurulu gününü 792 GW ulaşacağı tahmin edilmektedir [22].



Şekil 1.10 : Dünya rüzgar kurulu gücü değişimi.

Danimarka'nın elektrik tüketimin 2006 yılında % 16,78 rüzgar enerjisinden karşılanmışken, 2016 yılında % 36,8'i yılında rüzgar enerjisinden sağlanmıştır. Danimarka'yı sırasıyla İrlanda (% 27), Portekiz (% 24,7), Güney Kıbrıs (% 19,7), İspanya (% 19), Almanya (% 16), ve Romanya (% 12,5) takip etmektedir. İspanya ve Danimarka'da bazı günler rüzgar enerjisi santrallerinin günlük üretimi ilgili gün elektrik tüketiminden fazla olabilmektedir. AB ülkelerinde yıllık ortalama rüzgar türbini kurulu gücü de hızla artmaktadır, 1990 yılında ilgili yıl kurulan ortalama rüzgar türbini kapasitesi 105 kW iken 1996 yılında 479 kW, 2006 yılında 1673 kW ve 2016 yılında ise AB ülkelerinde 3100 kW değerinin üzerine çıkmıştır [23]. Gerek rüzgar türbini kapasitelerinin artması gerekse azalan üretim maliyetlerinin etkisiyle rüzgar enerjisi kullanımı her geçen gün artmaktadır. Rüzgar enerjisi santralleri 2016 yılında Avrupa ülkelerinde yaklaşık 300 TWh elektrik üreterek elektrik tüketiminin % 10,4'ini karşılamışlardır. Avrupa Birliği ülkelerinde rüzgar kurulu gücü doğalgazdan sonra ikinci büyük güç durumuna gelmiştir. Birçok Avrupa ülkesinin

orta ve uzun vadeli elektrik enerji üretim tüketim planlamasında rüzgar enerjisi kaynakları önemli bir yer tutmaktadır.



Şekil 1.11 : Rüzgar enerjisi ile elektrik üretimi (TWh).

Çin ise dünyada en büyük kurulu güce sahip ülke olup, kurulu rüzgar gücü 168732 MW seviyesine ulaşmış, rüzgar enerjisi santralleri 241 TWh enerji üretmişler (ortalama kapasite faktörü yaklaşık % 17,5) ve ülke elektrik üretiminin yaklaşık % 4’ü rüzgar enerjisinden elde edilmiştir [24].

Rüzgar türbini güçleri hızla artmaktadır. 1985 yılında ticari olarak satılan en büyük rüzgar türbini gücü 50 kW iken 1989 yılında 300 kW, 1992 yılında 500 kW, 1999 yılında 1500 kW gücüne ve günümüz itibariyle ticari en büyük rüzgar türbini 9000 kW gücünde ve 140 metre göbek yüksekliğine sahip bir türbindir [25]. Prototipi bir günde 216 MWh elektrik üretmiş, diğer bir ifade ile gün boyunca % 100 kapasite faktörü ile çalışmıştır [26].

Rüzgar enerjisi kurulu gücü en yüksek olan ülkelerden olan Çin, ABD, Almanya ve İspanya’nın rüzgar enerjisi santrallerinin kapasite faktörü ve kapasite kullanım indeksi değişimi 2005 ve 2011 yılı aşağıdaki Çizelge 1.4’de gösterilmiştir [27].

Çizelge 1.4 : Seçilmiş ülkelerin kapasite faktörleri.

Ülkeler	Üretim (GWh)		Kurulu Güç (GW)		Kapasite Faktörü (%)		Nominal’den Yüksek Hız (%)		Kapasite Kullanım İndeksi (%)	
	2005	2011	2005	2011	2005	2011	2005	2011	2005	2011
Çin	2028	73200	1,3	62,4	18	13	23	22	80	62
ABD	17811	120177	8,7	46,0	23	30	30	34	78	88
Almanya	27229	46500	18,4	29,1	17	18	26	28	65	66
İspanya	21176	42374	9,9	21,7	24	22	27	25	91	89

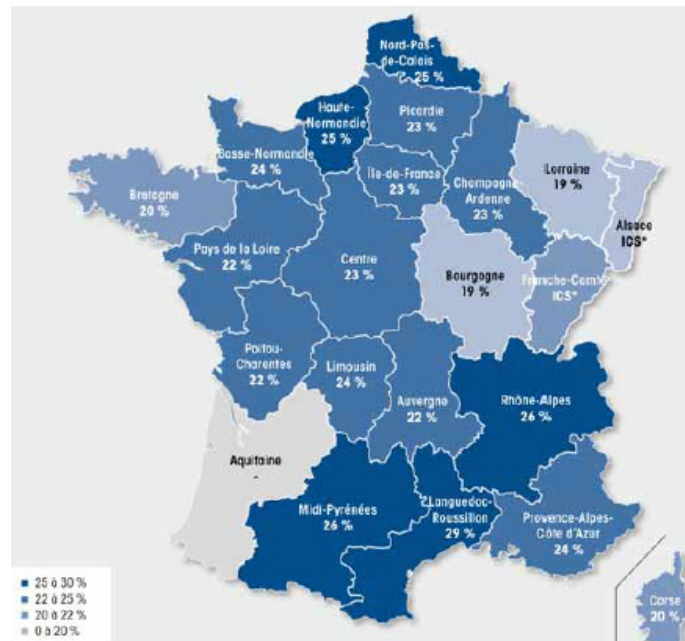
Çizelge 1.4'den de görülebileceği gibi yıllar içinde türbin verimi artmasına rağmen kapasite faktörü her ülkede artış göstermemiştir. Bunun nedeni ise ilk önce yüksek enerji potansiyelli bölgelere santral kurulması daha sonra ise daha az ekonomik olan düşük kapasite faktörlü bölgelere santral kurulmasıdır.

Boccard yapmış olduğu çalışmada seçilmiş çeşitli Avrupa ülkelerinde gerçekleşen kapasite faktörlerini ve genel kabul edilen kapasite faktörlerini incelemiştir [28]. Çalışmada 2007 yılında gerçekleşen ortalama kapasite faktörünün % 20,8 olduğu, Almanya, İspanya, Danimarka, İtalya, İngiltere, Fransa ve Portekiz'de gerçekleşen ortalama kapasite faktörü sırası ile % 18,3, % 24,8, % 22,8, % 19,1, % 26,1, % 22,3, % 22,7 ve % 21 olduğu belirlenmiştir. ABD'de çeşitli bölgelerin 5 yıllık kapasite faktörünün değişimi Çizelge 1.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.5 : Farklı bölgelerin kapasite faktörleri (%).

Bölgeler	AT	GR	IR	SE	BE	PL	FI	CA	US
Kapasite Faktörü (%)	20,1	29,3	29,3	21,7	20	25,9	21,8	22,4	25,7

Aşağıdaki Şekil 1.12'de ise 2014 yılında Fransa'da rüzgar enerjisi santrallerinin ortalama kapasite faktörünü bölgesel bazda göstermektedir [29]. Şekil 1.12'den de görülebileceği gibi en yüksek kapasite faktörü % 29 ve Fransa'da kurulu rüzgar enerjisi santrallerinin ortalama kapasite faktörü ise % 22,6 seviyesindedir.

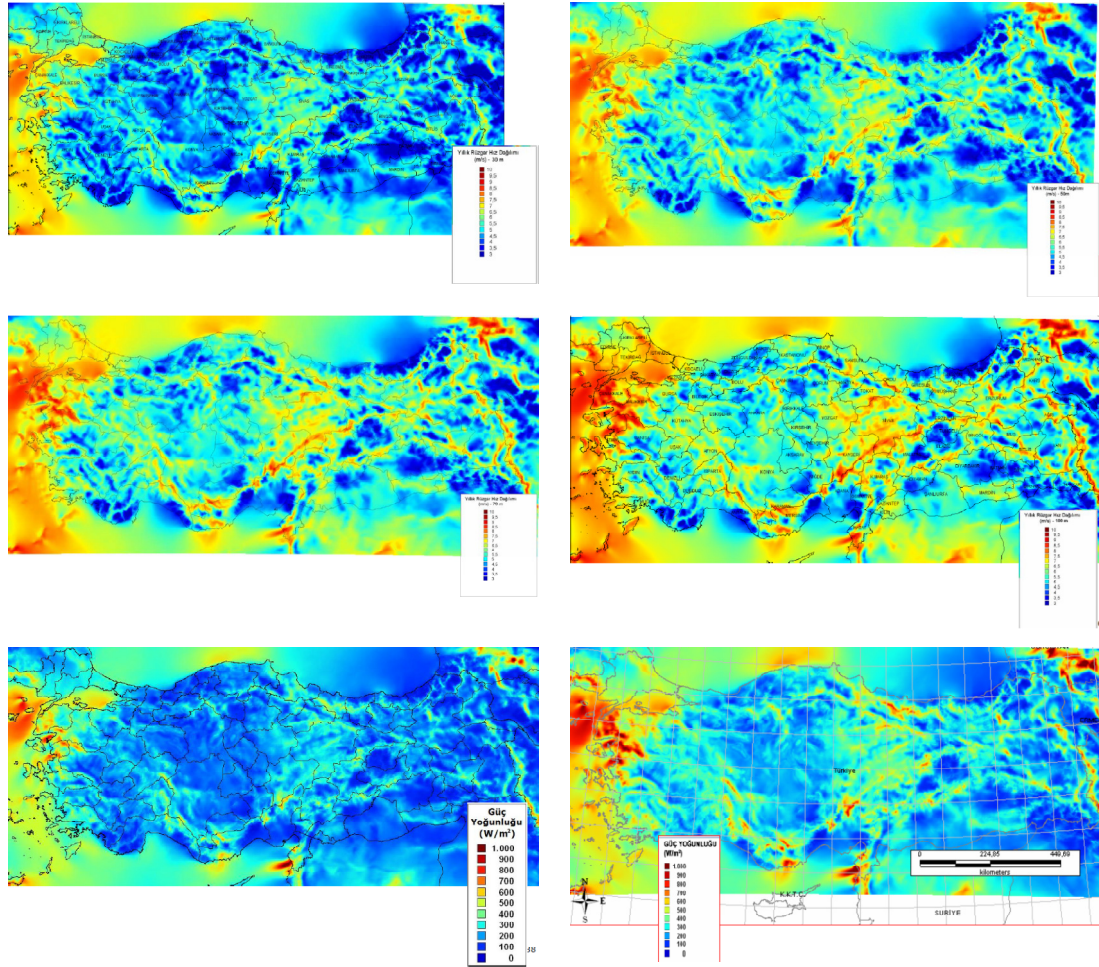


Şekil 1.12 : Fransa rüzgar enerjisi santrallerinin bölgesel kapasite faktörü.

Rüzgar enerjisi kurulu güç değişiminde etkili olan destek modellerini Akdağ ve Güler yapmış oldukları çalışmada incelenmiştir [30]. Çalışmada uygulanan destek modellerin rüzgar enerjisi kurulu gücü ve rüzgar türbini üretimi gerçekleştiren firmalara olan etkisini incelemişlerdir. Rüzgar enerjisinin elektrik enerjisi üretimi için kullanılma oranının ve kurulu gücün ülkelere göre değişiklik gösterdiğini ifade etmişlerdir. Elektrik enerjisi üretiminde ve kurulu gücünde farklılıkların nedenini rüzgar enerjisi potansiyelinin ülkeler bazında farklı olması, kurulu gücün artırılması için uygulanan destek politikalarının ülkeler arasında farklılık göstermesi gibi çeşitli faktörlerden kaynaklandığı açıklanmıştır. Sadece ekonomik rüzgar enerjisi potansiyelinin yüksek olmasının kurulu gücün yüksek olması için tek başına yeterli olmadığını ifade etmişlerdir. Avrupa’ da rüzgar enerjisi potansiyeli en yüksek ülke İngiltere olmasına rağmen, en fazla kurulu rüzgar gücü olan ülke değildir.

Türkiye’de kamu kuruluşları da dahil olmak üzere çeşitli kurumlar tarafından hazırlanmış olan rüzgar enerjisi potansiyel atlasları vardır. Bu atlasların oluşturulma tarihi 1984 yılına kadar gitmektedir. Wijk ve Coelingh tarafından yapılan çalışmada ülkemiz teknik rüzgar enerjisi potansiyelinin 83000 MW (166 TWh) ve ekonomik potansiyelinin ise 10000 MW olduğu belirtilmiştir [31]. Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) noktasal bazda ortalama hız, güç yoğunluğu ve kapasite faktörü bilgilerini içeren bir çalışmadır. REPA’da ayrıca çeşitli kriterler ve sınırlamalar dikkate alınarak ülkemiz rüzgar enerjisi ekonomik potansiyeli, güç yoğunluğu ve ortalama rüzgar şiddetleri çeşitli yükseklikler için belirlenmiştir. REPA ile 200 m x 200 m çözünürlüğünde 30, 50, 70 ve 100 metre yüksekliklerdeki yıllık, mevsimlik, aylık ve günlük ortalama rüzgar şiddeti belirlenmiştir. Ayrıca 50 ve 100 metre yüksekliklerdeki aylık, mevsimsel ve yıllık rüzgar enerjisi güç yoğunlukları ile 1 MW gücünde referans bir rüzgar türbini için 50 metre yükseklikteki yıllık enerji üretimi değerleri belirlenmiştir. REPA ile gerek denizler üzerinde gerekse de yüksek rakımlı yerlerde daha önce belirlenemeyen güç yoğunluğu ve enerji potansiyeli yüksek olan yerler ortaya çıkarılmıştır. REPA analizi sonucuna göre 50 metre yükseklikte 6,5 m/s’den yüksek hıza sahip bölgelere 1 km² alan için 5 MW türbin kurulabileceği gibi çeşitli kriterler dikkate alınarak hesaplanan kurulu güçler aşağıdaki Çizelge 1.6’da gösterilmektedir. Şekil 1.13’de REPA güç yoğunluğu ve ortalama şiddeti haritaları gösterilmektedir [32]. Bu çalışmada kara

bölgelerinde 50 metre yükseklikte 300 W/m^2 ’ den büyük 131756 MW’lık rüzgar enerjisi potansiyeli olduğu hesaplanmıştır.



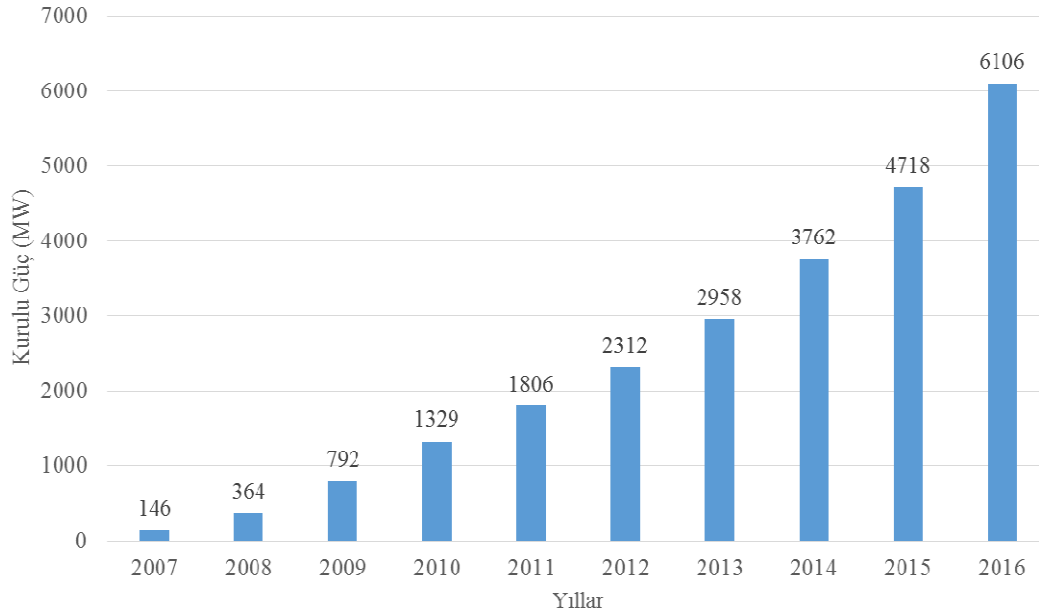
Şekil 1.13 : Farklı yükseklikler için REPA haritaları.

Bu haritalara ve çeşitli kısıtlara göre hesaplanan ekonomik rüzgar enerjisi potansiyeli 2017 yılı ülkemiz kurulu elektrik gücünün 1,5 katı civarındadır. Bu haritalarda uydu verileri de dahil veriler kullanılmaktadır. Rüzgar şiddeti ölçüm sonuçları olmadan sadece haritalarla fizibilite analizleri yanlış sonuçlara neden olabilecektir.

Çizelge 1.6 : REPA rüzgar enerjisi ekonomik potansiyeli.

Rüzgar Şiddeti (m/s)	Güç Yoğunluğu (W/m^2)	Kurulabilecek Rüzgar Enerjisi Santrali Gücü (MW)
6,5-7,0	300-400	83906,96
7,0-7,5	400-500	29259,36
7,5-8,0	500-600	12994,32
8,0-9	600-800	5399,92
>9	>800	195,84
TOPLAM		131756,4

Türkiye' de rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretmek için kurulan ilk büyük güçlü rüzgar enerjisi santrali 1986 yılında 55 kW gücünde ve bir otelin elektrik ihtiyacının karşılanması için İzmir' de kurulmuştur [33]. Türkiye' de kurulu rüzgar gücünün son 10 yıla göre değişimi aşağıdaki Şekil 1.14' de gösterilmektedir.

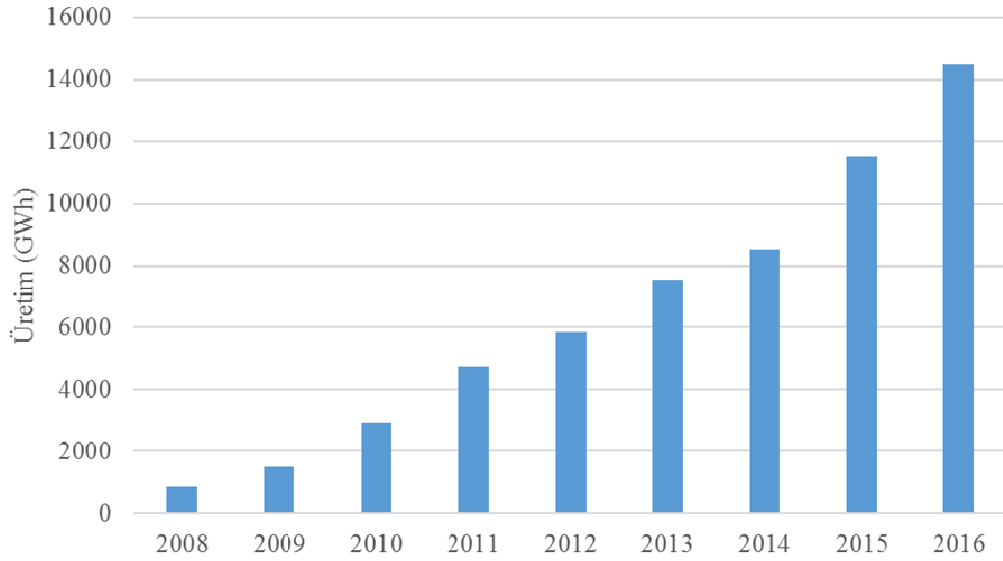


Şekil 1.14 : Türkiye kurulu rüzgar gücü değişimi.

Ülkemiz kurulu rüzgar enerjisi gücünün elektrik üretimi ise Şekil 1.15' de gösterilmektedir. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu tarafından verilen rüzgar enerjisi lisansları ve ülkemiz elektrik üretimi ile tüketimi için yapılan projeksiyonlarla birlikte değerlendirildiğinde kısa vadede bu oranın artması beklenmektedir. Elektrik enerjisi kurulu gücünün 2020 yılına kadar değişimi ile ilgili çeşitli senaryolar yapılmıştır, bu senaryolardan birinde Türkiye' de 2020 yılında rüzgar enerjisi kurulu gücün 9100 MW üzerine çıkması ve bu kurulu gücün elektrik üretiminin % 5,7 'sini gerçekleştirmesi hedeflenmektedir [34]. Bunlara ek olarak ülkemizde offshore rüzgar enerjisi potansiyeli henüz kullanılmamıştır. Orta vadede elektrik tüketiminde meydana gelecek artışlar ile offshore rüzgar enerjisi konusunda yatırımların artması beklenmektedir.

Rüzgar enerjisi kurulu gücünün 2016 yılı sonu itibari ile üretimi ise 14 TWh civarındadır. Rüzgar enerjisi santrallerinin 2016 yılında gerçekleştirmiş oldukları elektrik üretimi ülkemiz elektrik üretiminin yaklaşık % 5,69'luk kısmını karşılamaktadır. 2020 yılı için yapılan projeksiyonlara göre rüzgar enerjisinin elektrik üretimi içinde olan hedefine 2016 yılında ulaşılmıştır. 2020 yılı için rüzgar

enerjisinin elektrik üretimi içinde olan payının % 8'in üzerine çıkması beklenmektedir.



Şekil 1.15 : Türkiye rüzgar enerjisinden elektrik üretimi.

1 Kasım 2007 tarihi Türkiye’de rüzgar enerjisi için milat olmuştur. Rüzgar enerjisi potansiyel atlasının da etkisiyle Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'na (EPDK) rüzgar enerjisi lisansı alabilmek için kurulu gücü 78000 MW’ın üzerinde olan 751 proje başvurusu yapılmıştır. Akdağ ve Güler yapmış oldukları çalışmada bu başvuruları incelemişlerdir [35]. Başvuruların inceleme ve değerlendirme aşamasından geçen 695 rüzgar enerjisi santrali projesinin toplam gücü 31268 MW’dır. Yapılan lisans başvurularından 63 proje (1378 MW) tek proje olarak kalmıştır. Geri kalan 616 proje (29152 MW) için ise Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) 13 grup halinde yarışma yapmıştır. Yapılan ihale ile 149 proje (5500 MW) içinde yüksek katkı payları verilerek paylaşılmıştır. Ağırlıklı ortalama rüzgar enerjisi santrali katkı payı 1,91 kuruş/kWh olmuştur. Antakya (6,52 kuruş/kWh), Çan Havza (5,6 kuruş/kWh) ve İzmir Havza (5,25 kuruş/kWh) trafo merkezlerine olmuşlardır. Aşağıdaki Çizelge 1.7’de verilen tekliflerin dağılımı gösterilmektedir [36].

Bu başvurular sonucunda elde edilen lisanslarla rüzgar enerjisi santrali sahasında herhangi bir rüzgar ölçümü yapılmadan lisans almaya hak kazanmış projeler ortaya çıkmıştır. Lisans alınmasından sonrası yapılan fizibilite analizleri sonucu istenilen teknik ve ekonomik sonuçlara elde edilemeyen bazı rüzgar enerjisi santrali projeleri gerçekleştirilememiş ve trafo kapasiteler bloke edilmiştir. Lisans alan ama yeterli ekonomik gücü bulunmayan lisans sahibi şirketler de bu projeleri hayata

geçirememiştir. Verilen lisansların gerçekleşme oranı % 8 seviyesindedir. Daha sonra devam eden süreç zarfında kazanılan tecrübeler ile lisans almak için uygulanan mevzuat hükümleri değiştirilmiştir. Günümüze kadar devam eden süreç zarfında rüzgar enerjisi santrali lisansları verilmesi için en son Haziran 2017 olmak üzere çeşitli dönemlerde lisans başvuruları alınmış ve ihaleler yapılmıştır.

Çizelge 1.7 : Fiyat aralıklarına göre ihale sonuçları.

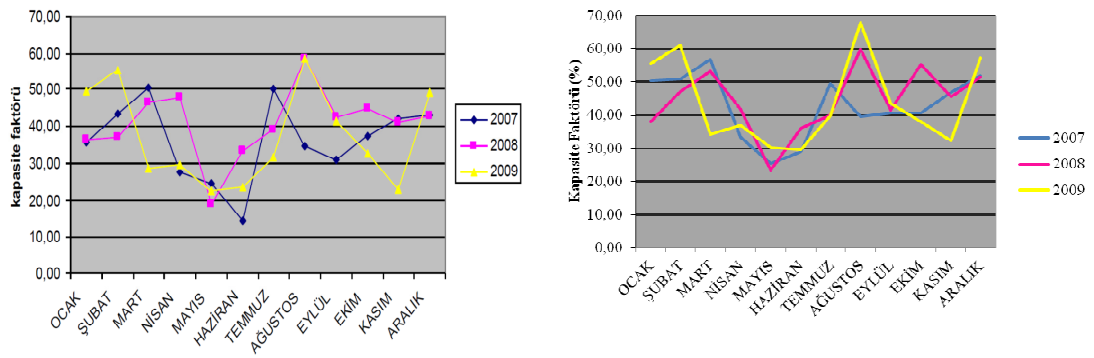
Teklif Aralığı (Kuruş)	Santral Sayısı	Toplam Güç (MW)
0-1	71	2643
1-2	17	606
2-3	13	226
3-4	25	817
4-5	12	728
5-6	8	409
6-7	1	72

Ülkemizde 2017 Temmuz itibari ile kurulu güçleri 0,8 ile 168 MW arasında değişen ve toplam kurulu 6483 gücü MW olan 158 rüzgar enerjisi santrali vardır. 2016 yılı sonu itibari ile rüzgar enerjisi santralleri Türkiye elektrik üretiminin % 5,69'unu ve kurulu gücünün % 7,39'unu oluşturmaktadır. Buna ek olarak yapım aşaması devam eden 32 rüzgar enerjisi santrali bulunmaktadır. Faaliyette olan santrallerden kurulu gücü 4320 MW olan 106 rüzgar enerjisi santrali yenilenebilir enerji kaynakları destekleme mekanizması (YEKDEM) sisteminden faydalanmaktadır. Bu sistemden faydalanan santraller 2016 sonu itibariyle yaklaşık ortalama % 38 kapasite faktörü ile 14163403 MWh elektrik üretmişlerdir. Seçilmiş bazı santrallerin kapasite faktörü aşağıda ki Çizelge 1.8'de gösterilmiştir [37-39].

Çizelge 1.8 : Seçilmiş rüzgar enerjisi santrallerinin kapasite faktörleri (%).

Yıllar	Alize	Ares	Bores	Bares	Mare	Sunjit	Anemon	Akhisar	Yuntdağı	Sayalar
1999	33,62	25,70								
2000	31,05	25,69	16,74							
2001	39,15	29,68	43,56							
2002	28,63	23,55	34,13							
2003	37,63	27,73	43,68							
2004	35,17	28,13	38,31							
2005	30,14	26,55	37,01							
2006	37,95	25,61	38,22	26,22	0,70	22,31				
2007	30,96	24,84	36,24	42,92	29,86	22,30				
2008	23,26	21,23	40,83	44,61	33,57	23,59	31,58	32,95	26,34	20,12

Çizelge 1.8’den de görülebileceği gibi kapasite faktörü yıllar bazında ciddi değişim gösterebilmektedir. Ülkemizde olan santrallerin kapasite faktörleri birçok ülkeye kıyasla gayet iyi seviyededir. Aynı ilde bulunan rüzgar enerjisi santralleri arasında bazı dönemler ciddi kapasite farkı oluşabilmektedir. Bunun nedenlerinden bir tanesi rüzgar enerjisi potansiyelinin noktasal olarak değişmesidir. Santrallerin ilk üretime geçtikleri yıllarda dönem içinde tüm yıl üretim yapmadıklarından dolayı kapasite faktörü değeri yıllık bazda düşük hesaplanmaktadır. En yüksek kapasite faktörüne sahip BARES ve BORES santrallerinin aylık bazda ayrıntılı kapasite faktörü Şekil 1.16’da gösterilmektedir.



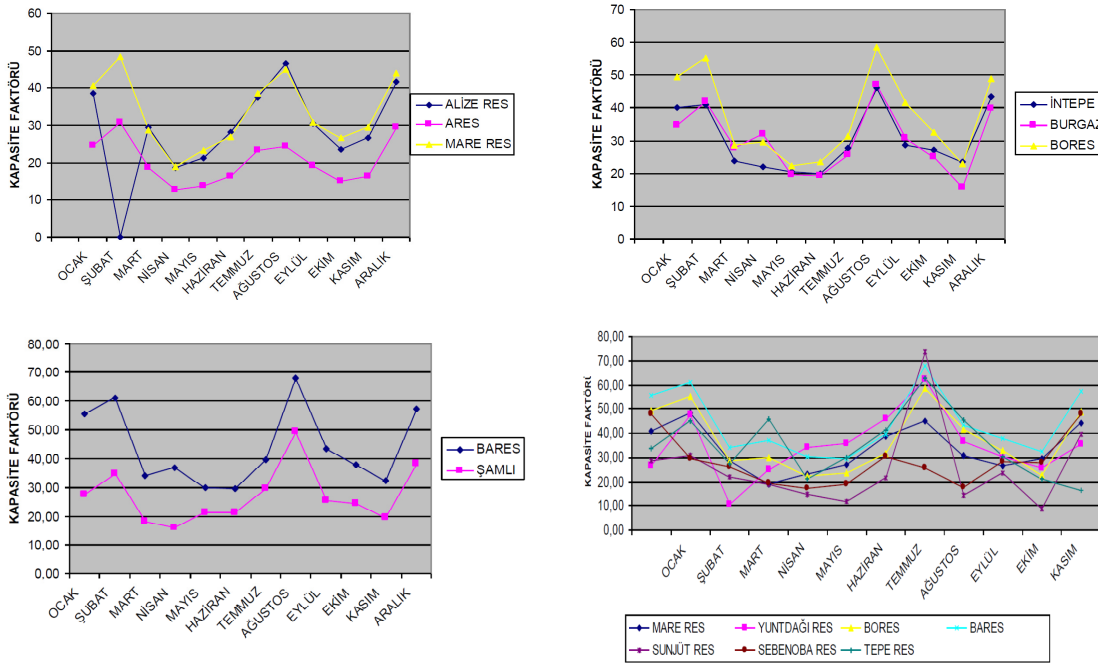
Şekil 1.16 : Santral kapasite faktörü karşılaştırması.

Çizelge 1.9 ise ülkemizde toplam kurulu gücü 600 MW olan (2010 yılı sonu rüzgar enerjisi kurulu gücü 1329 MW) ve Trakya yük tevzi bölgesinde yer alan (Alize, Sarıkaya, Doğal Enerji Burgaz, Lodos, Sanko Çatalca ve Tepe Res), Batı Anadolu yük tevzi bölgesinde yer alan (Akbük, Ayyıldız, Bandırma-3, Karakurt, Kocadağ, Şamlı ve Yuntdağ Res) ile Doğu Akdeniz yük tevzi bölgesi içinde yer alan (Mersin, Belen, Şenbük, Rotor ve Sebenoba Res) santrallerinin aylık bazda kapasite faktörlerinin sınıflandırılması aşağıda Çizelge 1.9'da sunulmaktadır.

Çizelge 1.9 : Yük tevzi merkezlerine göre aylık kapasite faktörleri (%).

	Trakya	Batı Anadolu	Doğu Akdeniz
Ocak	40,20	38,60	42,90
Şubat	32,60	37,10	40,80
Mart	30,00	28,10	15,20
Nisan	29,30	27,10	22,00
Mayıs	16,60	12,50	28,70
Haziran	15,20	17,80	34,00
Temmuz	20,90	36,70	43,70
Ağustos	27,30	35,40	30,70
Eylül	32,50	32,30	28,60
Ekim	33,50	34,90	20,00
Kasım	30,20	30,80	17,40
Aralık	43,50	40,10	25,60
Ortalama	29,30	30,40	27,60

Diğer bir önemli konu ise aynı ilde ya da birbirlerine çok yakın olan rüzgar enerjisi santrallerinin kapasite faktörlerinde birbirlerine göre ciddi farklar oluşabilmektedir. Bunun temel nedeni, türbin tipi, rüzgar karakteristiği ile türbin konumlandırmasından kaynaklanmaktadır. Aşağıda Şekil 1.17’de Çeşme, Çanakkale, Balıkesir ve diğer bölgelerde bulunan bu duruma örnek santrallerin kapasite faktörleri gösterilmektedir. Şekil 1.17’den de görülebileceği gibi türbin seçimi ve konumlandırmasının kapasite faktörü üzerinde ciddi etkileri vardır. Bazı aylarda aylık bazda bazı santrallerin kapasite faktörü % 70’in üzerine çıkabilmektedir. Alize, Ares ve Mare rüzgar enerjisi santrallerinin kapasite faktörü karakteristiği birbirine benzemektedir. Bares ve Şamlı santrallerinin kapasite faktörü karakteristiği de benzemektedir. Bares ve Şamlı santralleri incelendiğinde kapasite faktörü karakteristikleri aynı olsa da kapasite faktörleri arasında ciddi fark vardır. Bares santralinde yaklaşık % 70 kapasite faktörü ile çalıştığında Şamlı yaklaşık % 50 kapasite faktörü ile çalışmaktadır. Bu durum kurulacak rüzgar enerjisi santraline bölge seçiminin önemini ve rüzgar türbini seçimi ile konumlandırmasının önemini ortaya bir kez daha koymaktadır.

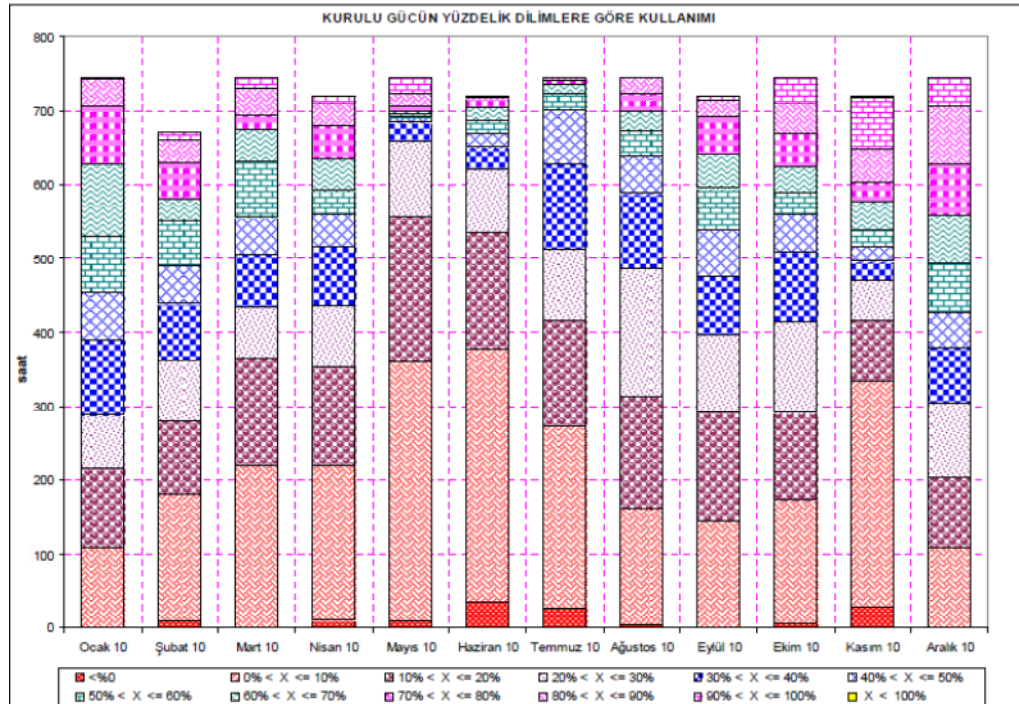


Şekil 1.17 : Konumlandırma ve türbin tipinin kapasite faktörüne etkisi.

Trakya, Batı Anadolu ve Doğu Akdeniz yük tevzi merkezlerine bağlı santrallerinin yıllık ortalama kapasite faktörleri % 27,6 ile % 30,4 arasında değişmektedir. Aylık ortalama en yüksek kapasite faktörü Trakya yük tevzi merkezinde % 43,50 ile Ocak ayında gerçekleşmiştir. Aylık ortalama en düşük kapasite faktörü ise Haziran ayında

% 15,20 olarak gerçekleşmiştir. Trakya yük tevzi merkezine bağlı rüzgar enerjisi santrallerinin en yüksek kapasite faktörü mevsimsel bazda kış mevsiminde meydana gelmiştir. Batı Anadolu yük tevzi merkezine bağlı santrallerinin ise aylık ortalama en yüksek kapasite faktörü Trakya yük tevzi merkezinde olduğu gibi Aralık ayında gerçekleşmiştir. Batı Anadolu yük tevzi merkezinde en düşük kapasite faktörü ise % 12,50 ile Mayıs ayında gerçekleşmiştir. Trakya yük tevzi merkezine bağlı santrallerde olduğu gibi Batı Anadolu yük tevzi merkezine bağlı rüzgar enerjisi santrallerinin de mevsimsel bazda en yüksek kapasite faktörü kış mevsiminde oluşmuştur. Doğu Akdeniz yük tevzi merkezine bağlı rüzgar enerjisi santrallerinde ise en yüksek kapasite faktörü Temmuz ayında ve en düşük kapasite faktörü ise Mart ayında gerçekleşmiştir. Aylık bazda kapasite faktörleri hızlı bir şekilde değişebilmektedir. Rüzgar enerjisi santrallerinin baz santral olarak kullanılması konusunda yapılan çalışmalarda çözülmesi gereken en büyük sorunlardan bir tanesi de rüzgar karakteristiğine bağlı olarak santrallerin üretim değişimleridir. Batı Anadolu yük tevzi merkezine bağlı rüzgar enerjisi santrallerinin en yüksek kapasite faktörü mevsimsel bazda yaz mevsiminde oluşmuştur.

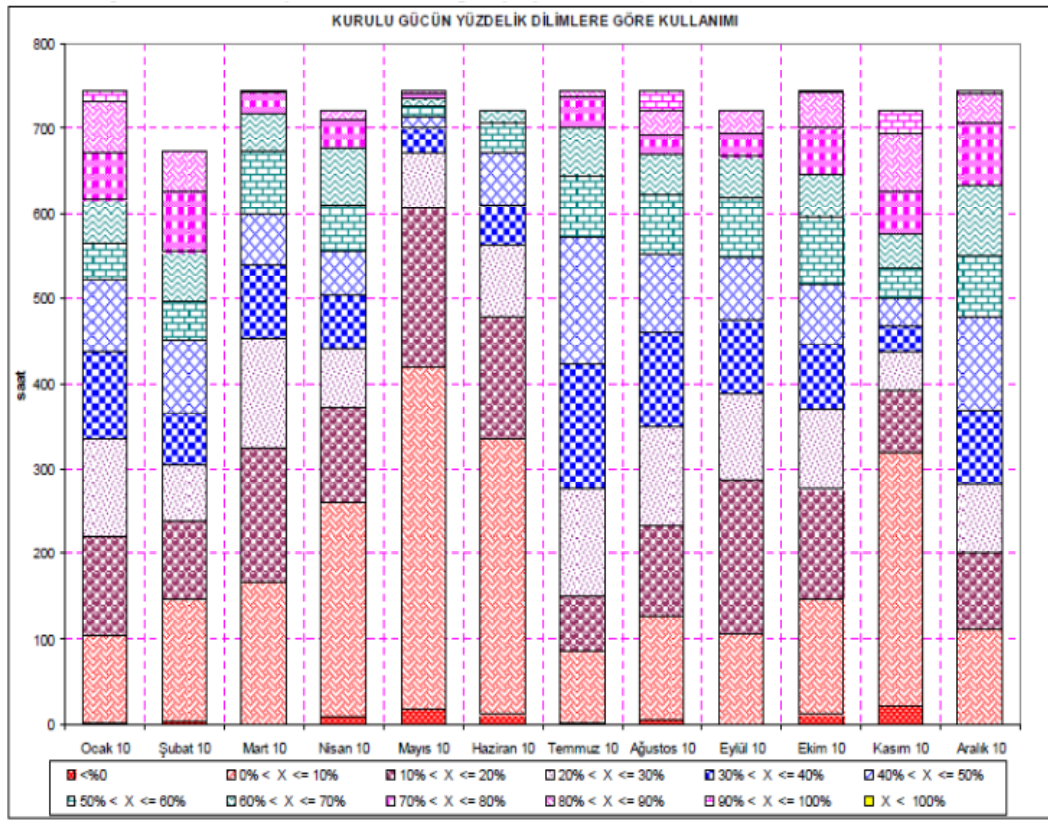
Trakya yük tevzi merkezinin aylık bazda kurulu gücün üretiminin yüzdelik dilimlere göre sınıflandırılması aşağıdaki Şekil 1.18’de sunulmaktadır.



Şekil 1.18 : Trakya tevzi merkezine bağlı santrallerin üretim dağılımı.

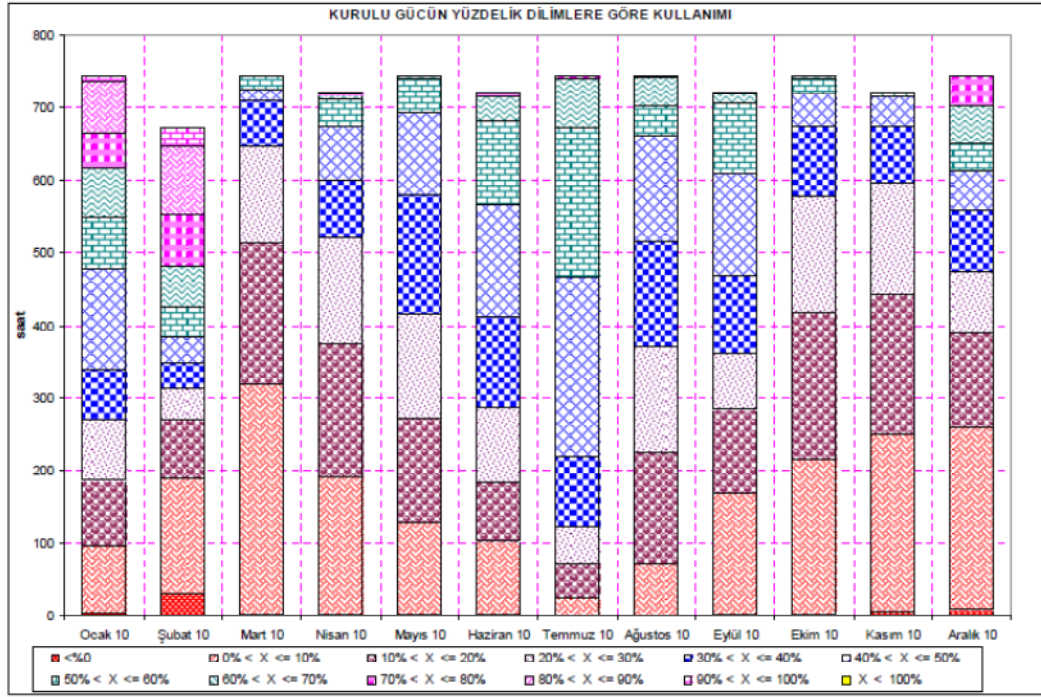
Şekil 1.18'den de görülebileceği gibi Trakya yük tevzi merkezinde Mayıs, Haziran ve Kasım aylarında kurulu gücün kullanımının büyük bir kısmı % 10 ve altında kalmıştır.

Batı Anadolu yük tevzi merkezinin aylık bazda kurulu rüzgar enerjisi gücünün elektrik üretiminin yüzdelik dilimler göre sınıflandırılması aşağıdaki Şekil 1.19'da sunulmaktadır. Şekil 1.19'dan da görülebileceği gibi Trakya yük tevzi merkezinde olan kurulu güç kullanım duruma benzer bir şekilde Mayıs, Haziran ve Kasım aylarında kurulu gücün kullanımının büyük bir kısmı % 10 ve altında kalmıştır.



Şekil 1.19 : Batı Anadolu tevzi merkezine bağlı santrallerin üretim dağılımı.

Doğu Akdeniz yük tevzi merkezine bağlı rüzgar enerjisi santrallerinin aylık bazda kurulu güç kullanımının yüzdelik dilimler göre sınıflandırılması aşağıdaki Şekil 1.20'de sunulmaktadır. Şekil 1.20'den de görülebileceği gibi Mart, Kasım ve Aralık aylarında kurulu gücün kullanımının büyük bir kısmı % 10 ve altında kalmıştır. Elektrik piyasasında elektrik fiyatlarının saatlik bazda değiştiği dikkate alındığında kurulu rüzgar enerjisi gücünün elektrik üretiminin dağılımı önemlidir. Elektrik talebinin arttığı ve elektrik üretiminin ise düştüğü dönemlerde elektrik fiyatlarında hızlı bir şekilde artmaktadır.



Şekil 1.20 : Doğu Akdeniz tevzi merkezine bağlı santrallerin üretim dağılımı.

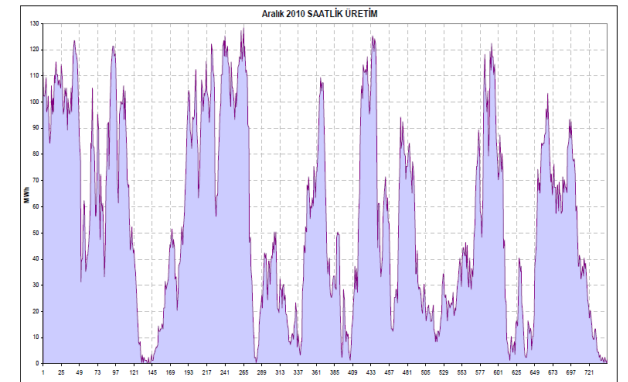
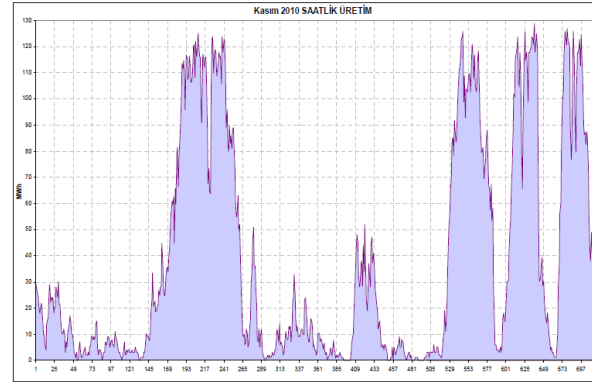
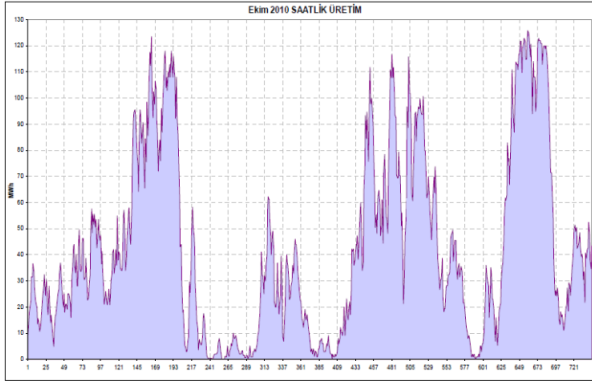
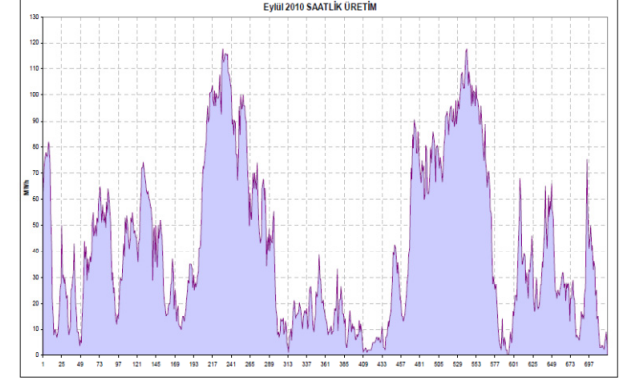
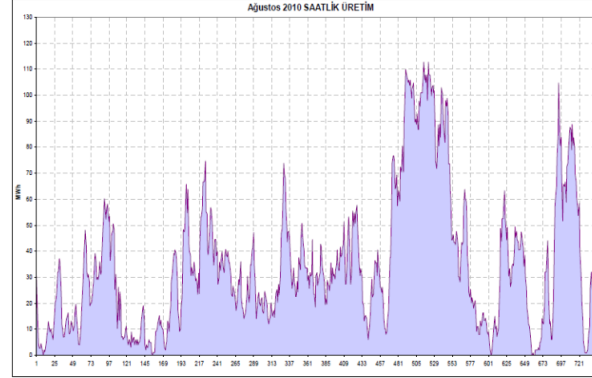
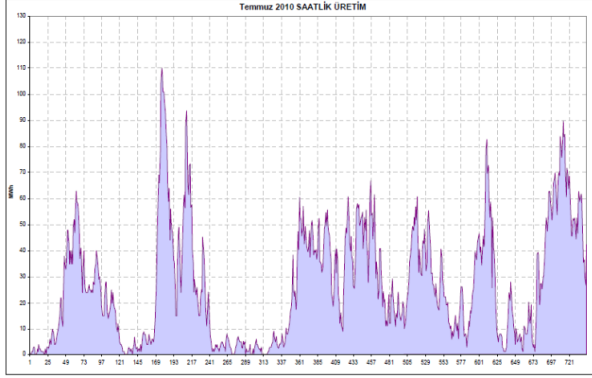
Şekil 1.21’de ise Trakya tevzi merkezinde olan aylık bazda saatlik üretimler sunulmuştur. Şekil 1.21’den de görülebileceği gibi rüzgar enerjisi santralleri enerji üretimleri saatlik bazda çok hızlı şekilde değişebilmektedir. Elektrik üretimi ile tüketimin eş zamanlı olarak dengelenebilmesi önemlidir. Rüzgar enerjisi santrallerinin enerji üretimlerinde meydana gelen bu ani değişimler gerek enerji kalitesi gerekse de enerji güvenliği ve şebeke parametreleri ile enerji fiyatları için önem arz eden konulardandır. Bu değişimin dengelenmesi ve rüzgar enerjisi santrallerinin baz elektrik santrali olarak kullanılabilmesi için büyük güçlü enerji depolama sistemleri hakkında çalışmalar yapılmaktadır. Fakat günümüzde bu enerji depolama sistemlerinin verimleri ile ömürleri yeterince yüksek değildir ve maliyetleri ise yüksektir.

Şekil 1.22’de ise Batı Anadolu tevzi merkezinde olan aylık bazda saatlik üretimler gösterilmektedir.

Şekil 1.23’de ise Doğu Akdeniz tevzi merkezinde olan aylık bazda saatlik üretimler sunulmuştur.



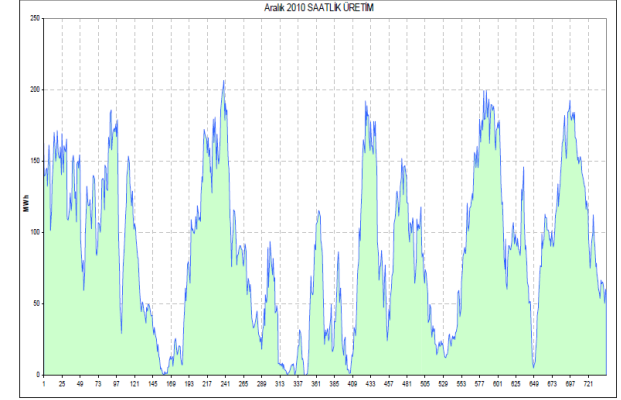
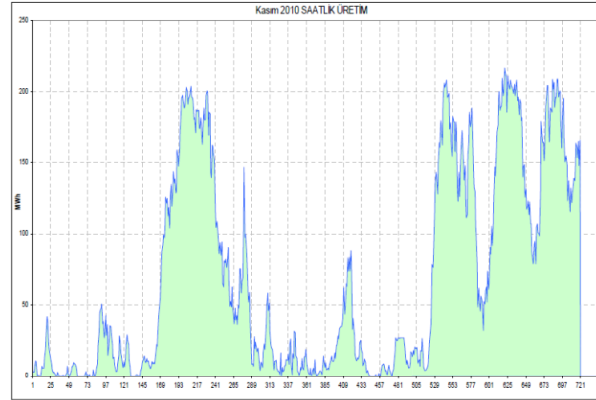
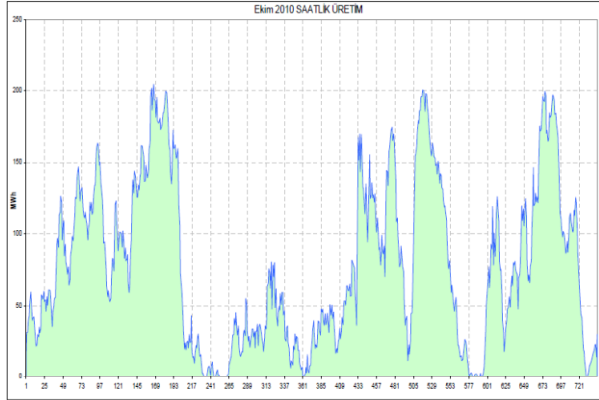
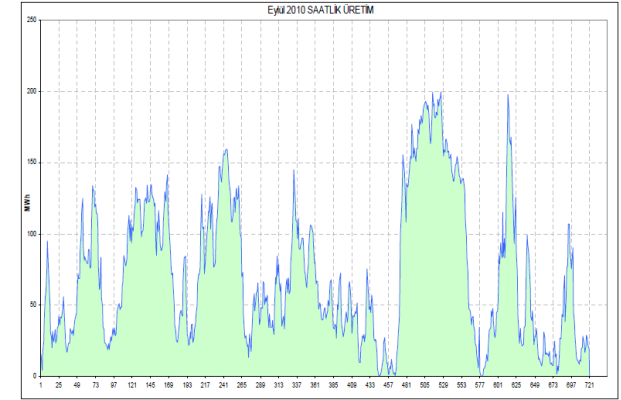
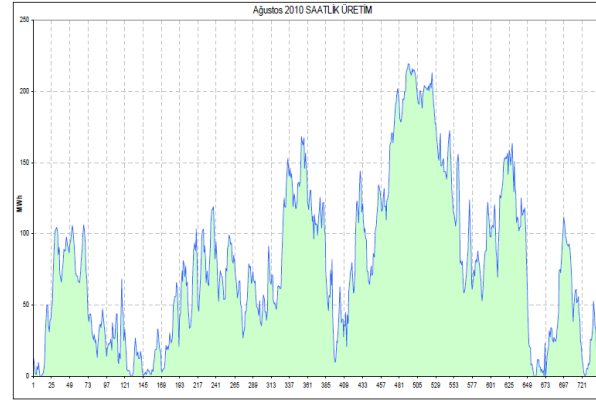
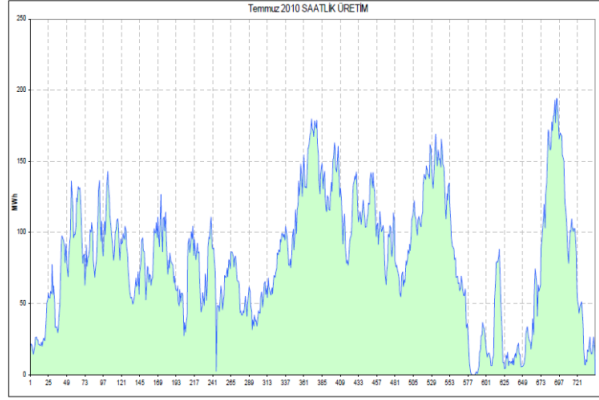
Şekil 1.21 : Trakya yük tevzi merkezinde aylık bazda saatlik üretimler.



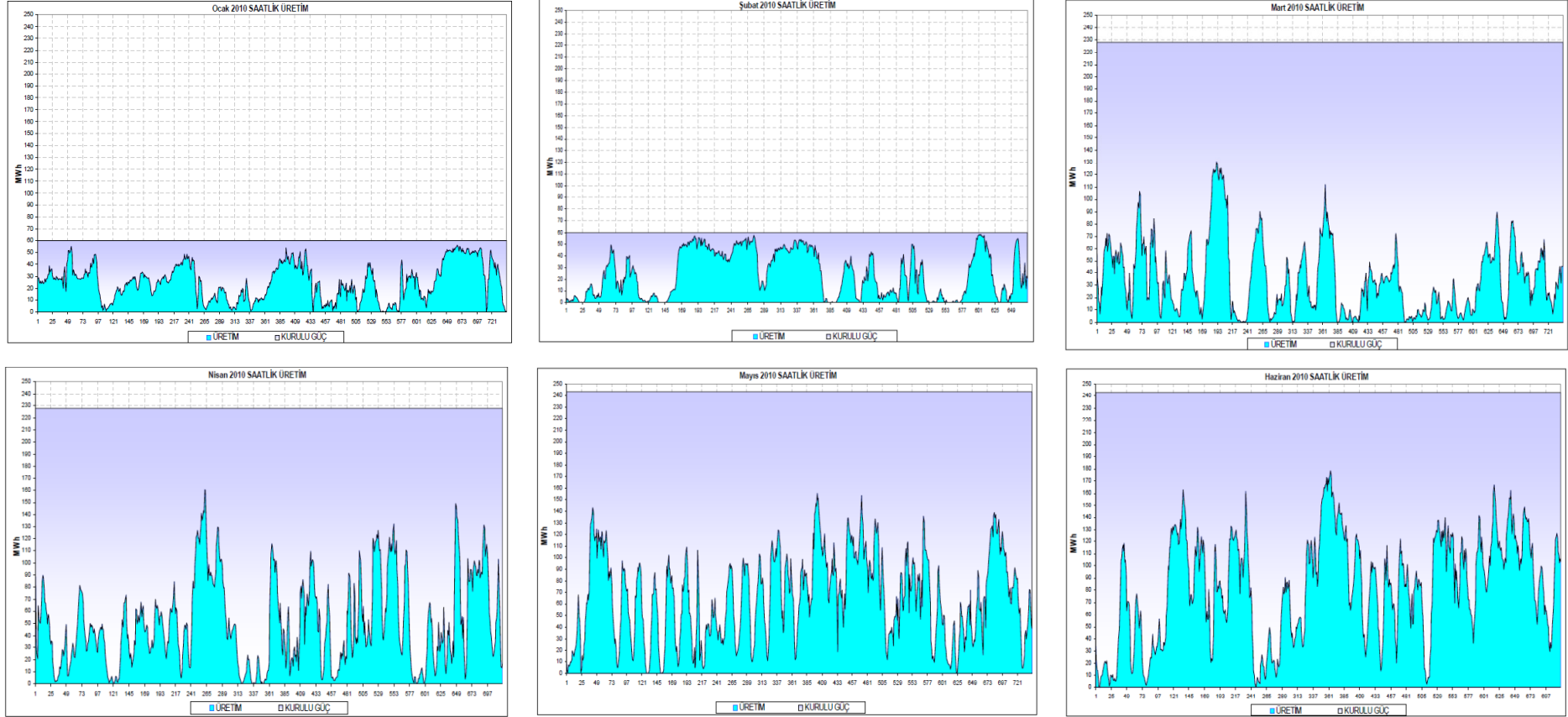
Şekil 1.21 (devam) : Trakya yük tevzi merkezinde aylık bazda saatlik üretimler.



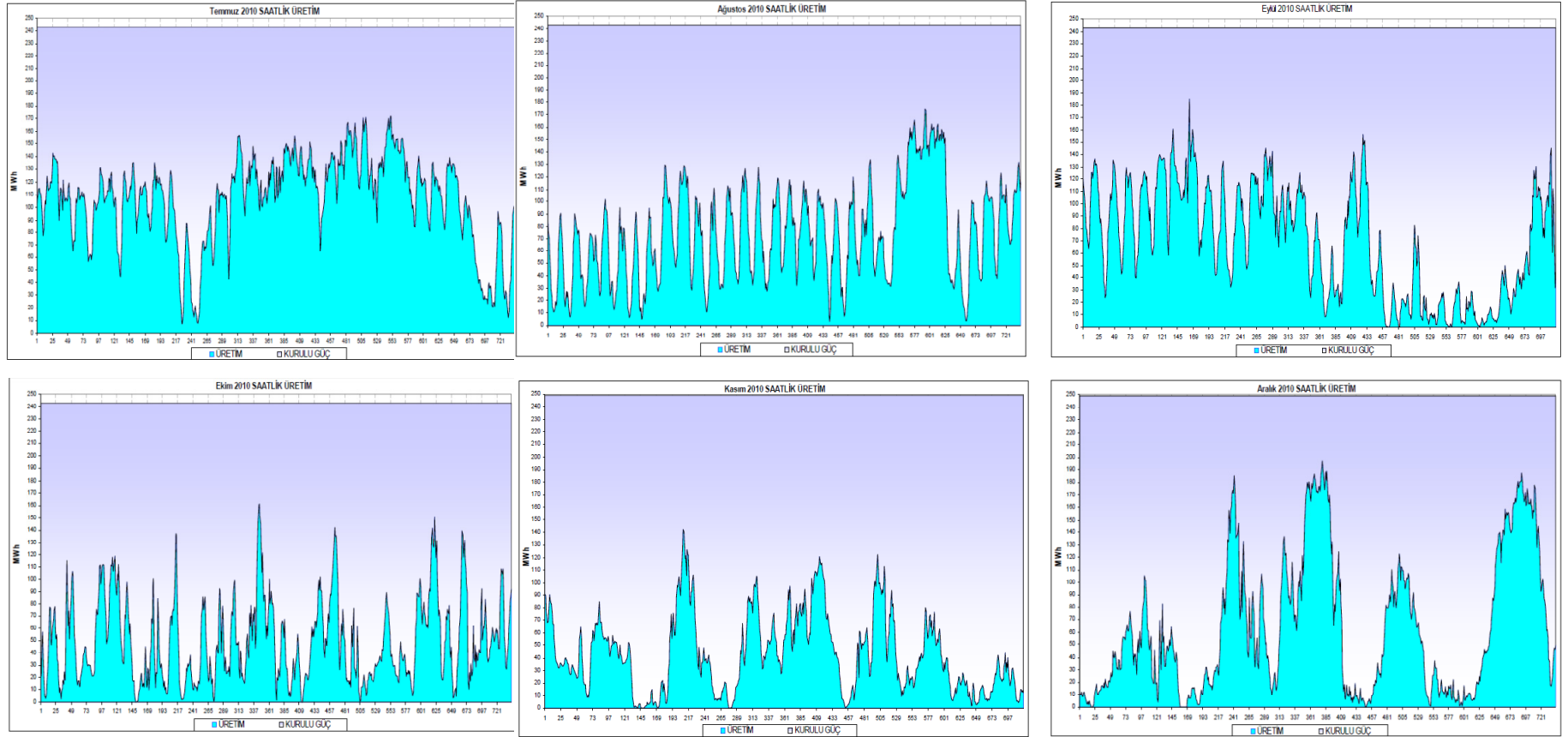
Şekil 1.22 : Batı Anadolu yük tevzi merkezinde aylık bazda saatlik üretimler.



Şekil 1.22 (devam): Batı Anadolu yük tevzi merkezinde aylık bazda saatlik üretimler.

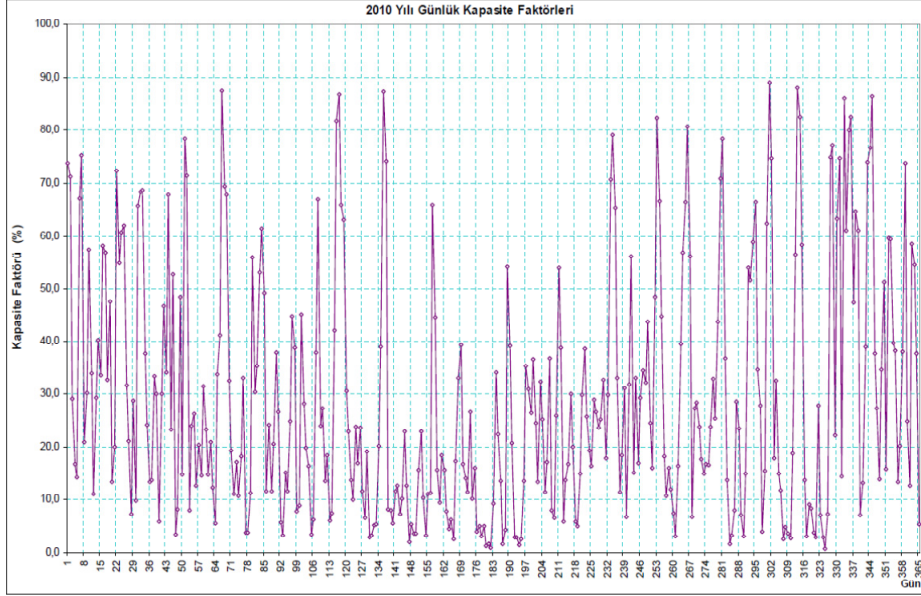


Şekil 1.23 : Doğu Akdeniz yük tevzi merkezinde aylık bazda saatlik üretimler.



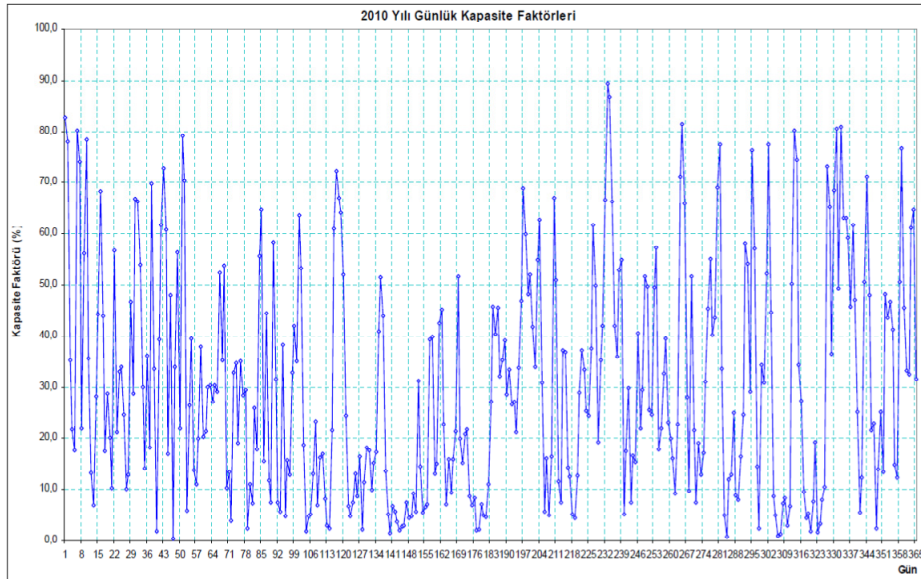
Şekil 1.23 (devam): Doğu Akdeniz yük tevzi merkezinde aylık bazda saatlik üretimler.

Şekil 1.21 -1.23’den de görülebileceği gibi rüzgar enerjisi santrallerinin üretimi çok hızlı bir şekilde değişebilmektedir. Bu nedenle serbest elektrik piyasasında bu değişikliklerin tahmini önemlidir. Ayrıca şunu da belirtmekte gerekir ki santrallerin yıllık kapasite faktörleri dünya ortalamasının üzerindedir. Tevzi merkezi bazlı günlük kapasite faktörü değişimi ise aşağıda olan şekil 1.24-1.26 ile sunulmuştur.

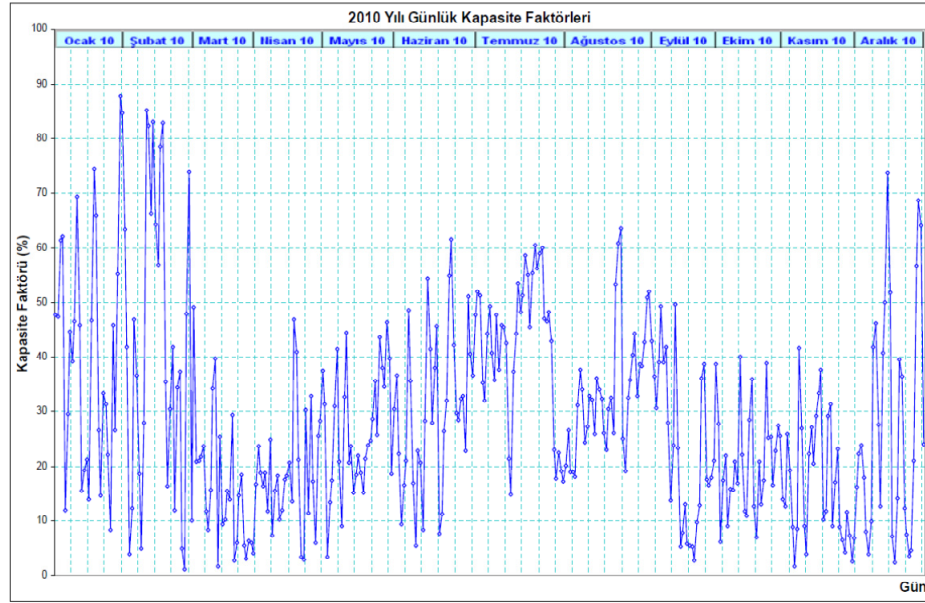


Şekil 1.24 : Trakya yük tevzi merkezi günlük kapasite faktörü.

Şekil 1.25 ile Batı Anadolu yük tevzi merkezine bağlı santrallerin kapasite faktörü değişimi sunulmaktadır.



Şekil 1.25 : Batı Anadolu bölgesi günlük kapasite faktörü.



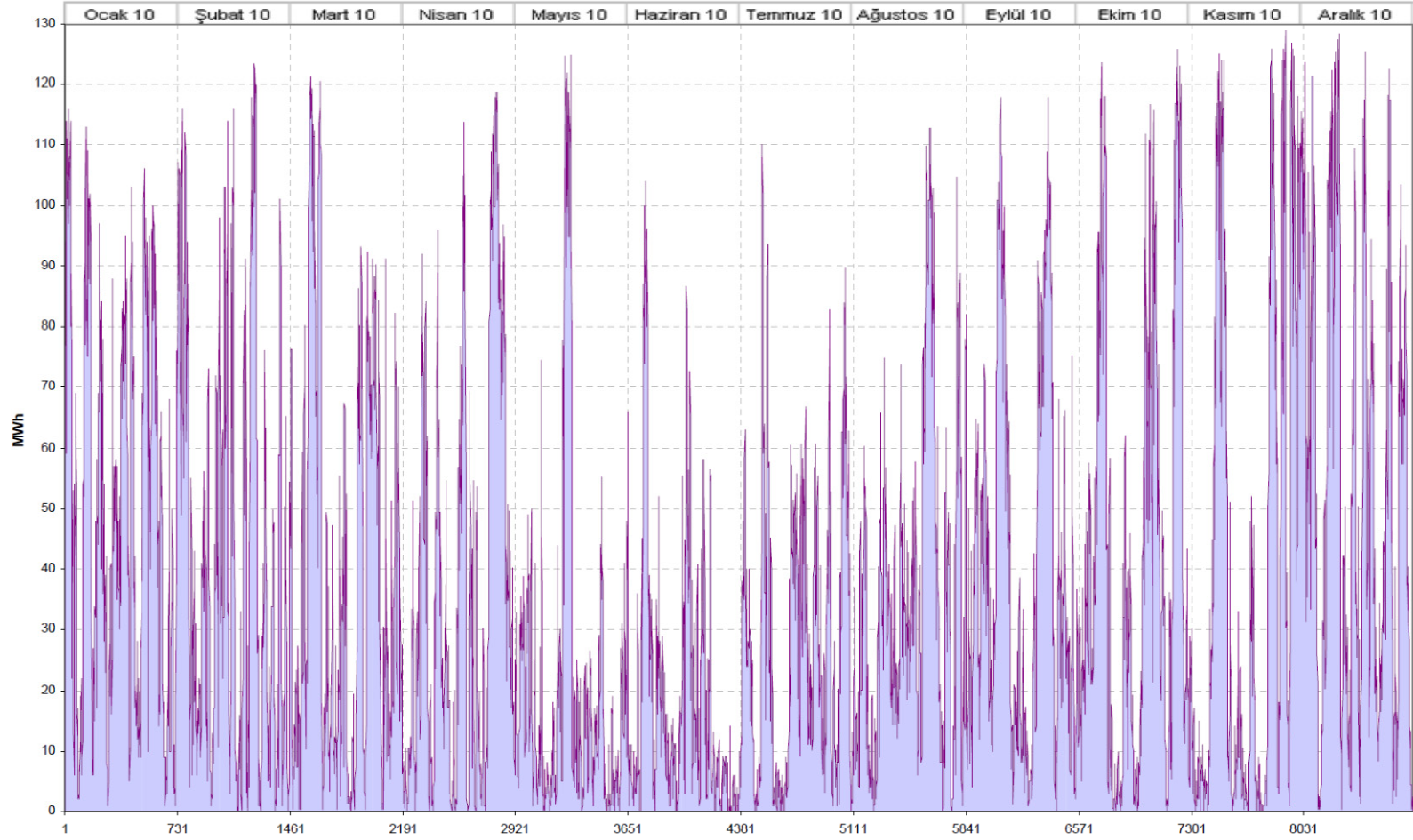
Şekil 1.26 : Doğu Akdeniz bölgesi günlük kapasite faktörü.

Şekillerden de görülebileceği gibi bazı günler % 90 seviyesinde kapasite faktörleri oluşmaktadır. Gerek günlük gerekse de saatlik az değişken ve yüksek kapasite faktörü ile üretim elektrik piyasası için önemlidir. Kapasite faktörü ve üretim değişim şekilleri rüzgar enerjisi santrallerinin baz santral olarak kullanılması konusunda da önemlidir. Aynı yük tevzi merkezine bağlı santrallerin kapasite faktörü değerinin yüksek ve toplamının değişkenliğinin az olması bu santrallerin baz santral olarak kullanılma imkanı sunmaktadır. Rüzgar enerjisinin baz santral olarak kullanılması diğer bir ifade ile yüksek emre amadelik oranı konusu üzerinde yıllardır çalışılan konulardan bir tanesidir [40]. Bununla birlikte talep tarafı yönetimi, büyük miktarda ve verimli enerji depolama teknikleri üzerinde çeşitli çalışmalar da devam etmektedir [41-45]. Serbest elektrik piyasasında enerji fiyatları anlık olarak değişebilmektedir ve üreticiler ülkeler bazında değişmekle birlikte 12 saate kadar önceden bir sonraki gün için üretimlerini ilgili kuruluşlara bildirmeleri gerekmektedir. Üretim tahminleri ile gerçek üretimler arasında oluşan sapmalar nedeni ile üreticiler çeşitli yaptırımlara maruz kalabilmektedirler. Anido ve diğ., yapmış oldukları çalışmada çok yüksek rüzgar enerjisi oranının elektrik fiyatları üzerindeki etkisini farklı senaryolar altında incelemişlerdir [46]. Çalışmada rüzgar enerjisi oranı arttıkça elektrik fiyatları düşmekte olduğu ve elektrik fiyatlarındaki değişkenliğin arttığı belirlenmiştir. Rüzgar enerjisi, üretim tahmini olmadan ya da üretim taahhüdü kararlarında dikkate alınmaksızın elektrik şebekesine entegre edilirse, asgari üretim seviyelerini geçemeyen konvansiyonel santraller için yüksek

negatif fiyatların etkisinden dolayı elektrik fiyatları önemli ölçüde düşeceği belirlenmiştir. Rüzgar enerjisi üretiminin tahmini ile ilgili çalışmalar halen devam etmektedir [47-51]. İklim değişikliğine bağlı olarak rüzgar enerjisi potansiyelinde değişimler olabilmekte ve bu da enerji üretiminde riskleri beraberinde getirmektedir. Buna ek olarak, rüzgar enerjisi potansiyelinin kullanılması ile ilgili çeşitli sorunlar vardır. Elektrik talebi ile elektrik üretimin eş zamanlı olmaması rüzgar enerjisi santralleri için olumsuz konulardan bir tanesidir. Şekil 1.24’de ülkemizde Trakya Bölgesinde toplam kurulu gücü 128,6 MW olan 5 rüzgar enerjisi santrallerinin elektrik enerjisi üretiminin saatten saate ne kadar hızlı değişebildiği gösterilmektedir [39].

Şekil 1.27’den de görülebileceği gibi saatlik elektrik üretimi çok hızlı bir şekilde değişebilmektedir. Bu nedenle elektrik üretimi tahmini önemli konulardan bir tanesidir. Ayrıca genel olarak rüzgar enerjisi santrallerin saatlik enerji üretimi konusunda yapılan tahminlerin henüz yeterince iyi sonuçlar vermemesi, elektrik şebekesi ile ilgili sorunlar, rüzgar enerjisi santrallerinin enerji kalitesi üzerine etkileri, rüzgar hızının yüksekliğe göre değişimi, ölçüm belirsizlikleri, olası iklim değişikliğine bağlı rüzgar enerjisi potansiyelinin bölgesel değişimi, türbinde olabilecek performans düşmeleri, topoğrafyada oluşabilecek değişiklikler gibi çeşitli konuların ileride rüzgar enerjisi potansiyelini etkileme riski ile bunlara bağlı ve bu faktörlerle ilişkili olarak santrallerin fizibilite çalışmalarında yapılan hatalar karşılaşılan diğer sorunlar şeklinde sıralanabilir. Fizibilite analizleri sırasında, santrallerin kurulmadan önce, yapılan ekonomik ve teknik potansiyel analizlerin hatalı olması sonucunda enerji maliyetleri de hatalı belirlenmiş olur. Bu belirsizlikler yatırım maliyetlerini dolayısıyla enerji üretim maliyetlerini, yatırımın geri dönüşüm riskini ve yatırımcıyı etkilemektedir.

Yatırımcılar için yapılması gereken, bu belirsizliklerin en aza indirilmesidir. Günümüzde rüzgar enerjisi üretimi potansiyeli belirlenmesinde sıklıkla Weibull dağılımları kullanılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, rüzgar enerjisi potansiyelinin ve enerji üretiminin daha doğru olarak belirlenmesi için karışım dağılımlı temelli modelleme teknikleri incelenecektir.



Şekil 1.27 : Trakya bölgesinde beş santralinin saatlik elektrik üretimi.

Çalışmanın devamında olan literatür özeti beş ana kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlarda, Weibull dağılımının rüzgar enerjisi potansiyeli belirleme çalışmalarında kullanılması ile bu dağılımın parametrelerini belirleme yöntemleri ile ilgili çalışmalar, rüzgar enerjisi potansiyel analizinde kullanılan standart dağılımlar ile karışım dağılımları temelli modelleme teknikleri kullanılarak yapılan çalışmaların literatür özeti verilmektedir. Ayrıca rüzgar türbini güç eğrisi modelleme teknikleri ile ilgili yapılan çalışmalar incelenecektir. Devamında ise rüzgar enerjisi potansiyelini belirlemek için kullanılan programların rüzgar potansiyeli ve rüzgar santrali üretim simülasyon sonuçları ile gerçek santral enerji üretim sonuçlarının karşılaştırılması ile ilgili çalışmaların literatür özeti verilmektedir.

Tez çalışmasının üçüncü bölümünde ise Weibull dağılımı parametre belirleme yöntemleri açıklanıp yeni parametre belirleme yöntemleri geliştirilecektir. Geliştirilen parametre belirleme yöntemlerinin doğruluğu gerek teorik üretilmiş veri seti gerekse de ölçülmüş rüzgar verileri kullanılarak gösterilecektir.

Tez çalışmasının dördüncü bölümünde ise karışım dağılımları ile entropi dağılımları incelenecektir. Devamında ise ülkemizde ölçülmüş rüzgar şiddeti verileri bütün bölgelere uygun tek bir standart dağılımın olup olmadığının analizi için modellenecektir. Ardından ise dağılımların enerji üretiminde olan etkisini göstermek için teorik bir uygulama yapılacaktır. Yapılan bu uygulamada karışım dağılımları ve MEP dağılımlarının farklı rüzgar türbinlerinde enerji üretim tahminin başarısı incelenecektir.

Tez çalışmasının beşinci bölümünde ise ülkemizde bulunan bir rüzgar enerjisi santrali WAsP ile modellenecektir. IEC standartına uygun olacak şekilde elde edilen rüzgar türbini güç eğrisi kullanılarak ve hava yoğunluğu değişimi de dikkate alınarak WAsP ile belirlenmiş rüzgar türbini ortalama güç çıktısı ve güç yoğunluğu belirlenecektir. Rüzgar türbini enerji üretimi ile gerek standart dağılımlar gerekse de karışım ve entropi dağılımları kullanılması sonucu elde edilen rüzgar türbini güç çıktısı ile güç yoğunluğu tahmin değerleri karşılaştırılacaktır ve son bölümde sonuçlar sunulacaktır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Bir bölgenin rüzgar şiddeti frekans dağılımı belirlenerek, o bölge için enerji üretimini maksimize edecek en uygun rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi seçilebilir. Böylece, bölge için uygun dağılımın belirlenmesi ile enerji üretim riskleri ve enerji üretim maliyetleri minimize edilebilir. Rüzgar enerjisi çalışmalarında olasılık dağılımları 50 yıldan uzun zamandır kullanılmaktadır. Literatürde rüzgar hızı frekans dağılımı Weibull, Rayleigh, Gamma, Nakagami, Inverse Gamma, Wakeby, Rician, Log-normal, Gumbel, Generalized Logistic, Kappa, Gaussion, Pareto, Normal ve Burr dağılımı gibi farklı dağılımlar kullanılarak gösterilmektedir [52-55]. Literatürde son 40 yıllık dönemde ise Weibull dağılımının kullanımı popüler bir hal almıştır ve Weibull dağılımı dünyanın birçok bölgesinin rüzgar dağılımını temsil etmek için uzun yıllardır kullanılan bir yöntem haline gelmiştir. Bu dağılımın kullanılma nedeni, dünyanın farklı bölgelerinde rüzgar dağılımına iyi uyduğunun tecrübe edilmesi, dağılımın esnek bir yapıya sahip olması, parametrelerinin belirlenmesindeki kolaylık, parametre sayısının az olması, parametrelerin bir yükseklik için belirlenmesinin ardından farklı yükseklikler için tahmin edilebilmesi gibi faktörler olarak sıralanabilir. Fakat son yıllarda yapılan çalışmalar rüzgar dağılımının dünyanın her yerinde Weibull dağılımı ile temsil edilemeyeceğini ya da farklı dağılımlar ile yapılan modellemeler sonucu elde edilen başarının Weibull dağılımı ile yapılan modellemeden daha iyi olabileceği gösterilmiştir [56].

Çalışmanın devamında olan literatür özeti beş ana kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda, Weibull dağılımının rüzgar enerjisi potansiyeli belirleme çalışmalarında kullanılması ile bu dağılımın parametrelerini belirleme yöntemlerinin karşılaştırılması üzerine yapılan çalışmalar özetlenmektedir. İkinci kısımda, literatürde Weibull dağılımına alternatif olarak kullanılan dağılımlar ile Weibull dağılımının karşılaştırılmasının sonuçları verilmiştir. Üçüncü kısımda, rüzgar enerjisi potansiyelini hesaplamak için kullanılan karışım dağılımları temelli modelleme teknikleri kullanılarak yapılan çalışmaların literatür özeti verilmektedir. Dördüncü kısımda, rüzgar türbini güç eğrisi modelleme teknikleri ile ilgili yapılan çalışmalar

verilmektedir. Beşinci kısımda, rüzgar enerjisi potansiyelini belirlemek için kullanılan programların rüzgar potansiyeli ve rüzgar satrali üretim simülasyon sonuçları ile gerçek santral enerji üretim sonuçlarının karşılaştırılması ile ilgili çalışmaların literatür özeti verilmektedir.

Weibull dağılım parametrelerinin doğru belirlenmesi sadece enerji santrallerinin fizibilite analizi için değil aynı zamanda rüzgar enerjisi santrallerinin optimizasyonu, seçimi ve konumlandırması için de hayati önemlidir. Weibull dağılım parametrelerini belirlemek için birçok sayısal, grafiksel ve amprik metod geliştirilmiştir. En sık kullanılan parametre belirleme metotları, Alternative Maximum Likelihood Metodu (AMLH), Grafik Metodu (GM), Justus Moment Metodu (JMM), Maximum Likelihood Metodu (MLH), Modified Maximum Likelihood Metodu (MMLH), Moment Metodu (MM), a Novel Energy Pattern Factor Metodu (NEPFM), Power Density Metodu (PD) and WAsP Metodu (WM) yöntemleridir. Bu methotlar çok sayıda çalışmada kullanılmaktadır [57-60]. Parametre belirleme için geliştirilen her bir yöntemin avantajları ve dezavantajları vardır [61]. Geliştirilen bu yöntemler çeşitli veri setleri üzerinde farklı araştırmacılar tarafından karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmalar bazı durumlarda parametre belirleme yöntemleri arasında çok farklı sonuçlar olabileceğini göstermiştir [62-65]. Bu da gerek enerji üretimi tahminlerinde, gerekse de türbin seçimi ile konumlandırılmasında dikkat edilmesi gereken bir konudur. Çalışmanın bu kısmında literatürde Weibull dağılımı kullanılarak yapılan çalışmalar ve bu dağılımın parametre belirleme yöntemlerini karşılaştırılan çalışmalar özet olarak verilmeye çalışılacaktır.

Weibull ailesinden olan dağılımın rüzgar enerjisi uygulamalarında ilk kez 1948 yılında Putnam tarafından kullanıldığı bilinmektedir [66]. 1970'li yıllarda ise petrol krizinin yaşanması sonucu yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarına verilen önemin artması ile rüzgar enerjisi potansiyel analizlerinde Weibull dağılımı hızla kullanılmaya başlanmıştır.

Johnson yapmış olduğu çalışmada Amerika'da Weibull dağılımı kullanarak yedi bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelini 21 dönem için incelemiş, en uygun türbin seçimini etkileyen parametreler üzerinde ve enerji maliyeti konusunda çalışmıştır. Dağılım parametrelerini belirlemek için grafik yöntemi kullanmıştır. Şekil parametresi (k) 1,30 ile 2,65 arasında, ölçülen güç yoğunluğu ise 14,63 W/m² ile 51,08 W/m² arasında değişmektedir. Weibull dağılımına göre belirlenen güç

yoğunluğu ile gerçek güç yoğunluğu arasında olan farkların % 20,3' e kadar ulaştığını belirlemiştir [67].

Justus ve diğ., Amerika için 1975 yılında yapmış oldukları rüzgar enerjisi potansiyeli belirleme çalışmasında 135 bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelini Weibull dağılımını kullanarak incelemişlerdir. Çalışmada ayrıca 100 kW ile 1 MW gücündeki iki rüzgar türbini için kapasite faktörü haritası hazırlamışlardır [68]. Justus ve diğ., 1975 yılında yapmış olduğu diğer bir çalışmada ise Weibull dağılımı parametre belirleme yöntemleri üzerinde çalışmışlardır. İlk defa bu çalışmada literatürde Justus yöntemi, Justus Moment yöntemi ya da Amprik yöntem olarak bilinen yöntem tanıtılmıştır [69].

Hennesey ve diğ., ise Weibull dağılımının bazı istatistiksel özelliklerini incelemişlerdir [70]. Ortalama rüzgar şiddeti ile standart sapmanın rüzgar enerjisi potansiyelini belirlemek için gerekli en küçük istatistik veri olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada buna ek olarak Weibull dağılımının rüzgar enerjisi potansiyeli analizinde kullanılmasının avantajlarına değinmişlerdir. Ayrıca yapılan çalışmada üç bölge için Weibull dağılımını kullanarak güç yoğunluğu belirlenmiş ve Weibull dağılımına göre belirlenen güç yoğunluğu ile ölçülen güç yoğunluğu arasında olan hata oranının % 2,5' den az olduğu bulunmuştur [70].

Tuller ve Brett yapmış oldukları çalışmada rüzgar enerjisi potansiyel analizinde Weibull dağılımının kullanılma nedenini incelemişlerdir. Bu dağılımın kullanılma nedenini, dağılımın esnek yapısı, ölçülen rüzgar verilerine iyi uyması ve iki parametre ile temsil edilebilmesi olarak açıklamışlardır [71].

Barros ve Estevan kısa süreli rüzgar ölçüm verileri kullanarak uzun süreli rüzgar dağılımını belirlemek için Weibull ve Rayleigh dağılımları kullanarak geliştirilen yeni bir yöntem üzerinde çalışmışlar. Geliştirilen yöntem Amerika' da 20 bölge için uygulanmış ve % 7' den daha az bir hata ile ortalama rüzgar şiddetini belirlemişlerdir [72].

Dixon ve Swift yönlerine bağlı olarak rüzgar şiddeti frekans dağılımı ve Weibull parametrelerinin değişiminin Weibull dağılımına yeni bir parametre ekleyerek belirlenmesi üzerinde çalışmışlardır [73].

Cavallo rüzgar enerjisinin baz yük santralı olarak kullanılabilmesinin ekonomik ve teknik olarak mümkün olup olmadığını 225 kW gücünde rüzgar türbinleri ile

tasarlanan 2000 MW gücünde bir santral üzerinde değerlendirilmiştir [40]. Enerji üretiminin belirlenmesi için Weibull dağılımı kullanılmıştır. Çalışmada rüzgar enerjisi santrali için enerji depolama sistemli ve enerji depolamasız iki durum analiz edilmiştir.

Ramachandra ve diğ., Hindistan'da beş bölge için rüzgar enerjisi potansiyelini Weibull dağılımı kullanarak analiz etmişlerdir [74]. Weibull dağılımının bölgelerin frekans dağılımına uygun olduğunu göstermişler ve ortalama rüzgar şiddetinin aynı olmasına karşılık rüzgar frekans dağılımının farklı olması durumunda rüzgar enerjisi potansiyelinin de oldukça farklı çıkabileceğini açıklamışlardır [74].

Chang ve diğ., Tayvan'da 25 bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelini 30 yılın üzerinde rüzgar ölçümleri kullanarak analiz etmişlerdir [75]. Rüzgar enerji potansiyelinin en fazla olduğu dört bölge için 660 kW gücünde rüzgar türbini kullanarak Weibull dağılımı ile türbin verimleri, teknik enerji üretim potansiyeli ve türbinlerin enerji üretim süreleri aylık bazda belirlenmiştir. Weibull dağılımı parametre belirleme yöntemi olarak MLH metodu kullanılmıştır. Yapılan çalışmada teorik olarak kapasite faktörünün % 80' den büyük olan bölgeler olduğu gösterilmiş ve türbin veriminin % 39,6' ya kadar ulaştığı hesaplanmıştır [75].

Çelik, küçük güçlü rüzgar türbinlerinin enerji üretimlerini aylık bazda farklı ülkelerde ölçülen rüzgar şiddetleri kullanarak Weibull dağılımı ve zaman serisi yöntemi ile hesaplamıştır, 96 ay için yapılan çalışmada zaman serisi üretimi ile Weibull üretimi arasında en büyük fark % 8,8 olurken en küçük fark % 0 olmuş, ortalama fark ise % 2,79 olarak hesaplanmıştır ve Weibull dağılımının enerji üretimi tahminlerinde kullanılmasının başarılı olduğunu belirtmiştir [76]. Bu çalışmanın devamı olarak yapılan bir diğer çalışmada ise aynı bölgelerin verileri için üç ve dört günlük veriler alınarak Weibull dağılımı ile enerji üretimi analiz edilmiş, zaman serisi yöntemi ile sonuçlar karşılaştırılmış bölgeler için ortalama enerji üretim tahmin hatasının bölgesel bazda % 6' ya kadar çıktığını ve genel ortalama için ise % 4' den az olduğu ilgili bölgeler için gösterilmiştir [77].

Bagiorgas ve diğ., Yunanistan'da dört bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelini belirlemek için Weibull dağılımı kullanmış, dağılım parametrelerini belirlemek için ise üç farklı yöntem kullanmışlardır [78]. Yöntemleri herhangi bir uygunluk testi ile karşılaştırmamışlardır. Çalışmanın devamında yapılan diğer bir çalışmada ise ilgili

bölgelerin enerji üretim maliyetleri Weibull parametrelerinin ortalamaları alınarak 1,5 kW ile 2,3 MW arasında değişen farklı türbinler ve durumlar için Weibull dağılımı ile hesaplanmıştır. Ayrıca çalışmada türbin gücünün ve göbek yüksekliği değişiminin enerji maliyeti üzerine etkisini belirlemeye çalışılmıştır.

Cellura ve diğ., ise İtalya'da 29 bölgenin iki ila üç yıl arasında değişen rüzgar şiddeti verilerini Weibull dağılımı kullanarak analiz etmişlerdir. Dağılım parametreleri MLH yöntemi ile belirlenmiştir [79]. Rüzgar ölçüm yüksekliği olan 10 metre yükseklik için şekil parametresinin 1,304 ile 2,037 arasında, ölçek parametresinin ise 3,56 ile 6,43 m/s arasında değiştiğini belirlemişler ve bölgenin rüzgar atlasını oluşturmuşlardır [79].

Jiang ve diğ., ise Kaliforniya sahil bölgesinin rüzgar enerjisi analizinde Weibull dağılımını kullanmışlardır [80].

Stewart ve Essanwanger kuzey yarım kürede 45 bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelini Weibull dağılımı kullanarak belirlemişler ve Weibull kümülatif dağılımının kümülatif dağılım için uygun olduğunu belirtmişlerdir [81].

Pavia ve O'Brein ise okyanuslardaki rüzgar frekansı dağılımını Weibull dağılımı kullanarak analiz etmiştir [82]. Bu analiz sırasında mevsimsel ve enlemsel olarak da değişimlerin sonucu incelenmiştir. Uygulamış oldukları Kolmogorov-Smirnov testi sonuçlarına göre, Weibull dağılımının okyanuslarda ölçülen rüzgar frekansı dağılımını temsil edebileceği gösterilmiştir [82].

Weibull dağılımı rüzgar enerjisi potansiyel haritaların hazırlanmasında da kullanılmaktadır. Petersen ve diğ., Danimarka için hazırladıkları rüzgar atlasında Weibull dağılımını kullanmışlardır [83]. Yapmış oldukları diğer bir çalışmada ise Avrupa rüzgar atlasını Weibull dağılımı kullanarak hazırlamışlardır [83].

Ettoumi ve diğ., ise Cezayir'de dört bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelini, enerji üretim analizini Weibull dağılımı kullanarak yapmışlardır [84]. Çalışma kapsamında güçleri 0,25 kW ile 7,5 kW arasında değişen dokuz türbin kullanılmış ve her bölgenin dört farklı yükseklik için enerji üretim analizi yapılmıştır [84].

Benzer bir çalışmada Kashani ve Bahri tarafından Weibull dağılımı kullanılarak İran rüzgar enerjisi potansiyelini belirlemek için yapılmıştır [85].

Yunanistan için yapılan başka bir çalışma da ise Naxos adasının rüzgar enerjisi potansiyeli Weibull dağılımı ile analiz edilmiştir. Şekil parametresi 2,17 ölçek parametresi ise 8,58 m/s olarak belirlenmiştir. Yıllık ortalama güç yoğunluğu 420 W/m^2 olduğu belirlenmiştir ve bölgenin büyük güçlü rüzgar türbini kurmak için uygun olduğu bulunmuştur. Çalışmada rüzgar verilerinin Weibull dağılımına uyup uymadığı üç farklı hata analizi ile değerlendirilmiştir [86].

Tunus için yapılan çalışmada ise Weibull dağılımı parametreleri MLH metodu ile belirlenmiş ve 1500 kW gücünde yedi farklı rüzgar türbini ile enerji üretim analizi yapılmıştır. Türbin seçimine bağlı olarak enerji üretimleri arasında % 3,57 oranında fark olduğu belirlenmiştir [87].

İran için yapılan diğer bir çalışmada ise 68 ölçüm noktasından alınan veriler Weibull dağılımı ile analiz edilmiş ve İran rüzgar enerjisi potansiyeli haritası hazırlanmıştır. Yapılan çalışmada şekil parametresinin 1,08 ile 2,24 arasında, ölçek parametresinin ise 3,18 ile 10,34 m/s arasında değiştiği belirlenmiştir [88].

İspanya rüzgar enerjisi analizi ve rüzgar haritası Weibull dağılımı yardımıyla Fueyo ve arkadaşları tarafından hazırlanmıştır [89]. İspanya rüzgar enerjisi potansiyeli 1100 TWh/yıl bulunmuştur. Yapılan çalışmada % 24 kapasite faktörünün üzerinde kurulabilecek güç ise 70 GW olarak hesaplanmıştır. İspanya'nın 2008 elektrik tüketiminin % 60'ının rüzgar enerjisi ile karşılanabileceği belirtilmiştir [89].

Rüzgar enerjisi üretim maliyeti analizi ile ilgili Diaf ve Notton tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise Cezayir'de beş farklı bölgede dört türbin ile enerji üretim analizi Weibull dağılımı ile yapılmıştır. Yapılan çalışma sonuçlarına göre kapasite faktörünün % 19,7 ile % 48,5 arasında değiştiği ve enerji üretim maliyetinin 2 \$ cent/kWh'e inebileceği belirlenmiştir [90].

Yukarıda yapılan literatür özetinde dünyada Weibull dağılımını gerek rüzgar karakteristiği gerekse de enerji üretim analizinde sıklıkla kullanılan bir yöntem olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, ülkemiz için yapılan çalışmalardan seçilenler ise çalışmanın devamında özetlenecektir.

Ülkemizde, rüzgar enerjisi binlerce yıldır kullanılan bir kaynaktır. Mısır, Çin ve İran'dan rüzgar enerjisi dünyaya Anadolu Medeniyetleri ile dağılmıştır. Ülkemizin birçok bölgesinde çeşitli amaçlarla kullanılmış binlerce yıllık rüzgar değirmeni kalıntısı bulunmaktadır.

Rüzgar enerjisi konusunda akademik anlamda yapılan ilk çalışmalar ise 1960' lı yıllara kadar uzanmaktadır [33]. 1979' da ise Öney ve diğ., tarafından Türkiye' de rüzgar enerjisi kullanım olanakları 20 yıldan daha uzun ölçüm verileri kullanılarak analiz edilmiştir [91]. Küçük güçlü rüzgar türbinlerinin (1-10 kW) Güneydoğu bölgesinde yaz döneminde güneş enerjisi ile hibrit olarak kullanılabileceği belirtilmiştir.

Web of Science veri tabanına kayıtlı Türkiye rüzgar enerjisi potansiyeli ile ilgili ilk çalışma 1986 yılında Taşdemiroğlu tarafından yapılmıştır [92]. Çalışmada 117 ölçüm bölgesine ait veriler analiz edilerek, enerji üretimi için uygun bölge belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada ayrıca aylık bazda Türkiye rüzgar haritaları oluşturulmuştur. Bandırma, Antakya, Çiğili, Çanakkale, Sinop, Mardin, Kumköy, Gökçeada, Çorlu ve Cihanbeyli için rüzgar enerjisi potansiyelleri incelenmiştir.

Veri tabanına kayıtlı ikinci çalışma ise Külünk tarafından yapılmıştır [93]. Külünk Çanakkale, Ereğli, Florya ve Siverek için rüzgar enerjisi potansiyeli analizini dört farklı yöntemle göre analiz etmiştir. Bu yöntemlerden bir tanesi de Weibull dağılımıdır.

Bu çalışmaların devamında Tolun ve diğ., tarafından bir DPT projesi ile Gökçeada rüzgar enerjisi potansiyelini incelemişlerdir [94]. Daha sonra ilgili çalışma bir makale olarak yayınlanmıştır [95]. İlgili çalışmada, Gökçeada rüzgar enerjisi potansiyelinin WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) kullanılarak dört bölgeden alınan 10 metre yükseklikte üç yıllık ölçüm sonuçlarına göre analiz edilmiştir. Ölçüm istasyonlarının Weibull dağılımı şekil ve ölçek parametreleri belirlenmiştir. Ölçüm istasyonunun maruz kaldığı çevresel etkilerden arındırılarak adanın rüzgar enerjisi potansiyel atlası hazırlanmıştır. Yapılan WAsP simülasyon sonuçlarına göre 10 metre yükseklikteki ortalama rüzgar şiddetinin adanın % 33' ünde 6 m/s' den büyük olduğu belirlenmiştir.

Uyar yapmış olduğu çalışmada Türkiye rüzgar enerjisi atlasını oluşturmak için WAsP programını kullanmıştır. Çalışma kapsamına Kırklareli, Uzunköprü, Çorlu, Akçakoca, Sinop, Samsun, Trabzon, Hopa, Ağrı, Gemerek, Bozcaada, Çeşme, Fethiye, Sultanhisar, Seydişehir, Yumurtalık, Anamur, Afyon, Elmalı ve Çanakkale meteoroloji istasyonlarının verileri kullanılmıştır. Çalışmada istasyonların Weibull dağılımı parametreleri de belirlenmiştir [96].

Türksoy tarafından Bozcaada için yapılan benzer bir çalışmada ise adanın rüzgar enerjisi potansiyeli ve Weibull dağılımı parametreleri WAsP programı kullanılarak belirlenmiştir [97]. Çalışmada kullanılan veri seti 13 yıllık döneme aittir. Weibull dağılımı şekil parametresi 1,89 ve ölçek parametresi ise 7,2 m/s olarak belirlenmiştir. Ortalama rüzgar şiddeti 6,4 m/s olarak ve güç yoğunluğu ise 324 W/m² olarak belirlenmiştir. Ayrıca iki bölge için 36 metre göbek yüksekliğine sahip 250 kW gücünde rüzgar türbini kullanılarak enerji üretim maliyeti belirlenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre rüzgar türbininin kapasite faktörü ise % 57,4 ve % 53,1 olarak bulunmuştur.

İncecik ve Erdoğan yapmış oldukları çalışmada ülkemizin batı kıyılarında yer alan Ayvalık, Bodrum, Bozcaada, Çanakkale, Dikili, Edremit, Gökçeada ve İzmir bölgelerinin rüzgar enerjisi potansiyeli Weibull dağılımını dikkate alarak incelemiştir [98]. Bozcaada'nın 10 metre yükseklikte ölçülen verilere ortalama rüzgar şiddetinin 6,36 m/s olduğu ve güç yoğunluğunun 319,5 W/m² olduğu belirlenmiştir [98].

Topçu ve diğ., Sinop rüzgar enerjisi potansiyelini incelerken yapmış oldukları çalışmada Sinop'da iki farklı noktada olan ölçüm istasyonlarının verilerini karşılaştırmış ve arada olan ciddi farkı ortaya koymuşlardır [99]. Rüzgar potansiyeli yüksek olan bölge için WAsP programı ile 10, 30 ve 50 metre için güç yoğunluğu ile ortalama rüzgar şiddeti değerleri hesaplanmış ve bu yükseklikler için Weibull parametreleri belirlenmiştir.

Dündar ve İnan ise Bozcaada'nın rüzgar enerjisi potansiyelini 1975 ile 1984 yılları arasında ölçülen rüzgar verilerini kullanarak WAsP programı ile analiz etmişlerdir [100]. Weibull dağılımı şekil ve ölçek parametrelerini farklı yükseklikler için hesaplamışlardır. Weibull dağılımı şekil parametresi 10 metre yükseklikte 1,89, ölçek parametresi 7,2 m/s ve ortalama rüzgar şiddeti ise 6,4 m/s olarak hesaplanmıştır.

Durak ve Şen yapmış oldukları çalışmada Akhisar'ın rüzgar enerjisi potansiyelini WAsP ile analiz etmişlerdir [101]. Weibull dağılım parametreleri sektörel olarak verilmiştir. Aylık bazda güç yoğunluğunun 72 W/m² ile 502 W/m² arasında değiştiği ve ortalamanın ise 308 W/m² olduğu belirlenmiştir. Bölgeye 600 kW gücünde 20 rüzgar türbini kullanarak kurulacak 12 MW santral için üretim analizi yapılmış ve %

10 hata payı dikkate alınarak % 29,88 ile % 39,53 arasında değişen kapasite faktörü hesaplanmıştır.

Karsli ve Geçit yapmış oldukları çalışmada Gaziantep Nurdağı'nda 10 metre yükseklikte ölçülen rüzgar verilerini kullanarak bölge potansiyelini Weibull dağılımı ile analiz etmişlerdir [102]. Ortalama rüzgar şiddeti 10 metre yükseklik için 7,3 m/s ve ortalama güç yoğunluğu ise 222 W/m² olarak belirlenmiştir.

Özerdem ve Türkeli İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü yerleşkesinin rüzgar enerjisi potansiyelini WASP ve Wind Pro yazılımları ile analiz etmişlerdir [103]. Sektörel Weibull parametreleri ve ortalama rüzgar şiddeti 10 ve 30 metre yükseklik için belirlemişlerdir.

Hocaoğlu ve Kurban Eskişehir Anadolu Üniversitesinde kurmuş oldukları rüzgar ölçüm istasyonunun verilerini kullanarak, bölgede kurulacak rüzgar enerjisi santralinin üretimini farklı senaryolar dikkate alarak WASP programı ile analiz belirlemişlerdir [104]. Çalışmada ölçüm noktasına güçleri 225 kW ile 2 MW arasında değişen, göbek yükseklikleri ise 32,5 metre ile 67 metre arasında olan 18 rüzgar türbinleri için analiz yapılmıştır. Üniversite kampüsüne kurulacak rüzgar türbinlerinin kapasite faktörü değerlerinin % 22,4 ile % 40 arasında değiştiğini belirlemişlerdir. Diğer bir senaryoda ise Eskişehir' de farklı türbinler ile üç farklı rüzgar enerjisi santralinin simülasyonu yapılmıştır.

Özgür yapmış olduğu doktora tezinde, Kütahya'da kurulan bir rüzgar ölçüm istasyonundan 36 ay için alınan verileri Weibull, Gamma ve Log-normal dağılımları ile analiz etmiş, dağılım parametrelerini üç farklı yöntem ile belirlemiştir [105]. Ortalama rüzgar şiddeti 30 metre yükseklik için 4,8 m/s, güç yoğunluğu ise 67,7 W/m² olarak belirlenmiştir. Ayrıca bölge rüzgar enerjisi potansiyelinden yararlanmak için farklı güçlerdeki türbinler kullanmış ve Alwin programı ile enerji üretim çalışması fizibilite analizi yapmıştır.

Usta ve Kantar farklı dağılımlar kullanarak Göztepe ve Ulukışla bölgelerinin rüzgar enerjisi potansiyelini incelemiş ve bu dağılımları üç farklı hata analizine göre karşılaştırmışlardır [106]. Bu çalışmada ayrıca Weibull, Lognormal, Nakagami, Gamma, Rayleigh ve Genelleştirilmiş Gamma dağılımları kullanılmıştır. Çalışmada veriler aylık ve yıllık bazda analiz edilmiş, bütün aylarda ve bölgelerde bütün hata analizlerine göre en iyi sonucu veren tek dağılım olmadığı bulunmuş, Lognormal ve

Rayleigh dağılımlarının modellemede yeterince iyi olmadığını belirlemiştir. Ayrıca Nakagami dağılımının rüzgar enerjisi analizlerinde kullanılabilecek bir dağılım olduğu sonucuna varılmıştır.

Oral yapmış olduğu doktora tezinde, Sakarya Esentepe bölgesine kurulan bir rüzgar ölçüm istasyonunun verilerini enerji potansiyelini belirlemek için analiz etmiştir [107]. Ortalama rüzgar şiddeti 4,43 m/s güç yoğunluğu ise 121,6 W/m² olarak belirlenmiştir. Weibull şekil parametresi ise 1,709 ve ölçek parametresi ise 4,972 m/s olduğu belirlenmiştir. Çalışmada WAsP ve Wind Pro programı kullanarak güçleri 200 kW ile 3000 kW arasında 12 rüzgar türbini için kapasite faktörü değerlerini belirlemiş ve en uygun rüzgar türbinini seçmeye çalışmıştır. Yapılan çalışmaya piyasada ticari olarak bulunan çeşitli güçlerde rüzgar türbinleri kullanılarak enerji üretim analizi yapılmıştır. Kapasite faktörü en yüksek türbin belirlenmesinin ardından bu türbin ile bir santral simülasyonu ve enerji üretim maliyeti analizi yapılmıştır. Bölgede kurulacak santralin kapasite faktörü % 20,3 olarak belirlenmiştir.

Gökçek ve diğ., ise Kırklareli'nin rüzgar enerjisi potansiyeli ve enerji üretim maliyetini analiz etmek için Weibull dağılımı kullanmışlardır [108]. Dağılımın parametreleri Justus Moment Metodu ile belirlenmiştir. Çalışmada güçleri 300 kW ile 2500 kW arasında değişen ve göbek yükseklikleri ise 30 metre ile 80 metre arasında değişen 11 farklı türbin kullanılmıştır. Çalışmada yıllık bazda kapasite faktörlerinin en yüksek % 27,08 olarak en büyük güce sahip 2300 kW gücündeki türbin için olduğu ve en düşük değer ise 450 kW gücünde rüzgar türbininde % 19,23 olarak belirlendiği ifade edilmiştir. Bunlara ek olarak aylık bazda enerji üretim analizleri de yapılmıştır. Aylık bazda olan enerji üretim analizi sonuçları ise kapasite faktörünün % 42,54 seviyesine kadar çıktığını göstermiştir. Bu çalışmada ayrıca aynı yükseklikte türbin gücünün artırılmasının her zaman enerji üretimini artırmadığını ve enerji üretiminin türbin karakteristiğine bağlı olduğu gösterilmiştir. Enerji üretim maliyeti ise türbin kW maliyeti 700 dolar ve 1000 dolar olmak üzere iki farklı durum ile üç farklı göbek yüksekliği dikkate alınarak en uygun türbin için hesaplanmıştır.

Akdağ ve Güler ise Amasra rüzgar enerjisi potansiyelini analiz etmişlerdir [109]. Çalışma kapsamında rüzgar türbinleri göbek yüksekliği değişiminin enerji üretimine etkisi farklı boyutlarda türbin çeşitleri için analiz edilmiş ve bölge için en uygun rüzgar türbini seçimi üzerinde çalışılmıştır. Akdağ ve Güler yapmış oldukları diğer

bir çalışmada daha önce belirlenmiş olan Weibull parametrelerini kullanarak 2 MW rüzgar türbini için farklı durumları da dikkate alarak elektrik üretimi maliyetini belirlemişlerdir [35]. Yapılan çalışmada kapasite faktörü değerinin % 50' nin üzerine çıktığı bölgeler bulunmuştur. Ayrıca çalışma kapsamında 2007 yılında ülkemizde yapılan rüzgar enerjisi santrali lisans başvuruları ve bu başvurular için öngörülen kapasite faktörü değerleri incelenmiştir.

Bilir ve diğ., küçük güçlü rüzgar türbinlerinin Ankara için uygunluğunu Weibull dağılımı kullanarak incelemişlerdir [110].

Gerek ülkemiz gerekse de dünyada yapılan çalışmalar için yapılan literatür özetinden de görülebileceği gibi Weibull dağılımı literatürde çok sayıda bölgenin enerji potansiyelinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu nedenle dağılım parametrelerinin belirlenmesi önemlidir ve dağılım parametrelerinin daha iyi bir şekilde belirlenmesi üzerinde çalışmalar devam etmektedir.

Robles ve Rivera yapmış oldukları çalışmada rüzgar enerjisi potansiyeli analizinde Weibull dağılımı parametrelerini belirlemek için en yüksek olabilirlik ve grafik metotlarını kullanmışlardır [111]. İki yöntemle göre yapılan analize göre 10 MW gücünde santralin NPV'nin (net şimdiki değer) 1879450 dolar ile 2849100 dolar olduğu belirlenmiştir. Sonuçlardan da açık olarak görülebileceği gibi ciddi bir ekonomik değerlendirme farkı yani üretim analizinde, buna bağlı olarak yatırımın fizibilite sonuçlarında ciddi belirsizlik vardır.

Buna ek olarak, Okeniyi ve diğ., yapmış oldukları çalışmada farklı yükseklikler için Weibull ve bu dağılımın bir alt dağılımı olan Rayleigh dağılımına göre bir bölgenin enerji üretim analizini yapmış ve aşağıda Çizelge 2.1'de gösterilen sonuçları elde etmişlerdir [112]. Çizelge 2.1'den de görülebileceği gibi enerji üretim tahminleri arasında bazı durumlarda % 40' lara varan farklar oluşabilmektedir. Bu nedenle rüzgar enerjisi potansiyel analizlerinde kullanılacak en uygun dağılım ve en uygun parametre belirleme yönteminin belirlenmesi önemlidir.

Günümüzde rüzgar enerjisi potansiyeli WAsP, Fluent, Wind Pro, MM5, Windplanner, Methodyn, Windographer, WindSim, Wind Farmer, Open Wind, Alvin, Wind Rose, Wind Farm, Homer ve RetScreen gibi programlar ile belirlenebilir. Ayrıca, uydu verilerinin kullanılması ya da istatistiksel yöntemler aracılığıyla da belirlenebilmektedir. Rüzgar enerjisi potansiyelini hesaplamakta kullanılan alan akış

simülasyon yazılımları olan WAsP, Wind Farmer, Open Wind, Wind Farm, Wind Pro, WindSim ile istatistik bazlı yazılım olan Homer, Windographer, Alvin, Wind Rose, Ret Screen gibi birçok ticari yazılım enerji üretim hesaplamalarında Weibull dağılımını kullanmaktadır. Weibull dağılımı kullanılarak bölge için optimum rüzgar türbinlerinin seçilmesi ve bu türbinlerin konumlandırma enerji üretim tahminlerinde hatalara neden olabilmektedir.

Çizelge 2.1 : Weibull ve Rayleigh dağılımına göre üretim karşılaştırması.

Yükseklik (m)	Weibull Enerji Üretimi (kWh)	Rayleigh Enerji Üretimi (kWh)	Mutlak Üretim Farkı (%)
10	303,37	314,55	3,69
30	503,2	658,75	30,91
50	712,22	982,16	37,90
70	943,65	1307,91	38,60
90	1202,89	1641,48	36,46
110	1493,7	1983,69	32,80

Fizibilite çalışmaları ile gerçekleşen sonuçların bir birine yakın olması yatırımcılar için hayati önemlidir, çünkü büyük güçlü rüzgar enerjisi sistemlerinin ilk yatırım maliyetleri çok yüksektir. Diğer bir ifade ile rüzgar enerjisi yatırımlarında en kritik konu bölge için rüzgar karakteristiği ile uyumlu en uygun rüzgar türbini seçimi, bu türbinlerin konumlandırması ve dolayısıyla enerji üretiminin maksimize edilerek enerji maliyetinin minimize edilmesidir.

Dağılım parametrelerinin doğru bir yöntem ile belirlenip enerji üretim tahminlerdeki belirsizlik ile hataların en aza indirilmesi ve bölgeye en uygun rüzgar türbinin belirlenebilmesi için bölgenin rüzgar karakteristiğinin doğru bir şekilde modellenmesi gereklidir.

Literatürde Weibull dağılımının parametrelerini belirlemek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmada, rüzgar verileri kullanılarak yapılan parametre belirleme yöntemleri geliştirme ve karşılaştırma çalışmalarının 1977 yılına kadar uzandığı belirlenmiştir. Bu tezin literatür özeti için seçilen ve literatürde önemli olan 40 çalışmanın tek tek özetlenmesi yerine daha iyi bir şekilde görülebilmesi için bu çalışmaların sonuçları özet olarak aşağıdaki Çizelge 2.2’de gösterilmiştir [69, 113-149]. Çizelge 2.2’de gösterilen çalışmalar literatürde halen sıklıkla kullanılan yöntemlerdir. Çizelge 2.2’den de görülebileceği, neredeyse 40 yıllık bir süredir bu konuda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Enerji kaynaklarında fiyat değişimi olması nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının öneminin arttığı dönemlerde bu çalışmalar hızlanmıştır. Yapılan özet çalışmasında en çok kullanılan

parametre belirleme yöntemleri, GM, MML, JMM, MM, PD, MMLH yöntemlerdir. Çizelgede kırmızı yıldız ile gösterilen sonuçlar hata testine göre en iyi sonucu vermiştir. Parametre belirleme yöntemleri karşılaştırma sonuçlarını içeren Çizelge 2.2 incelendiğinde farklı bölgeler için farklı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Farklı hata testlerine göre en iyi sonuçlar değişmektedir. Yapılan çalışmalarda Kolmogorov-Smirnov (K-S), Anderson Darling (A-D), Root Mean Square Error (RMSE), R^2 , χ^2 , MPE, MSV, MPE, MAPE, güç yoğunluğu tahmini doğruluğu ve enerji üretimi tahmini doğruluğu gibi farklı hata testleri dikkate alınmıştır. Parametre belirleme yöntemlerinin uygunluğunu ve başarısını etkileyen birçok faktör vardır. Bu faktörler, bölge rüzgar karakteristiği, ortalama rüzgar şiddetinin ölçüm süresi, frekans ve kümülatif frekans dağılımlarının şekli, bin boyutu, rüzgar şiddeti verilerinin moment değerleri ile karşılaştırma için kullanılan hata analiz testlerinin seçimi örnek olarak verilebilir.

Dağılım parametrelerinin belirlenmesi konusu hala güncelliğini korumakta ve üzerinde çalışmalar devam etmektedir [150-155]. Weibull dağılımının literatürde birçok bölgede sağlamış olduğu avantajlar nedeni ile sık sık kullanılmasına rağmen, son dönemde yapılan çalışmalarda farklı dağılımlarının birçok bölgede rüzgar karakteristiğini Weibull dağılımından daha iyi temsil edebileceğini göstermiştir. Weibull dağılımı literatürde 30' dan fazla dağılımla karşılaştırılmıştır. Tez kapsamında literatür özetinin devamında rüzgar enerjisi potansiyel analizinde kullanılan standart dağılımlar ile yapılan çalışmalar kısaca özetlenecektir.

Literatürde, Weibull dağılımının en çok karşılaştırıldığı dağılımlardan bir tanesi Rayleigh dağılımıdır. Rayleigh dağılımı Weibull ailesinden bir dağılımdır. Rayleigh dağılımı Weibull dağılımının şekil parametresinin iki alınması ile elde edilen Weibull dağılımının özel bir halidir. Bu karşılaştırmalardan bir tanesi de Kurban ve diğ., tarafından Türkiye'nin batı bölgelerinin rüzgar enerjisi potansiyelini belirlerken kullanılmıştır [156].

Brano ve diğ., İtalya'da dört bölgenin rüzgar şiddeti verilerini yedi dağılım (Weibull, Rayleigh, Log-Normal, Gamma, Inverse Gauss, Pearson ve Burr dağılımları) kullanarak dağılımların rüzgar şiddeti verisini modellemede olan başarısını karşılaştırmışlardır [157]. Hata analizi olarak Kolmogorov-Smirnov testi kullanılmıştır. Yapılan çalışmanın sonuçlarına göre Burr ve Gamma dağılımı iki bölgede en iyi sonucu vermiştir.

Çizelge 2.2 : Weibull dağılımı parametre belirleme yöntemleri karşılaştırması.

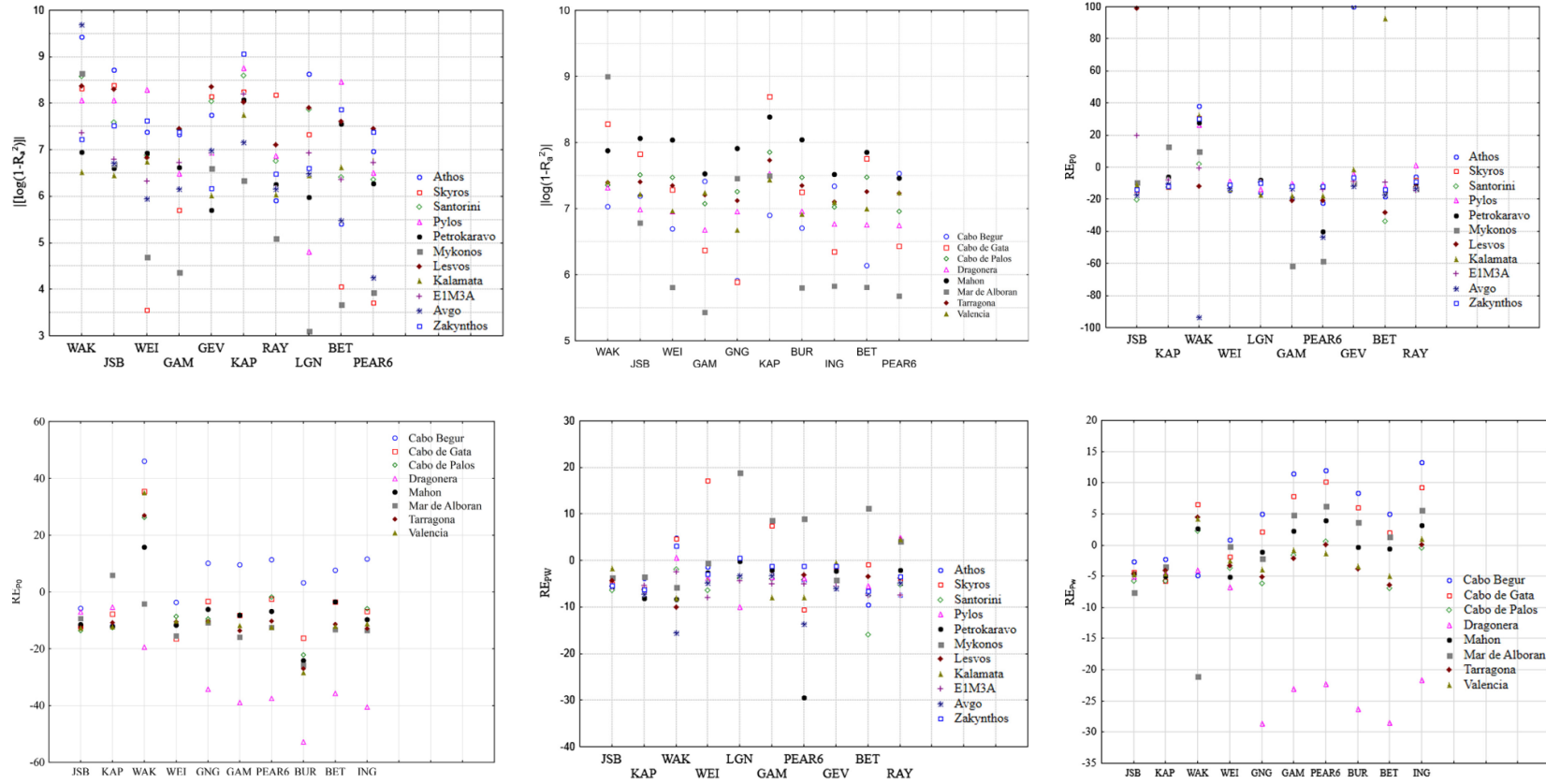
Referans	Yıl	AMLH	GM	CSM	EEM	WGM	MedyanY	JMM	ELM	MeanMax	KTrend	MLH	MMLM	MM	NEPFM	LM	EPF	PM	PD	PDEM	WM	RAPDE	ME
69	1977		*				*	*		*	*												
113	1977		*			*						*											
114	1979		*									*		*			*	*					
115	1984		*									*											
116	1999		*									*	*										
117	1999		*									*		*									
118	2001		*	*										*									
119	2004		*				*					*		*							*		
120	2005		*									*		*									
121	2008		*									*		*									
122	2009		*									*										*	
123	2009		*					*															
124	2010		*					*				*	*	*					*				
125	2010							*													*		
126	2010		*					*															
127	2011	*	*					*															
128	2012		*					*											*				
129	2012							*				*							*				*
130	2012		*									*									*		
131	2012		*					*				*	*						*				
132	2012		*					*				*							*				
133	2012		*									*							*				
134	2012		*		*			*				*	*	*					*				
135	2013							*											*				
136	2013		*									*				*			*				
137	2013		*					*				*	*	*					*				
138	2014		*		*			*				*	*	*					*				
139	2014		*					*				*		*					*	*			
140	2014		*		*			*				*	*	*					*				
141	2014											*		*		*			*				
142	2014							*				*	*						*				
143	2014		*					*				*	*						*				
110	2015		*					*				*		*					*				
144	2015	*	*					*				*	*		*				*		*		
145	2015		*					*				*	*						*				
146	2015		*					*				*	*	*					*				
147	2016		*					*	*			*	*						*				
148	2016		*									*							*		*		
149	2017											*		*			*		*				

Usta ve Kantar, Amasra, Bandırma, Suşehri ve Yunak'ın verilerinin analizinde Weibull, üç parametrelili Weibull ile literatürde ilk defa SGED ve STD dağılımları kullanmıştır [158]. Hata analizi olarak ise R^2 , RMSE, KS, lnL ve AIC testleri kullanılmıştır. Yapılan 20 hata analizi sonucunda 11 defa SGED, altı defa Weibull ve beş defa üç parametrelili Weibull dağılımı en iyi sonucu vermiştir.

Yapılan diğer bir çalışmada ise 24 (Error function, Logistic, Normal, Rayleigh, Erlang, Error, Fatigue Life, Gamma, Gen. Extreme Value, Gen. Logistic, Gen. Pareto, Inv. Gaussian, Log-Logistic, Lognormal, Log-Pearson 3, Weibull, Pearson 5, Beta, Burr, Gen. Gamma, Johnson SB, Pearson 6, Kappa ve Wakeby) dağılımı kullanarak Yunanistan ve İspanya'da denizde ölçülen altı bölgenin verilerini analiz etmişleridir [159].

Benzer şekilde denizlerde yapılan başka bir çalışmada ise 19 deniz ölçüm istasyonunun verisi analiz edilmiştir [160]. Yapılan analiz sonucunda, Johnson, KAP, WAK, Weibull, Lognormal, Gamma, Pearson, GEV, BET ve Rayleigh dağılımlarının daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiş ve ayrıntılı olarak bu dağılımlar incelenmiştir. Hata analizi olarak dört farklı yöntem seçilmiştir. Kümülatif dağılımlar arasında olan fark, R^2 analizinin yeni bir şekli ile yapılan analiz, güç yoğunluğu tahmini ile yapılan analiz ve 660 kW gücünde bir rüzgar türbininin enerji üretiminin hesaplanması ile enerji üretimde bir hata analizi yapılmıştır. Hata analizi değerlendirmesi Yunanistan ve İspanya bölgeleri için ayrı ayrı değerlendirilmiş ve sonuçlar Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiği zaman, diğer çalışmalara benzer olarak bütün hata analizlerinde en iyi sonucu veren tek bir dağılım olmadığı belirlenmiştir. Farklı dağılımlar kullanılması sonucunda oluşan güç yoğunluğu tahmin hatalarının % 90'lar seviyesine, enerji üretim tahmin hatalarının ise % 30 'lar seviyesine çıktığı görülmüştür.

Usta ve Kantar yapmış oldukları çalışmada, Burr, Weibull ve Rayleigh dağılımlarını karşılaştırmışlardır [161]. Karşılaştırma için R^2 , RMSE ve χ^2 hata analizleri kullanılmıştır. Çalışma verisi olarak Aliğa' da Temmuz ayında 10 ve 30 metrede ölçülen veriler kullanılmıştır. Sonuç olarak Burr dağılımının alternatif olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.



Şekil 2.1 : Hata analizi sonuçları.

Wu ve diğ., Weibull, Logistic ve Log-Normal dağılımlarını Çin'de ölçülen rüzgar verileri ile dört farklı hata analizini dikkate alarak karşılaştırmıştır [162]. Karşılaştırma aylık ve yıllık veriler için yapılmıştır. Sonuç olarak, Weibull dağılımının iyi sonuçlar vermesine rağmen analiz edilen bütün verilerde en iyi sonucu vermediği belirlenmiştir.

Safari, dört bölgede ölçüm verilerini kullanarak Weibull, Rayleigh, Normal, Log-Normal ve Gamma dağılımlarını karşılaştırmıştır [163]. Karşılaştırmada Weibull dağılımı parametre belirlemede iki yöntem kullanılmış ve iki farklı hata analizi dikkate alınmıştır. Gamma dağılımı iyi sonuçlar verse de bütün durumlar için en iyi sonucu veren tek dağılım bulunamamıştır.

Ayodele ve diğ., Güney Afrika'da 10 bölgede ölçülen rüzgar verisini kullanarak Weibull, Rayleigh ve Log-Normal dağılımlarını karşılaştırmıştır [164]. Karşılaştırma sonucunda Weibull dağılımı bütün durumlarda en iyi sonucu vermiştir.

Qin ve diğ., Çin'de 10 ölçüm bölgesinde ölçülen verilerin analizinde 10 dağılım ile Kernel yöntemi ve dört hata analizi kullanarak yapmışlardır [165]. Kullanılan dağılımlar; Weibull, 3 parametrelili Weibull, Rayleigh, Log-Normal, Inverse Gauss, Gamma, Inverse Gamma, Erlang, Gumbel-Maximum ve Burr dağılımlarıdır. Yapılan çalışma sonucunda Kernel yöntemi büyük başarı gösterse de bütün bölgelerde en iyi sonucu vermemiştir.

Auwerwa ve diğ., Belçika'da üç bölgeye ait dört rüzgar veri setini Eksponansiyel, Log-Normal, Rayleigh, Chi, Gamma, Weibull ve 3 parametrelili Weibull dağılımı karşılaştırmıştır [166]. Karşılaştırmada χ^2 ile RMSE hata analizleri dikkate alınmıştır. Çalışmanın sonucunda bir veri seti için Weibull dağılımının diğer üç veri seti için ise 3 parametrelili Weibull dağılımının daha uygun olduğu belirtilmiştir.

Garcia ve diğ., İspanya için en uygun dağılımı bulmak amacıyla Weibull dağılımı ve Log-Normal dağılımını 20 rüzgar şiddeti ölçüm bölgesi verilerini kullanarak karşılaştırmıştır [167]. Dağılımların uygunluğunu değerlendirme kriteri olarak R^2 testi kullanılmıştır. Yapılan çalışmada düşük ortalama rüzgar şiddeti olan bir bölgede Log-Normal dağılımının diğer 19 bölgede ise Weibull dağılımının daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir.

Tar yapmış olduğu çalışmada, Macaristan'da yedi bölgenin rüzgar karakteristiğini Weibull, Rayleigh, Normal, Log-Normal, Sq-root Normal ve Gamma dağılımları

kullanarak analiz etmiştir [168]. Çalışmada χ^2 testi dağılımların uygunluğunun değerlendirilmesi için seçilmiştir. Uygunluk testi için belirlenen uygunluk değerine Weibull, Normal ve Log-Normal dağılımının altı bölgede, Sq-root Normal ve Gamma dağılımlarının ise yedi bölgede uygun olduğu belirlenmiştir. Rayleigh dağılımının ise hiçbir bölge için uygun olmadığı belirlenmiştir.

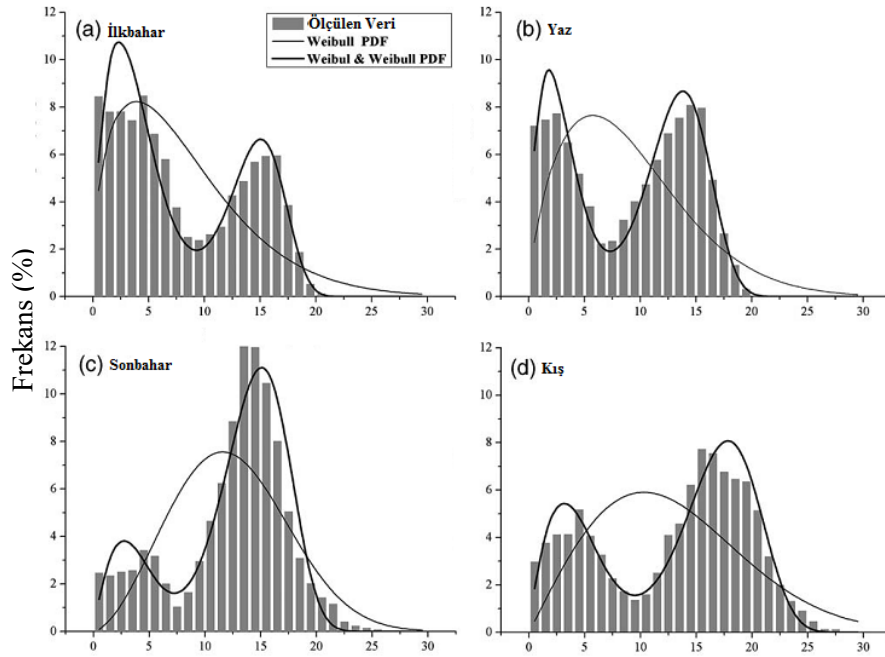
Carta ve diğ., Kanarya adalarında dört ölçüm bölgesi için yapmış oldukları çalışmada 12 dağılım kullanmışlardır [169]. Dağılımların parametreleri MM, MML ve LSM parametre belirleme yöntemleri ile belirlenmiştir. Değerlendirme kriteri olarak R^2 hata analiz yöntemi seçilmiş ve rüzgar şiddeti ile güç yoğunluğunu için hata analizi yapılmıştır. Dağılım parametre belirleme yöntemlerinin önemini ortaya koymuşlardır. Yapılan çalışmada Weibull dağılımının birçok avantajı olmasına rağmen bütün bölgelerde kullanılamayacağı belirtilmiştir.

Masseran ve diğ., Malezya rüzgar atlasını oluşturmak için 67 bölgeden alınan verileri Weibull, Burr, Gamma, Inverse Gamma, Inverse Gauss, Ekspansiyel, Rayleigh, Log-Normal ve Erlang dağılımları kullanılmıştır [170]. Uygunluk testi olarak ise Kolmogorov-Smirnov, Akaike İnfomasyon Kriteri, Bayes İnfomasyon Kriteri belirlenmiş ve buna ek olarak seçilen dağılımların R^2 değerleri incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda; Kolmogorov-Smirnov testi ile yapılan analiz sonuçlarına göre Gamma dağılımı 29, Burr dağılımı 16, Weibull dağılımı 9, Erlang dağılımı 6, Inverse Gauss dağılımı 5 ve Rayleigh dağılımı 2 bölgede en iyi sonucu vermiştir. Akeike İnfomasyon Kriterine göre ise Gamma dağılımı 49, Weibull dağılımı 7, Burr ile İnfomasyon Kriterine göre ise Gamma dağılımı 49, Weibull dağılımı 9, Inverse Gauss 5 ve Burr dağılımı 4 bölge için en iyi sonucu vermiştir. Daha önceden de belirtildiği ve bu çalışmaların sonucunda da görülebileceği gibi seçilen hata testine göre en uygun dağılım değişebilmektedir. Buna ek olarak parametre belirleme yöntemi de en uygun dağılımı etkilemektedir.

Weibull dağılımının literatürde birçok bölgede sağlamış olduğu avantajlar nedeni ile sık sık kullanılmasına rağmen son dönemde yapılan çalışmalarda farklı dağılımlarının birçok bölgede rüzgar karakteristiğini Weibull dağılımından daha iyi temsil edebileceğini göstermiştir. Genel olarak iki tepeli frekans dağılımına sahip olan bölgelerde karışım dağılım modellerinin kullanılması çok daha iyi sonuç vermektedir. Kullanılan farklı dağılımlar ile verilen literatür özetinden de

görülebileceği gibi bütün bölgelerde en iyi sonucu veren bir dağılım mevcut değildir. Parametre belirleme yöntemleri başarısında olduğu gibi birçok kriter dağılımın başarılarında etkilidir. Bu nedenle literatürde karışım dağılımlar üzerinde çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Karışım dağılımları ağırlık katsayıları ile iki veya daha fazla dağılımın birleşmesinden oluşan dağılımlardır. Tez çalışmasının devamında literatür özeti olarak karışım dağılımlarının rüzgar enerjisi analizinde kullanılması ile ilgili yapılan çalışmalar analiz edilerek özetlenecektir.

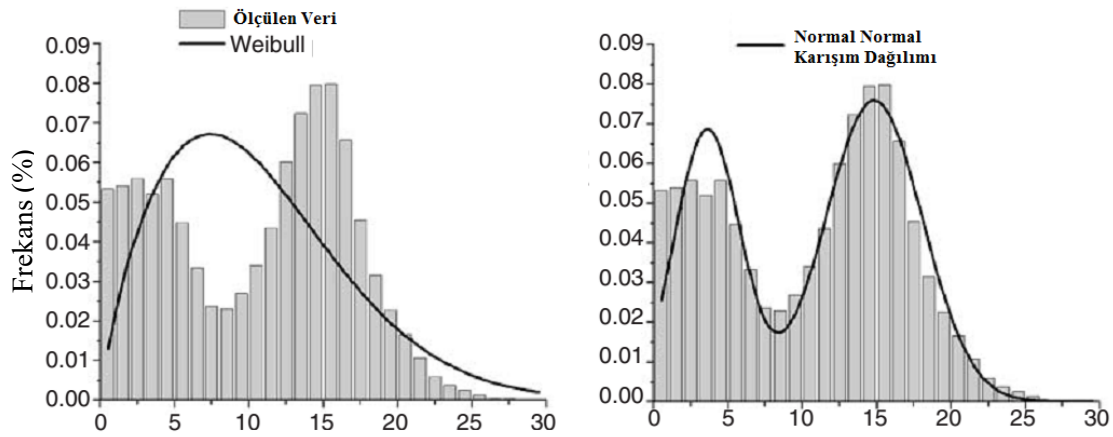
Literatürde rüzgar enerjisi potansiyel analizinde karışım dağılımları kullanılarak yapılan ilk çalışma Jaramillo ve Borja tarafından yapılmıştır. Jaramillo ve Borja yapmış oldukları çalışmada, Meksika’da bulunan La Ventesa şehrinin rüzgar enerjisi potansiyelini incelerken Weibull&Weibull karışım (MWblWbl) ve Weibull dağılımlarını kullanmışlardır. Dağılımların uygunluklarını görsel olarak karşılaştırmışlar ve mevsimsel dağılımların görsel sonuçları Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Mevsimsel rüzgar şiddeti frekans dağılımı.

Karışım dağılımları kullanarak yapmış oldukları enerji analizinde Weibull&Weibull ve Weibull dağılımları ile belirlenen kapasite faktörleri sırası ile % 58 ve % 51 olarak hesaplanmış ve bu kapasite faktörü farkının enerji üretim maliyeti üzerinde olan etkisi değerlendirilmiştir. Çalışmada sonuç olarak, MWblWbl dağılımının kullanılmasının daha uygun olduğu belirtilmiştir. Jaramillo ve Borja tarafından

yapılan diğ er bir çalışmada [171] rüzgar enerjisi analizinde karışım dağılımlarının ticari paket programlarında kullanılmadığı ve bunun da enerji  etimi ile ekonomik analiz sonuçlarında hatalara neden olduğı belirtilmiştir. Bunu göstermek için yapılan çalışmada, rüzgar enerjisi programlarında sıklıkla kullanılan Weibull dağılımı ile Normal&Normal karışım dağılımı (MNrmNrm) karşılaştırılmıştır. Dağılımların uygunluğı görsel olarak karşılaştırılmış ve veri setinin histogramı ile frekans dağılımları şekil 2.3'de gösterilmiştir. Enerji  retim karşılaştırmasında 225 kW gücünde bir rüzgar türbini kullanılmıştır. Weibull dağılımına göre hesaplanan kapasite faktörü % 52, Normal&Normal karışım dağılımına göre hesaplanan kapasite faktörü ise % 58,3 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, iki farklı enflasyon oranına göre enerji üretim farkının enerji maliyetine olan etkisi incelenmiştir.



şekil 2.3 : Weibull ve normal&normal karışım dağılımı.

Chang yapmış olduğı çalışmada, Tayvan'da üç bölgede            rüzgar verilerini Weibull, Gamma&Weibull (MGamWbl) karışım dağılımı, Normal&Normal (MNrmNrm) karışım dağılımı, Normal&Weibull (MNrmWbl) karışım dağılımı, Weibull&Weibull karışım dağılımı ve MEP dağılımları ile karşılaştırmıştır [173]. Hata analizi olarak Kolmogorov-Smirnov, RMSE, χ^2 ve g   yoğunluğı tahmin doğruluğı testlerini kullanmıştır. Rüzgar şiddeti frekans dağılımı için yapılan analizde, MGamWbl beş defa, MEP beş defa ve MWblWbl iki defa en iyi dağılım olmuştur. Tek bir bölgede bütün hata kriterlerine göre en iyi dağılım bulunmamaktadır.

Literatürde rüzgar şiddeti dağılımları en geniş çapta okyanusta bulunan 178 rüzgar     m istasyonunda incelenmiştir [174]. Bu istasyonlardan alınan veri seti 1 ay ile 20

yıl arasında değişmektedir ve rüzgar şiddeti ölçümleri 10 dakikalık verilerdir. Bu çalışmada kullanılan dağılımlar; Rayleigh, Weibull, Genelleştirilmiş Rayleigh, 3 parametrelili Weibull, Lognormal, 3 parametrelili Lognormal, Gamma, Pearson Type 3, Genelleştirilmiş Gamma, Kappa, Wakeby ve Weibull&Weibull karışım modeli dağılımlarıdır. Çalışmanın sonucunda Weibull&Weibull, Kappa ve Wakeby dağılımları diğerlerinden daha iyi sonuçlar vermiştir, ayrıca R^2 değeri en iyi çıkan dağılım Weibull&Weibull karışım modelidir. Çalışmada buna ek olarak 660 kW gücünde bir rüzgar türbininin enerji üretimi zaman serisi ve dağılımlar ile belirlenmiş ve iki farklı hata analizine göre değerlendirme yapılmıştır. Fakat 660 kW gücünde olan bir rüzgar türbininin türbin göbek yüksekliğinin 10 metre olmayacağı dikkate alınmamıştır. Çalışmanın sonucuna göre Weibull&Weibull dağılımı Weibull dağılımından iyi enerji üretim sonuçları verse de en iyi dağılım olarak çıkmamıştır.

Qin ve diğ., yapmış oldukları çalışmada Weibull dağılımı, 3 parametrelili Weibull dağılımı, MWblWbl dağılımı ile 3 parametrelili Weibull karışım dağılımlarını (MWbl3Wbl3) kullanmıştır [175]. Analizlerinde Çin' de ölçülen dört bölgenin rüzgar verisi kullanılmıştır. Hata analizi olarak ise dört farklı yöntem kullanılmış sonuç olarak MWbl3Wbl3 dağılım ile bütün bölgelerde en iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Diğer bir çalışmada [176], Rayleigh, Lognormal, Weibull, 3 parametrelili Weibull ve Weibull&Weibull karışım modeli kullanılmıştır. Rüzgar verileri Edinburg Napier Üniversitesinde dört saniye aralıklarla kayıt edilen 18 aylık rüzgar şiddeti verileridir. Analiz sonucunda Weibull&Weibull karışım modelin en iyi sonuçları verdiği belirlenmiştir. Lognormal dağılımının Weibull dağılımına alternatif olarak kullanılabileceği belirtilmektedir.

Jeromel ve diğ., Adriatic denizinde deniz meltemleri ve Bora rüzgarlarının etkili olduğu üç ölçüm noktasının verilerini Weibull, 3 parametrelili Weibull, Weibull&Weibull ve 3 parametrelili Weibull&Weibull karışım dağılımları ile incelemiştir [177]. Çalışmada iki durumda Weibull&Weibull ve parametrelili Weibull&Weibull karışım dağılımları aynı sonucu vermiş. bir durumda ise 3 parametrelili Weibull&Weibull karışım dağılımı virgülden sonra dördüncü hanede daha iyi sonuç vermiştir.

Akdağ ve diğ., tarafından yapılan çalışmada ise Weibull ve Weibull&Weibull dağılımları Ege denizinde bulunan 9 ölçüm istasyonu için karşılaştırılmıştır [178].

Çalışmada en kötü durumda bile Weibull&Weibull dağılımının Weibull dağılımı ile aynı sonuçları vermiştir. Bu nedenle karışım dağılımının kullanılması tavsiye edilmektedir.

Carta ve Ramirez tarafından yapılan bir başka çalışma ise Kanarya adalarında bulunan 16 rüzgar istasyonunun verileri Weibull, Kesik Normal dağılım, Tek taraftan kesilmiş normal dağılım Weibull dağılımı karışım modeli (MTndWbl) ve Weibull&Weibull dağılımları kullanılarak incelenmiştir [179]. Çalışmada hata analizi olarak R^2 ve güç yoğunluğu tahminleri arasında olan fark dikkate alınmıştır. R^2 analizi sonuçlarına göre 12 bölgede MTndWbl, dört bölgede ise MWblWbl daha iyi sonuç vermiştir. Güç yoğunluğu hata analizi sonuçlarına göre ise 10 bölgede MTndWbl, altı bölgede MWblWbl ve iki bölgede Weibull dağılımı daha iyi sonuç vermiştir. Buna ek olarak ortalama mutlak güç yoğunluğu hata değerleri Weibull dağılımı için % 10,59. MTndWbl için % 1,82 ve MWblWbl için % 1,67 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak Tek taraftan kesilmiş normal dağılım Weibull dağılımı karışım modelinin en iyi sonuçları verdiği bunu Weibull&Weibull modelinin takip ettiği belirtilmektedir ama iki dağılım arasındaki fark R^2 hata analizlerinde genelde virgülden sonra üçüncü haneden sonra oluşmaktadır. Ayrıca Weibull&Weibull modelinin parametrelerinin belirlenmesinin daha kısa zaman aldığı belirtilmektedir. Carta ve Ramirez yapmış oldukları bir diğer çalışmada, Weibull&Weibull dağılımının parametre belirleme yöntemlerini karşılaştırmışlardır [180]. Çalışmada veri seti olarak İspanya'da 10 metre yükseklikte ölçülen dört farklı bölgenin verisi kullanılmıştır. Çalışmada MM, MLH ve LS yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmada, parametre belirleme yöntemleri arasında önemli farklar bulunmasa da LS yöntemi rüzgar şiddeti frekans dağılımı için bütün bölgelerde en iyi sonucu vermiştir. Hata analizi olarak, SSE, R^2 , DOF, MSE ve RMSE hata analiz yöntemleri kullanılmıştır. Aynı çalışmanın devamı olarak Carta ve diğ., tarafından yapılan bir diğer çalışma ise MWblWbl ve MTndWbl dağılımları ile birlikte 12 dağılım kullanılmıştır [169]. Dağılım parametreleri MM, MLH, LS yöntemlerine göre belirlenmiş, parametre belirleme yöntemlerin hata analizi sonucuna olan etkisi gösterilmiştir. Her iki karışım dağılımında da rüzgar şiddeti frekans dağılımında en iyi yöntem LS olmuştur ve R^2 değerleri 0,99' un üzerindedir. Aynı çalışmanın devamı olarak Carta ve diğ., tarafından yapılan bir diğer çalışma ise kullanılan dağılımların enerji üretim tahminine etkisini incelemektedir [181]. Bu amaçla 16 istasyonun verileri 14 farklı

dağılım uygulanarak kullanılmıştır. Rüzgar türbini olarak 330 ve 800 kW gücünde iki türbin seçilmiştir. Sonuç olarak enerji üretim tahminleri türbin tipine bağlı olarak değişmekle birlikte bazı durumlarda hataların % 45'lerin üzerine çıktığı tespit edilmiştir. Carta ve Ramirez'in [179] yapmış olduğu çalışmada belirlediği dağılım parametreleri kullanılarak, Vicente'nin [182] yapmış olduğu çalışmada W, MTndWbl ve WblWbl dağılımları kullanılarak 330 kW ile 2 MW arasında 30 türbin için enerji üretim karşılaştırması yapılmıştır. Enerji üretim analizi sonucu karışım dağılımları kullanılarak güç yoğunluğunda elde edilen yüksek başarı enerji üretimi için yapılan analizde etkisini yitirmiştir. Yani, Weibull dağılımı enerji üretiminde güç yoğunluğu tahminine göre daha az hata sonuçları vermiştir.

Kollu ve diğ., rüzgar enerjisi modellemesinde kullanılan Weibull&Weibull, Gamma&Weibull, Normal&Weibull ve Normal&Normal karışım dağılımların başka Weibull&Generalized Extreme Value dağılımı, Weibull&Lognormal dağılımı, Generalized Extreme Value&Lognormal dağılımları ilk defa rüzgar enerjisi modellemesinde kullanmışlardır [183]. Standart dağılım olarak ise Weibull, Gamma, Lognormal ve Gen. Extreme Value dağılımları kullanılmıştır. Çalışmada dört istasyonda ölçülen rüzgar şiddeti verileri modellenmiştir. Çalışmada Weibull, Lognormal ve Gamma dağılımların modellemede yetersiz kaldığı ve önerilen karışım dağılımlarının bazı bölgelerde modellemede olan başarıyı artırdığı belirlenmiştir.

Rajapaksha ve Perara, Weibull, Log-Normal, Gamma, Weibull&Weibull, Log-Normal&Weibull (MLgnWbl) ve Gamma&Weibull dağılımlarını Sri Lanka'da yapılan ölçüm verilerini kullanarak karşılaştırmışlardır [184]. Karşılaştırmada R^2 , RMSE ve K-S testleri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında MWblWbl dağılımının bütün hata analizleri için en iyi sonucu verdiği ve MWblWbl ile enerji üretim tahmin hatalarının azaltılabileceği belirlenmiştir.

Akpınar ve Akpınar yapmış oldukları çalışmada, Elazığ'da dört bölgede ölçülen veriler MTndWbl, MWblWbl, Weibull, MEP dağılımları karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma rüzgar şiddeti ve güç yoğunluğu dağılımı için yapılmıştır [185]. MTndWbl karışım dağılımı üç hata analizine göre bütün ölçüm noktaları için en iyi sonucu vermiştir. MTndWbl ile MWblWbl dağılımları aralarında olan farklar ise çok azdır. Çalışmada MWblWbl dağılımının da alternatif olarak kullanılabileceği belirtilmiştir.

Weibull dağılımı bütün rüzgar karakteristiklerini yeterince iyi bir şekilde temsil edebilecek bir yaklaşım değildir. Buna rağmen çok sayıda ticari rüzgar enerjisi programı, analizleri sırasında Weibull dağılımını esas almaktadır. Bunun sonucunda da enerji tahminlerinde hatalar meydana gelmektedir. Bu nedenle farklı dağılımlar kullanarak rüzgar frekans dağılımını modelleme çalışmaları devam etmektedir. Frekans dağılımların doğru bir şekilde modellenmesi ile bölge için en uygun rüzgar türbini seçimi daha doğru bir şekilde yapılabilecektir. Ayrıca tarımdan, inşaata, köprülerden, hava alanı konumlandırmasına kadar birçok alan ve konu için bu modellemelerin doğru olması önemlidir.

Literatürde, Weibull dağılımına alternatif olarak önerilen dağılımlardan bir tanesi de Maximum Entropi Dağılımları (MEP) ya da diğer bilinen ismiyle Entropi Optimizasyon dağılımlarıdır [186]. Karışım dağılımları ile ilgili olan literatür özetinde biraz değinilmiş olsa da, bu dağılımın gerek yeni olması gerekse de iyi performans sağlaması nedeni ile bu dağılım kullanılarak yapılan çalışmaların özeti literatür özeti çalışmasının devamında sunulacaktır.

Literatürde son zamanlarda kullanılan dağılımlardan biri de entropi optimizasyon dağılımlarıdır. İstatistikte çeşitli veri setleri Maksimum Entropi ve MinxEnt metotları, bir başka deyişle entropi optimizasyon metotları yardımıyla incelenmiştir. Özellikle Maksimum Entropi ve MinxEnt dağılımlarıyla ilgili çalışmalar mevcuttur. Bu dağılımların rüzgar enerjisi konusunda uygulanması ilk olarak Li ve Li tarafından yapılmıştır [187-190]. Li ve Li yapmış oldukları çalışmada dağılımın parametrelerini korunum yasalarına göre belirlenmesi gerektiğini belirtmiş ve Newton Rapson metodu üzerinde çalışmıştır. [187]. Yazarlar tarafından yapılan başka bir çalışmada ise Maksimum Entropi dağılımı, Weibull dağılımı ile karşılaştırılmıştır [188]. Maksimum Entropi dağılımında parametre belirlemek için kullanılan kısıtlar ise kütlenin korunumu, momentumun korunumu ve enerjinin korunumu yasalarından gelmektedir. Çalışma sonucunda Maksimum Entropi dağılımının rüzgar frekans dağılımını modellemede Weibull dağılımından daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Buna karşılık Maksimum Entropi dağılımları bütün durumlarda en iyi sonucu vermemiştir. Li ve Li tarafından yapılan bir diğer çalışmada [189] Kanada Waterloo bölgesinde 5 yıllık ölçülen rüzgar verileri Maksimum Entropi dağılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Li ve Li tarafından yapılan bir başka çalışmada ise bu

dağılımın parametrelerini belirlemek için bir başka katsayı eklenerek MEP dağılımının bir başka versiyonu geliştirilmiştir.

Zhang ve diğ., MEP4, MEP5 ve Weibull dağılımını karşılaştırmışlardır. MEP dağılımlarının modellemede daha başarılı olduğunu ifade etmişlerdir [191].

Akpınar ve Akpınar yapmış oldukları çalışmada, Elazığ ve üç ilçesinin sekiz yıllık rüzgar verilerini incelerken Maksimum Entropi dağılımı ve Weibull dağılımını kullanmıştır. Kısıt olarak Li ve Li [188] tarafından kullanılan kısıtlar seçilmiştir. Çalışmada Li ve Li [188] ile aynı sonuçlara ulaşılmıştır. Bu çalışmanın bir ileriki aşaması olarak Weibull&Weibull, Tek taraftan kesilmiş normal dağılım Weibull modeli çalışmaya eklenmiştir [192]. Analiz sonucunda Tek taraftan kesilmiş normal dağılım Weibull modelinin en iyi sonuçları vermiş olduğu belirlenmiştir.

Shamilov, Kantar ve Usta [193] çalışmasında rüzgar şiddetinin dağılımının modellenmesinde MinMaxEnt dağılımlarını, Weibull dağılımı ile dört hata analizini dikkate alarak karşılaştırmışlardır. Çalışmada MinMaxEnt dağılımlarının daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışmalarında rüzgar gücü tahminlerinin belirlenen MinMaxEnt dağılımları kullanılarak, daha az hatayla tahmin edilebileceğini göstermişlerdir. Kantar ve Usta yapmış oldukları çalışmada Weibull dağılımı ile entropi dağılımlarını literatürde olan verileri kullanarak üç hata yöntemi kullanılarak farklı kısıt sayısını dikkate alarak karşılaştırmışlardır [194].

Liu ve Chang Tayvanda dört istasyon verilerini modellemek için Weibull ve MEP dağılımları kullanmışlardır [195]. Çalışmada kullanılan kısıt sayısının modellemenin başarısı üzerine etkisi de incelenmiştir. Hata analizi olarak χ^2 , RMSE ve K-S hata analizleri dikkate alınmıştır. Çalışmada MEP dağılımlarının parametrelerini belirlemek için kullanılan kısıt sayısının her zaman dağılımın başarısını artırmadığı belirlenmiş ve dört kısıtlı MEP dağılımının kullanılması tavsiye edilmiştir.

Amar ve Elamouri ise Tunus'da ölçülen yedi rüzgar veri setini Weibull, dört ve beş kısıtlı MEP dağılımları ile analiz etmişlerdir [196]. Çalışmada, Liu ve Chang tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarından farklı olarak beş kısıtlı MEP dağılımının başarıyı önemli derecede artırabileceği belirlenmiştir.

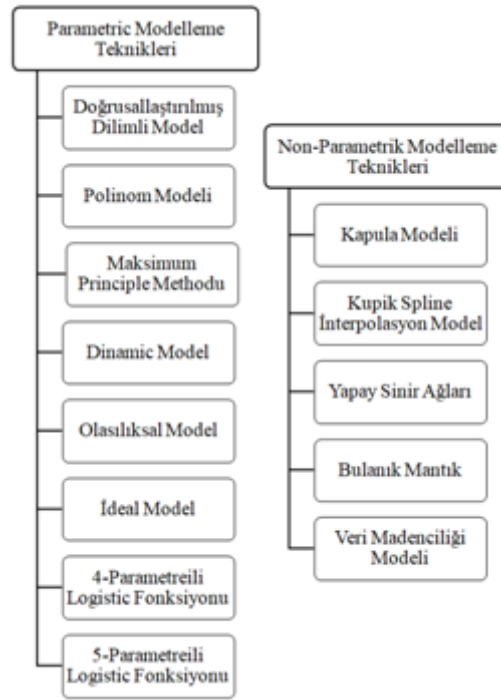
Chellali ve diğ., Li ve Li tarafından modifiye edilen MEP dağılımına, kullanılan kısıt sayısının etkisi incelemiş ve kısıt sayısını artırmanın her zaman daha olumlu sonuç vermediği yani hata oranını azaltmadığı sonucuna varmışlardır [197].

Dağılımlar konusunda yapılan literatür özetinde gösterildiği gibi dağılımın ve dağılım parametrelerinin belirlenme yönteminin seçilmesi enerji üretim tahminin doğruluğunu etkilemektedir. Enerji üretime etki eden faktörlerden bir tanesi de rüzgar türbinin güç eğrisinin modellenmesidir. Rüzgar türbini güç eğrisi, rüzgar şiddetlerine karşılık rüzgar türbinin çıktı gücünü gösteren eğridir. Rüzgar türbinin birim zaman enerji üretimi, rüzgar şiddeti dağılım fonksiyonu ile türbin güç eğrisinin, türbin çalışma noktaları arasında integrali ile hesaplanabilir. Rüzgar türbinin güç eğrisi literatürde çeşitli şekillerde modellenmiştir. Çalışmanın devamında literatür özeti olarak bu çalışmaların özetleri verilecektir.

Literatürde rüzgar türbinlerinin güç eğrileri için çeşitli modeller kullanılmıştır [198] fakat bu çalışmaların çoğunda kullanılan modelleme tekniğinin gerçek türbin güç eğrisi ile uygunluğu analiz edilmemiştir. Rüzgar türbinin güç eğrisinin şekli, türbin gücüne ve tipine göre değişkenlik göstermektedir. Literatürde rüzgar türbinleri çeşitli fonksiyonlarla modellenebilmektedir. Bu konuda Akdağ ve Güler tarafından yapılmış bir çalışma bulunmaktadır [198]. Çalışmada literatürde bulunan yedi modelleme fonksiyonu altı rüzgar türbini için uygulanmış ve bu fonksiyonlara göre belirlenen enerji üretim değerleri ile WAsP programı ile belirlenen enerji üretimleri karşılaştırılmıştır.

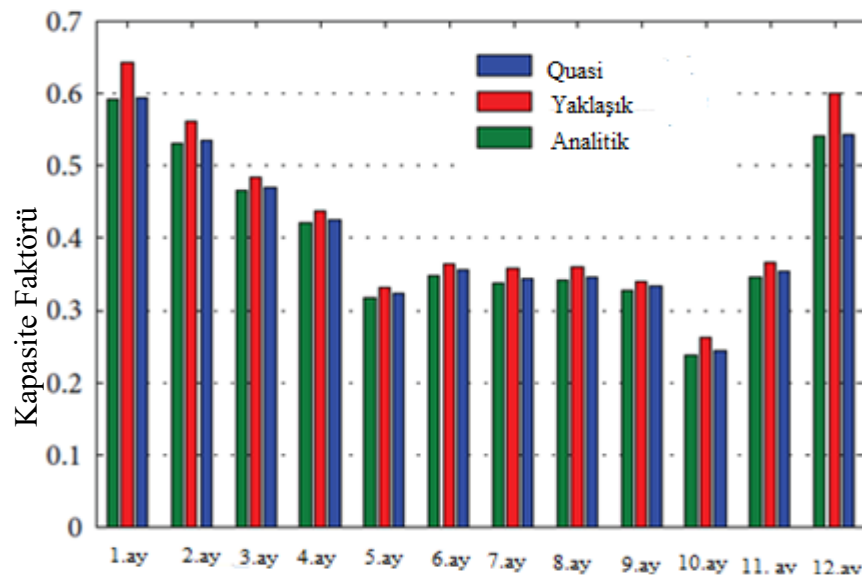
Thapar ve diğ., yapmış oldukları çalışmada, 260, 300 ve 335 kW gücünde üç rüzgar türbininin enerji üretimini beş modelleme tekniği ile belirlemiş ve referans aldığı modelleme tekniğinden sapmaları değerlendirmiştir [199]. Çalışmada kullanılan modelleme tekniklerinden bir tanesi de Homer isimli hibrit enerji sistemleri optimizasyon yazılımı tarafından kullanılmakta olan tekniktir. Sonuç olarak Homer ile elde edilen üretimin referans modele göre olan üretime çok yakın olduğu belirlenmiştir.

Carrillo ve diğ., ise 225 kW ile 7500 kW arasında güçleri değişen yaklaşık 200 rüzgar türbini dört farklı yöntemle modellenmiştir. Çalışmada kullanılan modellerin doğruluğu R^2 analizi ve enerji üretim hatalarına göre incelenmiştir [200]. Lydia ve diğ., rüzgar türbini güç eğrisi modelleme teknikleri ile ilgili literatürde yapılan çalışmaları ve modelleme tekniklerini özetleyen bir çalışma yapmışlardır [201]. Bu çalışmaya göre rüzgar türbini güç eğrileri modelleme tekniklerinin iki parça halinde incelenebileceği belirlenmiştir. Şekil 2.4’de modelleme tekniklerini ve bunların alt başlıklarını göstermektedir.



Şekil 2.4 : Rüzgar türbini güç eğrisi modelleme teknikleri.

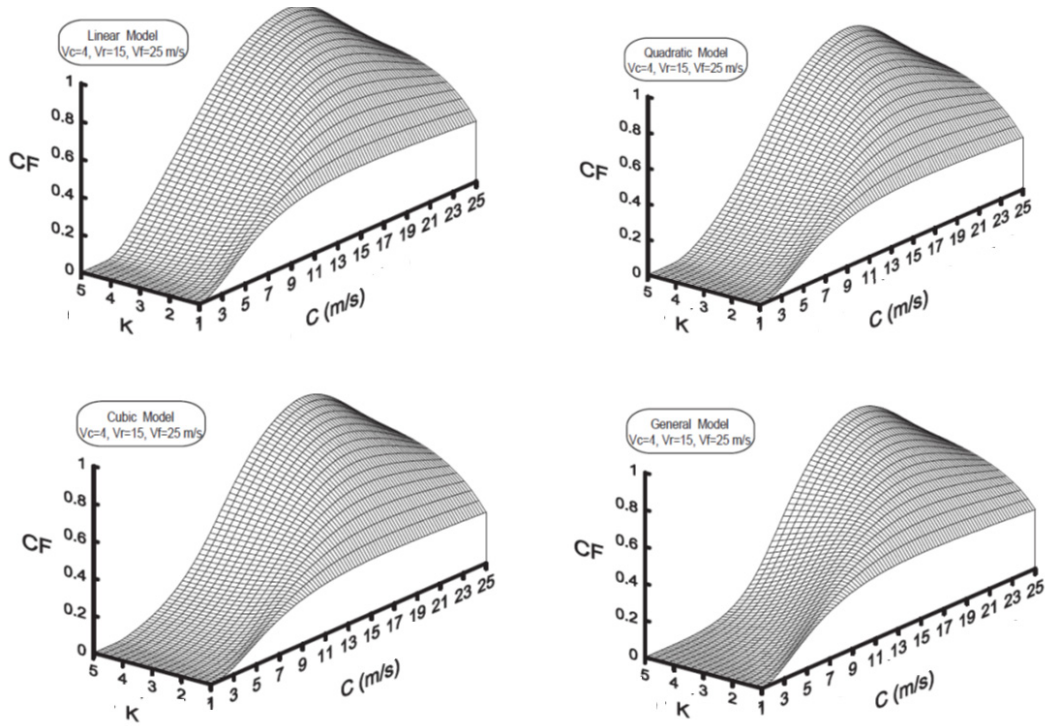
Ditkovich ve Kuperman, rüzgar türbinin güç eğrisini modellemek için üç yöntem kullanmış ve bu yöntemlerin enerji üretim tahminine etkisini incelemişlerdir [202]. Şekil 2.5’de aylık bazda enerji üretim sonuçları gösterilmektedir. Şekil 2.5’den de görülebileceği gibi bazı aylarda modeller arasında % 10 civarı kapasite faktörü tahmini farkı oluşabilmektedir, bu durum yatırımcı için ciddi bir risk oluşturmaktadır.



Şekil 2.5 : Güç eğrisi modelleme tekniklerine göre kapasite faktörleri.

Chang ve diğ., yapmış oldukları çalışmada Weibull şekil ve ölçek parametreleri değişimini dikkate alarak farklı rüzgar türbini güç eğrisi modellerini karşılaştırmışlardır [203]. Yapılan çalışmada türbin güç eğrilerini modellemek için dört farklı modelleme tekniği kullanılmıştır. Yapılan çalışmanın amaçlarında bir tanesi de rüzgar türbininin optimum üretimi yaptığı ölçek parametresinin belirlenmesidir. Bunun için şekil ve ölçek parametrelerine göre modelleme teknikleri dikkate alınıp kapasite faktörü eğrileri elde edilmiştir. Şekil 2.6’da bu eğrileri göstermektedir.

Şekil 2.6’dan da görülebileceği gibi aynı şekil parametresi için en büyük kapasite faktörünü veren ölçek parametresi değeri aynı değildir. Bu çalışma aynı zamanda optimum rüzgar türbini seçiminin türbin güç eğrisi ve Weibull parametrelerine olan etkisi açısından da önemlidir. Yani ölçek parametresinin artması bütün durumlarda kapasite faktörünü her zaman artırmamaktadır. Optimum noktada bir ölçek parametresi vardır. Bu parametre türbin eğrisine bağlıdır.



Şekil 2.6 : Türbini güç eğrisi modelleme tekniklerine göre kapasite faktörleri.

Astane ve diğ., yapmış oldukları çalışmada 14 rüzgar türbinini üç farklı güç eğrisi modelleme tekniğine göre modellemişlerdir. Yapılan çalışmada polinom modelleme tekniği güç eğrisi modellemesinde daha iyi olması nedeni ile referans alınmış ve diğer modelleme teknikleri kullanılması durumunda oluşacak enerji üretim hataları

incelenmiştir [204]. Lineer model kullanılması durumunda enerji üretim tahmin hatalarının % 78'lere, quattric model kullanılması durumunda ise üretim hatalarının % 34'lere varabileceği belirlenmiştir.

Liu literatürde kullanılan üç modelin türbin eğrisi modellemesinde başarılı olup olmadığını incelemiş ve türbin eğrilerini modellemek için yeni bir yöntem geliştirmiştir [205]. Geliştirilen yöntem üç farklı türbine uygulanmış ve modelleme tekniği olarak kullanılması tavsiye edilmiştir.

Eminoğlu ve Ayasun, değişken hızlı rüzgar türbinlerinin modellenmesi için yeni bir yöntem geliştirmiştir [206]. Geliştiren yöntemin avantajı sadece türbin gücüne ve nominal güçte olan rüzgar şiddetine bağlı olmasıdır. Geliştirilen yöntem ile Weibull ölçek parametresine bağlı enerji üretim maliyetleri belirlenmiştir.

Sohoni ve diğ., yapmış oldukları çalışmada literatürde bulunan rüzgar türbinin güç eğrisi modelleme tekniklerini özetlemişler ve birbirlerine göre avantaj ile dezavantajlarını da dikkate alarak değerlendirmişlerdir [207]. Sıklıkla kullanılan polinomlar ile modelleme tekniğinin basit olduğunu bu nedenle rüzgar enerjisi potansiyeli belirlenirken ve küçük türbin sistemlerin tasarımı sırasında kullanılabileceği belirtilmektedir. Dört ve beş parametrelili lojistik fonksiyon tabanlı güç eğrisi modelleme teknikleri enerji üretim tahmini hatalarının azaltılmasında kullanılabilecek bir yöntem olduğu açıklanmıştır. Bu modelleme yöntemi güç eğrilerinin online olarak izlenmesinde de kullanılabilecek bir yöntem olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, daha önceki çalışmalardaki modellerin çoğunda rüzgar türbinlerinin eğrilerinin üreticilerin katalog verileri üzerinden geliştirildiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, üretici tarafından tedarik edilen katalog verileri türbine özgüdür ve davranışlarını standart test koşulları altında temsil eder. Tek türbinlerin güç tahmini için ve sabit rüzgar alan siteler için uygulanabilirler. Bir rüzgar enerjisi santrali için tüm koşulları temsil edebilen gelişmiş modeller gereklidir. Gerçek rüzgar şiddetinden ve rüzgar çiftliklerinin çıkış gücü verilerinden türetilen güç eğrileri, daha iyi modellerle sonuçlanan çeşitli alana özgü faktörleri dikkate alınması gerektiğini ifade etmiştir.

Rüzgar türbini modelleme teknikleri gerçekleşecek enerji üretiminin belirlenmesinde önemli faktörlerden biridir, bu nedenle güç eğrisinin gerçeğe en yakın şekilde modellenmesi gerekmektedir. Çalışmanın bu bölümünde verilen teorik güç eğrisi

modelleme tekniklerinin yanında rüzgar türbinlerinin ölçülmüş güç eğrilerinin modellenmesi ile ilgili çalışmalarda vardır. Bu çalışmalar enerji santrali kurulmasının ardından ölçülen türbin eğrisi ile türbinin katalog değerlerinin karşılaştırılması için yapılmaktadır. Üretici firmalar katalog değerlerini garanti etmekte, türbinlerin gerekli performans şartlarını sağlayamamaları durumunda türbin üreticisi olan firmalar alıcı firmaya çeşitli cezalar ödemektedirler. Yapılan ölçüm sonucu aşağıdaki Şekil 2.7’de gösterilmektedir [208]. Şekil 2.7’den de görülebileceği gibi uluslararası standartlara göre ölçüm yapılmakta, daha sonra elde edilen güç eğrisi ile garanti edilen güç eğrileri karşılaştırılmaktadır. Belirsizlikler belirlenmekte ve garanti edilen güç eğrisinin sağlanamaması durumunda çeşitli yaptırımlar uygulanabilmektedir.

ENERCON E70 GÜÇ EĞRİSİ ÖLÇÜMÜ							
Hava yoğunluğu 1,225 kg/m ³							
Bin- No.	Göbek Yüksekliği Rüzgar Şiddeti V _i [m/s]	Güç P _i [kW]	C _p ,P	Veri Sayısı N _i [-]	Belirsizlik (A) S _i [kW]	Belirsizlik (B) U _i [kW]	Toplam Belirsizlik U _{c,i} [kW]
5	2.43	2.27	0.07	3	0.6	8.0	8.0
6	3.07	16.85	0.24	10	2.6	8.5	8.9
7	3.48	35.97	0.35	33	1.5	10.1	10.2
8	3.97	58.95	0.39	35	2.0	10.4	10.6
9	4.48	90.99	0.42	25	3.0	12.2	12.6
10	5.05	131.55	0.42	11	3.7	13.8	14.3
11	5.49	190.06	0.47	13	9.1	23.5	25.2
12	6.02	247.08	0.47	16	7.3	20.7	22.0
13	6.50	315.23	0.48	25	4.9	27.1	27.6
14	6.99	405.31	0.49	33	9.1	36.5	37.6
15	7.56	503.54	0.48	51	8.4	35.9	36.9
16	7.97	602.36	0.49	60	9.0	52.3	53.1
17	8.49	728.07	0.49	75	9.9	54.6	55.4
18	9.01	901.66	0.51	104	8.5	78.3	78.7
19	9.50	1034.54	0.50	118	7.8	67.0	67.5
20	10.01	1215.20	0.50	131	8.9	89.3	89.8
21	10.51	1420.41	0.51	117	9.7	109.4	109.9
22	11.01	1596.47	0.50	108	11.7	97.8	98.5
23	11.48	1756.72	0.48	89	14.9	97.4	98.6
24	12.02	1958.17	0.47	73	14.4	111.5	112.4
25	12.51	2093.26	0.44	76	12.1	85.5	86.4
26	12.98	2209.05	0.42	63	9.0	79.8	80.3
27	13.53	2242.87	0.37	41	11.5	25.3	27.8
28	14.03	2286.15	0.34	53	5.3	33.2	33.6
29	14.49	2299.19	0.31	41	3.5	18.5	18.9
30	14.99	2298.40	0.28	22	5.7	15.7	16.7
31	15.47	2299.01	0.26	23	17.1	15.7	23.3
32	15.98	2316.12	0.24	23	1.1	20.4	20.4
33	16.48	2310.24	0.21	36	3.4	16.4	16.8
34	16.98	2314.83	0.20	22	2.4	16.2	16.4
35	17.47	2315.49	0.18	31	1.4	15.8	15.9
36	17.98	2316.40	0.17	27	0.3	15.8	15.8
37	18.50	2316.06	0.15	21	0.3	15.8	15.8
38	18.90	2313.43	0.14	19	2.9	16.1	16.3
39	19.48	2315.90	0.13	10	0.5	15.9	15.9

Yıllık Enerji Üretimi (AEP)			
Yıllık ortalama rüzgar şiddeti (Rayleigh-Curve)	Yıllık Üretim	Güç Eğrisi Belirsizliğinin Üretime Etkisi	Kullanılabilirliğin %100 Olmaması Durumu
[m/s]	[MWh]	[MWh]	[MWh]
4	1185.0	130.3	1185.0
5	2360.2	204.9	2360.3
6	3874.3	277.5	3878.5
7	5510.4	331.7	5549.3
8	7033.9	363.1	7195.6
9	8274.2	374.9	8692.5
10 *	9156.9	372.5	9960.3
11 *	9687.8	361.1	10956.5

Ölçümü Yapan Kurum

Deutsches Windenergie-Institut GmbH
Ebertstraße 96
D-26382 Wilhelmshaven

Tarih

14.02.2005

(i.V. Dipl.-Phys. H. Mellinshoff)
DEWI



(i.A. Dipl.-Ing. U. Bunse)
DEWI

Şekil 2.7 : Rüzgar türbini güç eğrisi ölçüm sonuçları.

Oh ve Kim yapmış oldukları çalışmada rüzgar enerjisi santrallerinde bulunan beş rüzgar türbininin enerji üretim tahminini WAsP programı ile katalog güç eğrisini kullanarak hesaplamışlar ve ölçülen gerçek enerji üretimi ile karşılaştırmışlardır [209]. Sonuçlara göre türbin güç eğrisinin katalog verisinden farklı olabileceğinden üretim tahmininde %17,8'e kadar sapmalar meydana gelmiştir. Çizelge 2.3 üretim tahmin hatalarını göstermektedir.

Çizelge 2.3 : WAsP üretim tahmin hataları.

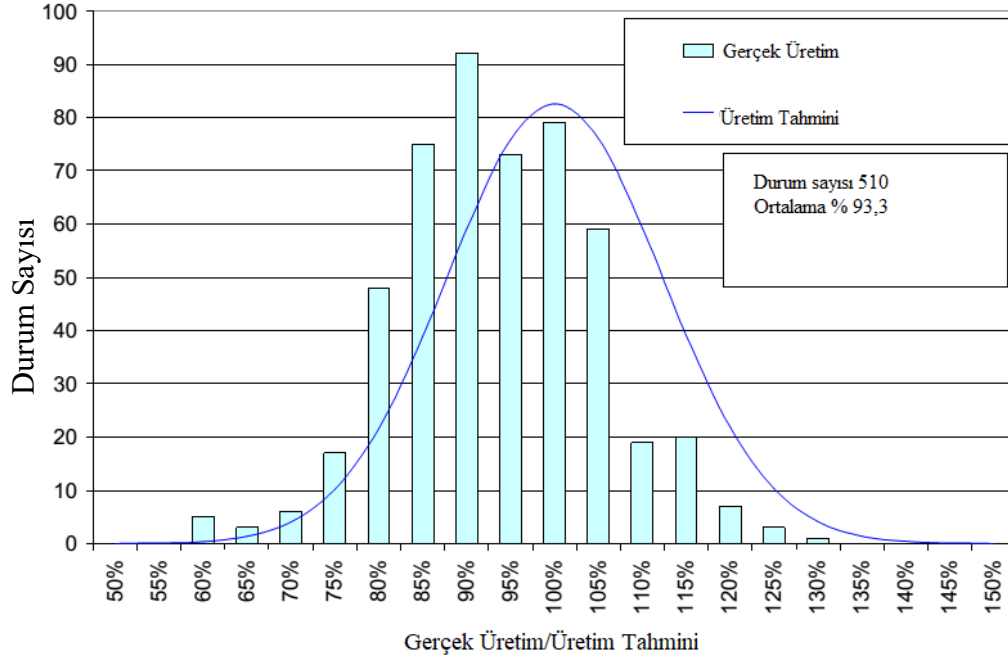
	T1	T2	T3	T4	T5
Garanti Edilen Üretim (MWh)	4689	6069	6948	6355	5795
Ölçülen Üretim (MWh)	4171	5000	5712	5922	4924
Mutlak Hata (%)	11	17,6	17,8	6,8	15

Tindal ve diğ., yapmış oldukları çalışmada 156 rüzgar enerjisi santralinin üretim ve üretim tahmin verilerini incelemişlerdir. İncelenen verilerin ölçüm uzunluğu 1 ila 14 yıl arasındadır [210]. Bu çalışmada toplam 510 durum (yıl*santral verisi) incelenmiştir. Çalışmada rüzgar enerjisi santrallerinin tahmin edilen enerji üretimi ile bu santrallerin gerçekleşen enerji üretim değerleri karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre gerçekleşen üretim bazı durumlarda tahmin edilen üretimin % 40 altında ya da gerçekleşen enerji üretimi bazı durumlarda tahmin edilen üretimin % 50 üzerinde olabileceği görülmüştür. İncelenen 510 durumunda gerçekleşen üretimler tahmin edilen rüzgar enerjisi santrali üretimine oranlandığında ise bu oran % 93,3 olarak hesaplanmıştır. Şekil 2.8 gerçekleşen üretimin üretim tahminine oranını durumlara göre göstermektedir.

Kallides ve diğ., yapmış oldukları çalışmada Yunanistan' da kurulu rüzgar enerjisi santrallerinin kapasite faktörü değişimlerini analiz etmişlerdir [211]. Yapılan çalışma sonucuna göre santrallerden kurulmadan önce yapılan üretim analizleri ile santrallerinin üretimleri arasında ciddi farklar olduğu ortaya çıkmıştır. Hatta bazı santrallerde simülasyon sonuçları ile gerçekleşen üretimler arasında olan farkların % 70'lere kadar çıktığı yani santrallerin gerçek üretiminin beklenen üretimin yaklaşık % 30'u kadar olduğu belirlenmiştir.

Rüzgar enerjisi santrali tasarım aşamalarından bir tanesi de bölge rüzgar enerji potansiyelinin alan akış programları ile simüle edilmesi ve rüzgar türbini konumlandırılacak noktaların belirlenmesidir. Bu alan akış yazılımlarının büyük çoğunluğu enerji üretim analizlerinde Weibull dağılımını kullanmaktadır. Çalışmanın

devamında literatür özeti olarak enerji üretiminde kullanılan yazılımlar ile yapılan enerji üretim tahminlerinin gerçek üretim sonuçları ile karşılaştırılması ile ilgili yapılan çalışmalar özetlenecektir.



Şekil 2.8 : Gerçekleşen üretimin üretim tahminine oranı.

Guler ve diğ., yapmış oldukları çalışmada literatürde rüzgar enerjisi potansiyel analizinde kullanılan WAsP, Wind Pro, Wind Farmer, Wind Sim, Windographer, Homer ve Retscrenn yazılımlarını karşılaştırmışlardır [212]. Çalışmada güçleri 600 kW ile 5 MW arasında değişen 10 rüzgar türbini ele alınmış ve bu türbinlerin enerji üretimleri hesaplanmıştır. Çizelge 2.4 simülasyon programları enerji üretim tahminlerini göstermektedir.

Çizelge 2.4 : Rüzgar türbinleri enerji simülasyonu.

Türbin	WAsP	WindPro	Wind Farmer	Wind Sim	Windographer		Homer		RETScreen	
					α (0,14)	α (0,25)	α (0,14)	α (0,25)	α (0,14)	α (0,25)
GE 600a	1286	1265	1238	1188	1184	1184	1146	1146	1310	1310
Vestas V47	1434	1410	1377	1317	1317	1317	1268	1268	1463	1463
Enercon E-48	1731	1702	1656	1577	1575	1575	1524	1524	1766	1766
Nordex N-50	1557	1527	1483	1453	1451	1451	1357	1357	1592	1592
Enercon E-82	5861	5714	5682	5654	5192	5763	5764	6416	5014	6228
Gamesa G83	5200	5083	5050	5130	4703	5217	4459	4984	4467	5605
Vestas V90	6088	5961	5961	6053	5584	6170	5255	5824	5207	6475
Siemens SWT-2.3	5501	5382	5389	5440	4965	5555	4648	5214	4679	6011
Alstom ECO 3000	7934	7738	7732	7684	7061	7778	6856	7570	6890	8449
RE Power 5 MW	13754	13310	13317	13751	11895	14002	11564	13672	10689	15070

Türbin tipine göre değişmekle birlikte alan akış programları arasında enerji üretim tahmin farkları bazı durumlarda % 4'ün üzerine çıkabilmektedir. İstatistiksel bazlı

programlarda ise Hellmann katsayısına bağı olarak tahmin farkları % 20'lere varmaktadır.

Nillson ise yapmış olduğı çalışmada enerji üretim tahminlerindeki hatayı incelemiştir [213]. Çizelge 2.5'de verilen sonuçlara göre enerji üretim tahminleri ile gerçekleşen üretimler arasında % 70'lere varan sapmalar oluşabilmektedir.

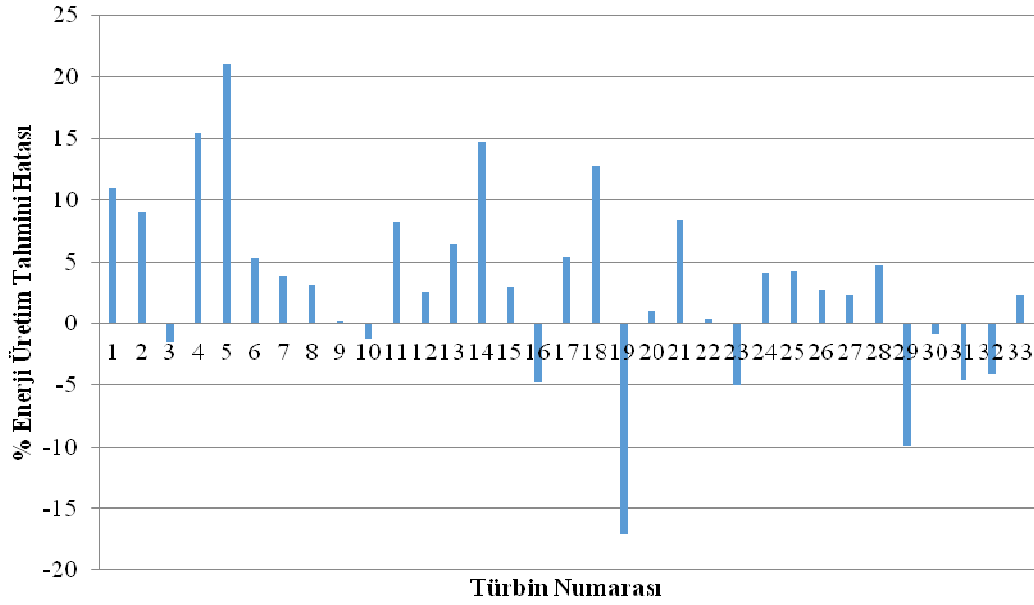
Çizelge 2.5 : WAsP enerji üretim tahmin hataları.

Türbin Yeri	Gerçek Üretim (MWh)	WAsP Simülasyon (MWh)	Fark (%)
Ferdinand	1836	2517	+37
Vilhelm	1607	2325	+45
Freja	1474	2515	+71
Freja	1786	2515	+41

Chakravarthy ve Hennibir rüzgar enerjisi santralini WAsP ile modellemişler ve gerçek üretim ile simülasyon sonuçlarını üç yıllık veri seti üzerinde karşılaştırmışlardır [214]. Modellenen rüzgar santrali 83 tane rüzgar türbininden oluşmakta olup kurulu gücü 149 MW'dır. Simülasyon sonuçları ile gerçek sonuçlar arasında ortalama sapma 2007-2009 yıllarında sırası ile %5,7, % 6,2 ve 6,8 olarak belirlenmiştir. Türbin bazında ise en büyük üretim tahmini sapmaları % 15,8, % 22,3 ve %14,1'dir.

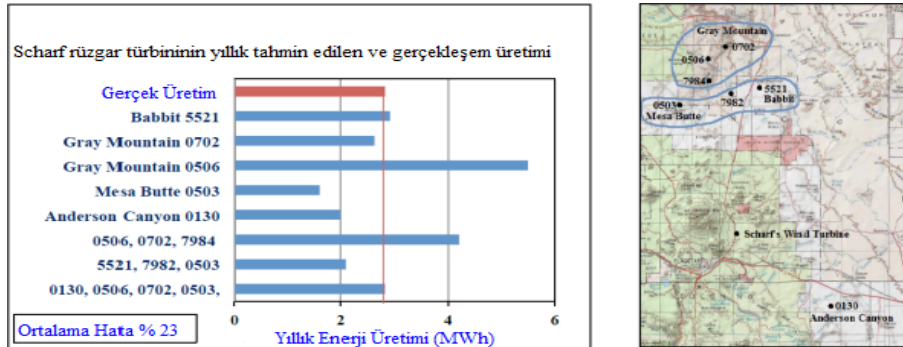
Llombart ve diğ., tarafından yapılan çalışmada ise WAsP simülasyon programının enerji üretim hataları analiz edilmiştir [215]. Analiz için 55 metre göbek yüksekliği olan 33 adet rüzgar türbininden oluşan ve güçleri 750 kW ile 900 kW arasında olan toplam kapasitesi 24,75 MW olan rüzgar çiftliğinin verileri kullanılmıştır. Yapılan çalışmanın sonuçları Şekil 2.9'da verilmiştir. Üretim tahmini hataları türbin bazında değişmekte olup bazı durumlarda % 20'lerin üzerine çıkabilmektedir.

Acker, WAsP ve Wind Pro programlarını birlikte kullanarak 2,4 kW gücünde bir rüzgar türbininin farklı noktalardan enerji üretim simülasyonunu gerçek enerji üretim değerleri ile karşılaştırmıştır [216]. Çalışmada kullanılan türbinin göbek yüksekliği 10 metredir. Simülasyon bölgelerinde ölçüm yüksekliklerine göre iki farklı durum incelenmiştir. Rüzgar şiddeti ölçüm yüksekliğinin göbek yüksekliğinden farklı olması durumunda enerji üretim tahmin hataları artmakta olduğu ve ortalama % 23'den % 31'e yükselmekte olduğu sonucu elde edilmiştir. Şekil 2.10'dan da görülebileceği gibi bazı durumlarda % 50'den daha fazla hata olabilmektedir.

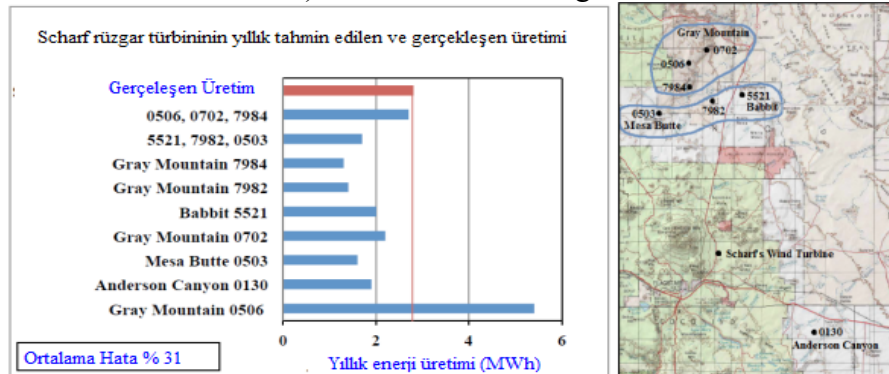


Şekil 2.9 : WAsP sonucu türbin bazında üretim hataları.

Şekil 2.10'dan da görülebileceği gibi farklı yüksekliklerden yapılan tahminler sonucu türbin enerji üretimlerinde aynı oranda hata olmamaktadır.



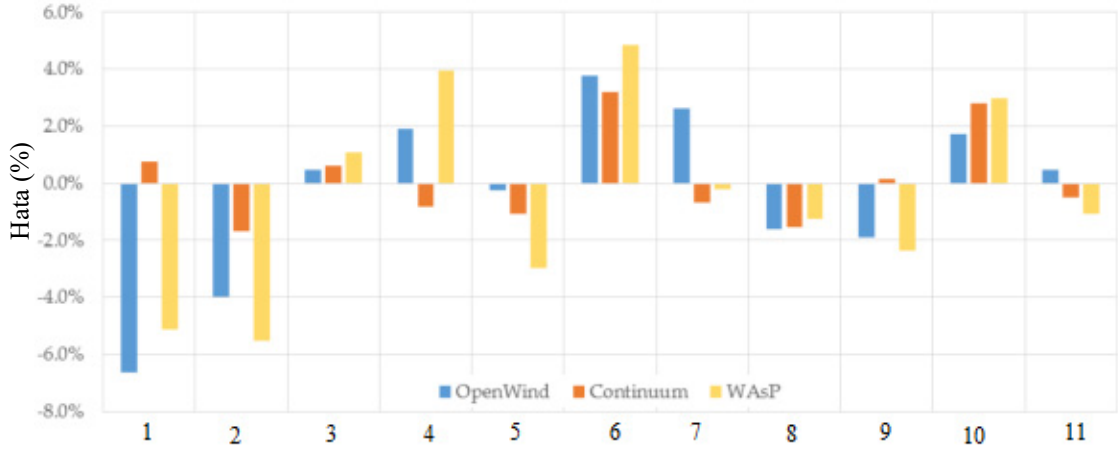
a) 10 metre verilerine göre



b) Bütün yüksekliklere göre ortalama

Şekil 2.10 : Rüzgar türbini üretim karşılaştırması.

Yapılan diğ er bir çalışmada, WAsP, OpenWind ve Continuum programları karşılaştırılmıştır [217]. Çalışmada 11 lm noktasından alınan veriler kullanılmıştır. Round Robin yöntemi kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre hatalar şekil 2.11’de gösterilmektedir.



şekil 2.11 : Farklı simülasyon programlarına göre hatalar.

Diğ er bir çalışmada ise WAsP ve Wind Sim karşılaştırmıştır. Çalışmada programların hesapladığı Weibull şekil parametresi arasında bazı durumlarda % 300'lere varan ciddi tahmin farkları olduğu buna karşılık ölçek parametresinde benzer tahminler grlmştır [218].

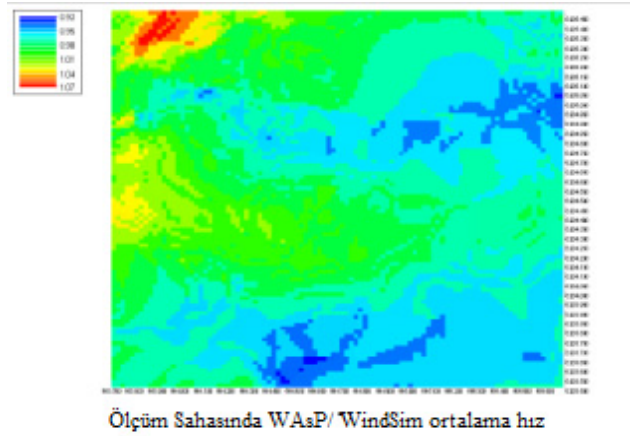
Bilgili ve diğ ., yapmış oldukları çalışmada Türkiye’nin batı bölgelerinde olan rüzgar enerji potansiyelini belirlemek için analiz yapmışlardır [125,219]. Simülasyon alışmasında WAsP ve Weibull ile Rayleigh dağılımları kullanılmıştır. Aşağıdaki izelge 2.6’da bölgesel bazda WAsP ve dağılımlar ile elde edilen güç yoğunlukları gösterilmektedir.

Çizelge 2.6 : WAsP ve dağılımların güç yoğunluğu tahmini karşılaştırılması.

		WAsP				Weibull (JMM)				Rayleigh			
İstasyon	llen	GY	Hata	Mape	R	GY	Hata	Mape	R	GY	Hata	Mape	R
Akhisar	362,47	365	0,70	3,56	0,97083	402,68	11,09	7,4	0,99476	237,82	34,39	135	0,92815
Bababurnu	254,89	257	0,83	0,56	0,99997	248,40	2,55	1,76	0,99935	247,65	2,84	9,06	0,98363
Belen	383,72	387	0,85	2	0,99995	394,81	2,89	1,1	0,99990	396,09	3,22	18,14	0,99319
Data	236,55	238	0,61	0,59	0,99985	248,38	5,00	5,36	0,99809	208,75	11,75	35,43	0,88092
Fa	197,19	199	0,92	0,72	0,99987	195,40	0,91	1,23	0,99823	220,08	11,61	14,63	0,91253
Gelendost	244,47	246	0,63	0,59	0,99992	230,60	5,67	3,47	0,99795	150,65	38,38	47,88	0,94197
Gelibolu	407,10	410	0,71	0,53	0,99994	405,18	0,47	2,56	0,99749	375,99	7,64	12,83	0,95710
Gkeada	520,82	526	0,99	0,58	0,99999	517,40	0,66	1,47	0,99935	442,08	15,12	16,77	0,97343
Ske	93,05	95	2,10	0,99	0,99988	97,26	4,52	4,16	0,99969	80,62	13,36	20,09	0,98119

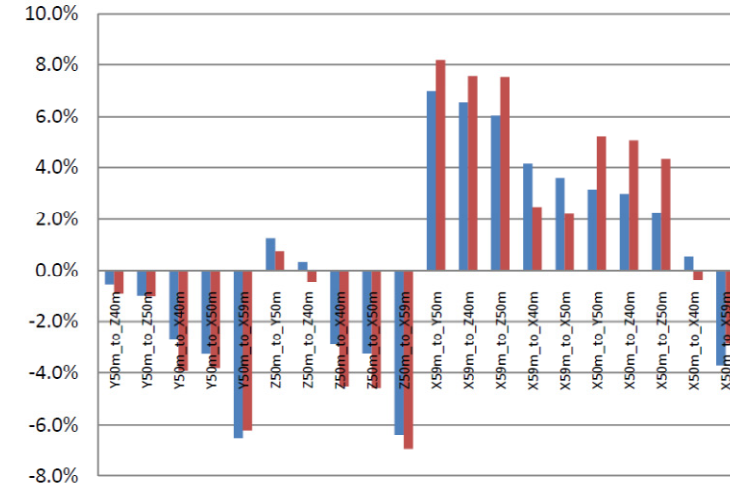
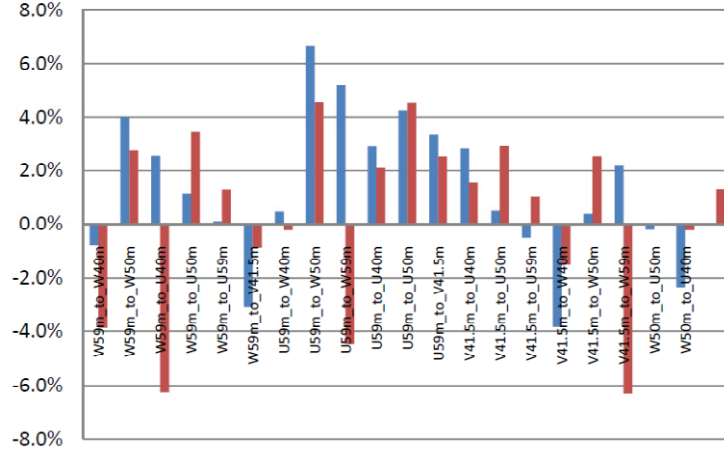
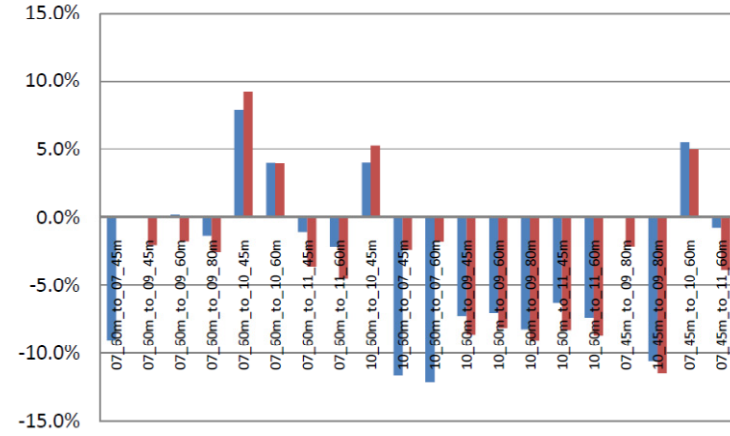
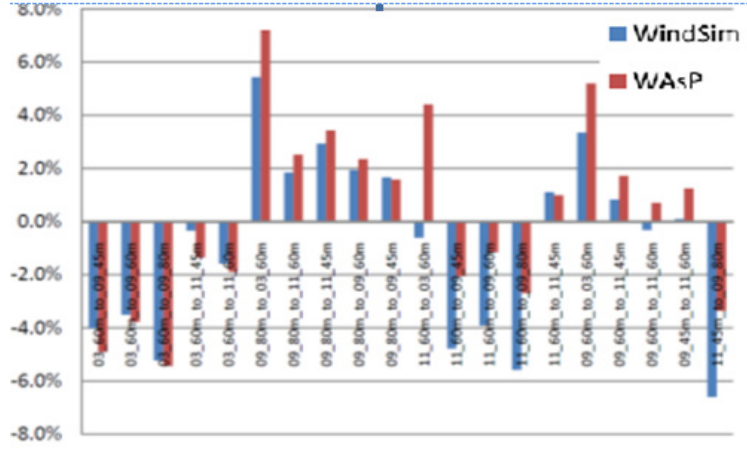
Çizelge 2.6'dan da görülebileceği gibi bazı durumlarda güç yoğunlukları tahminleri arasında olan fark % 10 seviyelerine kadar çıkmaktadır.

Danimarka'da olan Torrid verileri kullanılarak yapılan çalışmada WAsP ve Wind Sim programları karşılaştırılmıştır [220]. Çalışmanın sonucunda 30 metre yükseklik için ölçülen ve programlar tarafından belirlenen Weibull parametreleri sektörel bazda da incelenmiştir. Bu parametrelerden belirlenen güç yoğunluğu değerleri ölçülen değerlerle karşılaştırıldığında güç yoğunluğu farklarının WAsP için %19,7 Wind Sim için ise % 4,6'ya ulaşabildiği görülmüştür. Ayrıca, 10 metre yüksekte ölçülen verilerin 70 metreye yükseltilmesi durumunda ise Wind Sim programının sektörel bazda güç yoğunluğunun % 139'a kadar çıkabildiği, 100 metre yüksekliğe göre analiz sonuçlarına göre ise sektörel bazda güç yoğunluğu farkları % 586'ya ulaşabildiği görülmüştür. Şekil 2.12'de ise Wind Sim ve WAsP programları ile elde edilen bölge ortalama rüzgar şiddeti haritalarının ortalama şiddetlerinin oranının ölçüm bölgesine göre dağılımı gösterilmiştir. Programların ortalama hız tahminlerinin oranları 0,92 ile 1,07 arasında değişmektedir.



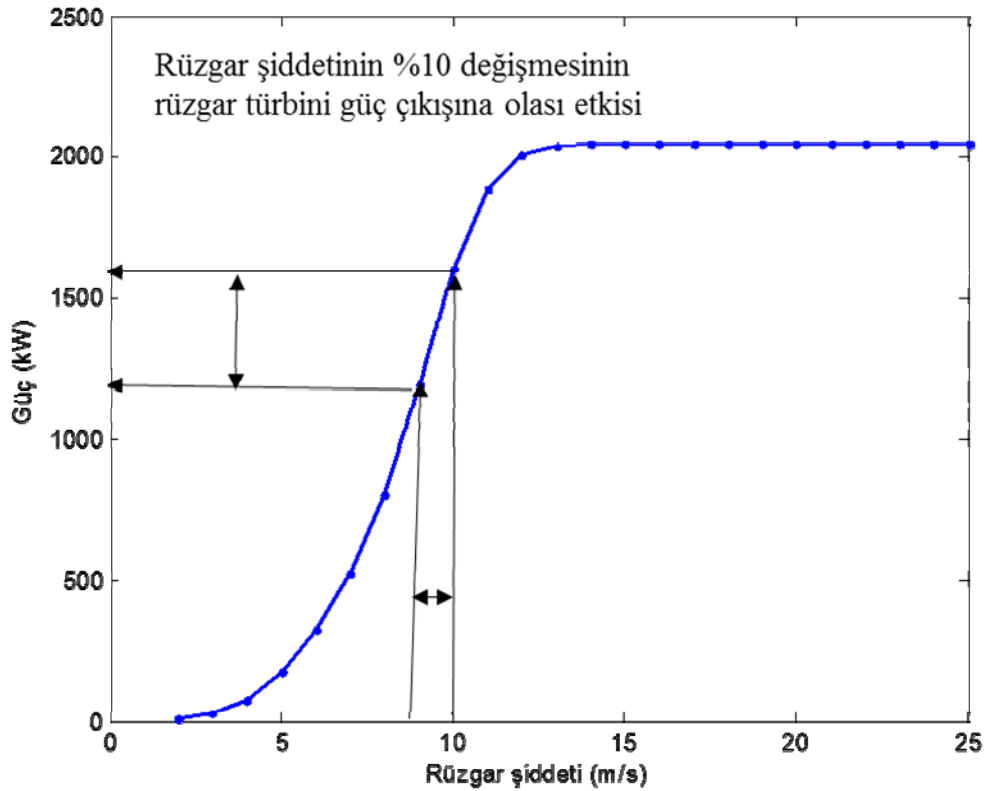
Şekil 2.12 : WAsP ve WindSim simülasyon sonuçları karşılaştırması.

WindSim programının sonuçlarını geçerliliğini kontrol etmek için dört bölgede 28 yükseklikte ölçülen veriler kullanılarak kompleks bir arazi yapısında WAsP ile çalışma yapılmıştır [221]. Yapılan çalışmada bir ölçüm direğinden diğer ölçüm direğinde olan ortalama rüzgar şiddetinin belirlenmesi için bu programlar kullanılmış ve ölçülen değer ile simülasyon sonucu arasında fark hata olarak gösterilmiştir. Çalışmada ayrıca ölüm direklerinde farklı yükseklikler referans alınarak inceleme yapılmıştır, tahmin hataları belirlenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar Şekil 2.13 ile gösterilmektedir.



Şekil 2.13 : WAsP ve WindSim rüzgar şiddeti tahmin hataları (%).

Farklı dört bölge için yapılan analiz sonuçlarından görülebileceği gibi gerek WAsP gerekse de Wind Sim ortalama rüzgar şiddeti tahmininde bazı durumlarda % 10'un üzerinden hata yapabilmektedir. Bu hatalar bazen ortalama rüzgar şiddetinin fazla tahmin edilmesi bazen ise az tahmin edilmesi şeklinde gerçekleşebilmektedir. Bununla birlikte detaylı sektörel bazlı analiz sonuçları bu faktörlerin çok daha yüksek değerlere çıktığını göstermiştir. Güç yoğunluğunun rüzgar şiddetinin küpü ile orantılı olduğu ve rüzgar şiddetinde olan küçük değişimlerin bazı durumlarda Şekil 2.14'de gösterildiği gibi çok daha fazla türbin güç değişimine neden olduğu değerlendirildiğinde bu programların doğru sonuçlar vermesinin yatırımcı açısından önemi oldukça büyüktür.



Şekil 2.14 : Rüzgar şiddeti değişiminin türbin çıkışı üzerine olası etkisi.

Rüzgar enerjisi potansiyel analizinde en yaygın kullanılan programlardan bir tanesi WAsP'dır. Yapılan literatür özetinde de görülebileceği gibi rüzgar enerjisi potansiyel analiz programları arasında bazı durumlarda ciddi farklar olabilmektedir. Gerçekleşen üretim ile simülasyon sonuçlarının arasında oluşan farkın sebepleri; Weibull dağılımı parametrelerini belirlemede kullanılan yöntemlerin farklı olması, bazı programların hava yoğunluğu değişimini dikkate almaması, türbin iz ve türbülans etkilerinin

2.2. Önerilen Tez Çalışmasının Özgünlüğü

Bu tez çalışmasına özgünlüğünü veren bölümler şu şekilde düzenlenmiştir. Üçüncü bölümde öncelikle literatürde rüzgar enerjisi modellemesinde ve ticari paket programların neredeyse hepsinde gömülü olarak kullanılan Weibull dağılımı parametrelerinin belirlenmesi için mevcut yöntemler özetlenmiş ve Weibull dağılımını parametrelerinin belirlenmesi için mevcut yöntemlere alternatif olabilecek yeni yöntemler geliştirilmiştir. Geliştirilen parametre belirleme yöntemlerinin doğruluğu literatürde olan verilerin kullanılması sonucunda gerek rüzgar şiddetinin dağılımının modellemesi ile gerekse de rüzgar türbini enerji üretim tahminlerinde olan başarısı ile ortaya konmuştur. Ayrıca geliştirilen parametre belirleme yöntemi rüzgar enerjisi modellemelerinde kullanılan dağılımların karşılaştırılmasının yapılması için ülkemizde ölçülmüş rüzgar şiddeti verileri kullanılarak çeşitli dağılımlarla ile modellemeler yapılmıştır. Bunlara ek olarak 60 standart dağılım kullanılarak ülkemizde rüzgar şiddeti ölçülmüş 13 bölgede bu dağılımlar ile analiz edilerek, üç farklı hata analizi yöntemine göre başarıları karşılaştırılmıştır. Bu bölüm tez çalışmasına özgünlüğünü veren bölümlerden bir tanesidir.

Tez çalışmasının dördüncü bölümünde, rüzgar enerjisi modellemesinde kullanılan karışım dağılımları tekniği ve MEP modelleme tekniği incelenmiştir. Ölçülmüş veri seti kullanılarak Weibull, MWblWbl ve üç farklı MEP dağılımı kullanılarak rüzgar enerjisi modellemesi yapılmıştır. Dağılım parametre belirleme yöntemlerinin enerji üretimi üzerinde olan etkisi karışım dağılımları özelinde de incelenmiştir. Bu bölümde, karışım ve MEP dağılımların kullanılması sonucu rüzgar türbini enerji üretim tahminlerinde olan iyileşmelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda Datça'da ölçülmüş rüzgar şiddeti verileri 80 metre yüksekliğe ötelenerek analizler yapılmıştır.

Bu tez çalışmasındaki amaçlardan bir tanesi, rüzgar şiddeti verilerinin modellenmesinde ve bir rüzgar türbinin enerji üretiminin belirlenmesinde karışım dağılımlarının kullanılabilirliğinin ve başarısının analizidir. Bu kapsamda tez çalışmasının beşinci bölümünde ülkemizde bir rüzgar enerjisi santralinde olan rüzgar türbininin güç eğrisi IEC standardına göre belirlenmiş ve daha sonra ise bu türbinin gerçekleşmiş enerji üretimi değerleri, ticari bir paket programın sonuçları (WAsP), standart dağılımlar, karışım dağılımları ve MEP dağılımları kullanılarak

karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan 109 karışım dağılımı 96'sı ilk defa bu çalışmada kapsamında rüzgar enerjisi potansiyel analizinde kullanılmıştır. Bir rüzgar türbininin performansının IEC standartlarına [217] göre belirlendiği ve ülkemizde olan santraller için ilk defa yapıldığı için tezin bir diğer özgün bölümüdür.

Sonuç bölümünde ise çalışma kapsamında yapılanlar özetlenmiş ve elde edilen elde bulgular değerlendirilip önerilerde bulunulmuştur.

3. WEIBULL DAĞILIMI

Sürekli olasılık dağılımlardan biri olan Weibull dağılımının temelleri 1920’li yıllara kadar uzanmaktadır. Dağılımın ismi İsveçli bir fizikçi olan Waloddi Weibull’dan gelmektedir. Weibull dağılımının temelini atıldığı 1937 yılında yapılmış olan çalışma dağılımın gelişim süreci için önemli bir çalışmadır [223]. Dağılımın popüler olması ise Weibull ve Sweden tarafından 1951’ yılında yapılmış olan “A Statistical Distribution of Wide Applicability” isimli makale ile olmuştur [224]. Bu makalede dağılımın birçok alanda kullanımını incelemiştir. Weibull ve Sweden yapmış oldukları çalışmada çeliklerin mukavemetini, küllerin boyut dağılımını, Hindistan pamuğunun mukavemetini, çelik yorulma davranışını, doğan erkek bebeklerin boylarını ve fasulyelerin boyutlarını Weibull dağılımı ile modellemiştir [224]. Yapılan çalışmada incelenmiş olan farklı alanlara ait geniş veri setleri dağılımın kabul görmesini ve birçok alanda kullanılan bir dağılım olmasını sağlamıştır. Bu dağılımın kabul görme ve birçok mühendislik alanında kullanılma nedenlerinden bir tanesi de çalışmanın yayınlandığı derginin bir mühendislik dergisi olmasıdır.

Tarihsel süreçte dağılımın gelişmesinde ve farklı alanlarda kullanılabilir bir dağılım olduğunun gösterilmesinde birçok bilim adamının gerek makaleleri gerekse de kitapları ile katkısı olmuştur. Weibull dağılımı, kalite kontrolü konusunda olan çalışmalarda, hidroloji ile ilgili çalışmalarda, meteoroloji konusunda olan çalışmalarda, rüzgar enerjisi ile ilgili olan çalışmalarda, kimya biliminde yapılan çalışmalarda, biyoloji ile ilgili çalışmalarda, eczacılık, tıp ve psikoloji konusunda, güvenilirlik konusu ile ilgili olan çalışmalarda, yüksek gerilim ile ilgili çalışmalarda, deprem tahminleri ile ilgili çalışmalarda, finansal analizlerde, radarlar ile ilgili olan çalışmalarda ve malzeme bilimi ile ilgili çalışmalarda sıklıkla kullanılan bir dağılım haline gelmiştir [225-226]. Bunun temel nedeni ise, dağılımın iki parametrelili olması, parametrelerinin belirlenmesinin kolay olması ve dağılımın esnek yapısı sayesinde birçok şekle girebilmesidir. Dağılımın kullanıldığı çeşitli alanlar konu ile ilgili yapılan çalışmalarda ve referans kitaplarda gösterilmektedir [225-226]. İki

parametrelili Weibull dağılımının kümülatif olasılık yoğunluk fonksiyonu denklem 3.1 ile ifade edilebilir.

$$F_w(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (3.1)$$

Burada $F_w(v)$ kümülatif olasılık yoğunluk fonksiyonunu, v rüzgar şiddetini, k boyutsuz şekil parametresini ve c rüzgar şiddeti ile aynı birimde olan ölçek parametresini ifade etmektedir. Dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu ise denklem 3.2 ile aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$f_w(v) = \frac{dF_w(v)}{dv} \quad (3.2)$$

Burada $f_w(v)$ olasılık yoğunluk fonksiyonunu ifade etmektedir. Denklemin türevinin alınmasının ardından elde edilen olasılık yoğunluk fonksiyonu ise denklem 3.3 ile ifade edilebilir.

$$f_w(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}, f_w(v) \geq 0, v > 0, k > 0, c > 0 \quad (3.3)$$

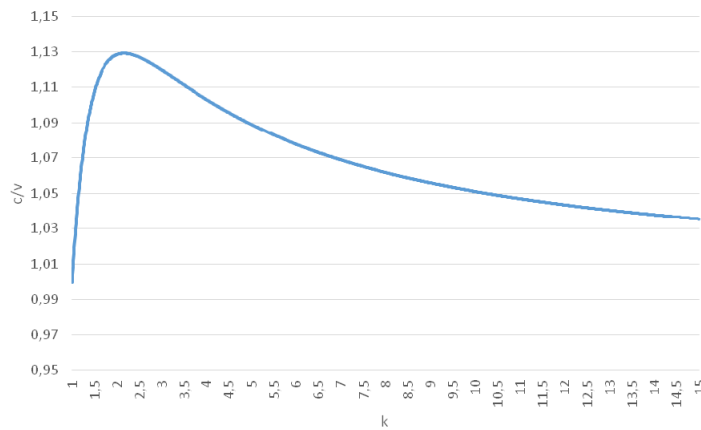
Dağılımın ortalama rüzgar şiddeti aşağıdaki denklem 3.4 ile ifade edilebilir.

$$\bar{v} = E(v) = \int_0^{\infty} v * f_w(v) dv \quad (3.4)$$

Çeşitli dönüşüm işlemleri ile aşağıdaki denklem 3.5 elde edilebilir.

$$\bar{v} = c * \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (3.5)$$

Weibull şekil parametresine bağlı olarak ölçek parametresinin ortalama hıza oranı aşağıdaki Şekil 3.1 ile sunulmaktadır



Şekil 3.1 : Ölçek parametresinin ortalamaya oranının değişimi.

Dağılımın momentleri ise denklem 3.6 ile ifade edilebilir [225].

$$m_n = \int_0^{\infty} v^n * f_w(v) dv \quad (3.6)$$

Burada m_n moment fonksiyonunu ifade eder. Gerekli ara işlemlerin yapılması sonucunda dağılımın genel moment ifadesi aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$m_n = c^n * \Gamma\left(1 + \frac{n}{k}\right) \quad (3.7)$$

Weibull dağılımın üçüncü momenti yani rüzgar verileri için küplerin ortalaması ise aşağıdaki denklem 3.8 ile ifade edilebilir.

$$m_3 = \overline{v^3} = c^3 * \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (3.8)$$

Dağılımın varyansı (ikinci derece merkezi moment) ve standart sapması ise denklem 3.9-3.13 ile ifade edilebilir.

$$V_w(v) = E(v^2) - E^2(v) \quad (3.9)$$

$$= \int_0^{\infty} v^2 * f_w(v) dv - \left(c * \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right)^2 \quad (3.10)$$

Çeşitli dönüşüm işlemleri ile aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [227].

$$= c^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right)^2 \right] \quad (3.11)$$

$$\sigma_v = \sqrt{V_w(v)} \quad (3.12)$$

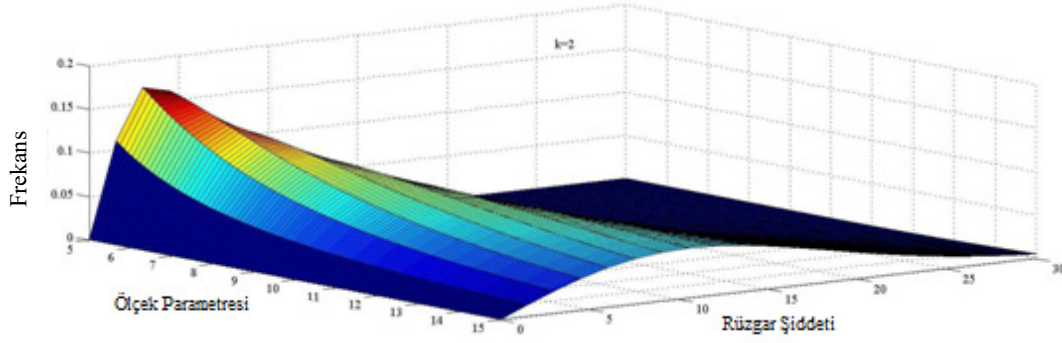
$$\sigma_v = c \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right)^2} \quad (3.13)$$

Dağılımın kurtosis ve skewnessi aşağıdaki denklemler ile ifade edilebilir [225].

$$skewness = \frac{2\left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right)^3 - 3\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} + \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)}{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad (3.14)$$

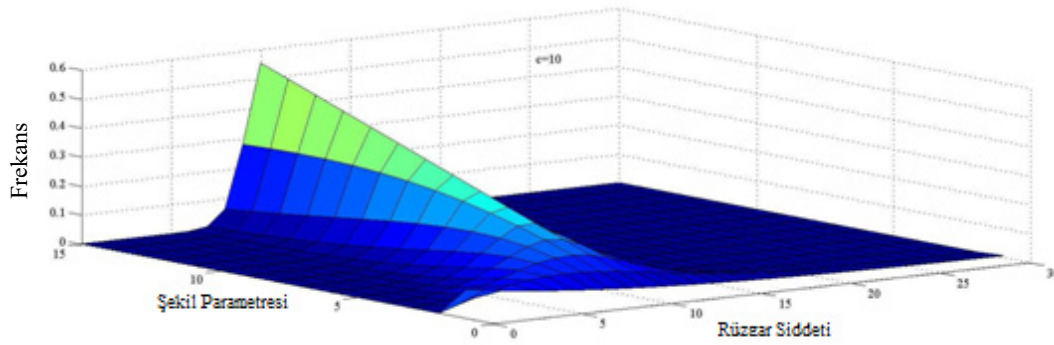
$$ku = \frac{-6\left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right)^4 + 12\left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right)^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - 3\left(\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)\right)^2 - 4\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) + \Gamma\left(1 + \frac{4}{k}\right)}{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right)^2\right]^2} \quad (3.15)$$

Şekil 3.2 farklı ölçek ve Şekil 3.3 farklı şekil parametreleri için Weibull dağılımını ve Şekil 3.4 güç yoğunluğu değişimini göstermektedir. Ayrıca Şekil 3.2’den de görülebileceği gibi şekil parametresi dağılımın tepe noktası ile ilgili iken ölçek parametresi dağılımın genişliği (ortalama rüzgar şiddeti) ile ilgilidir.



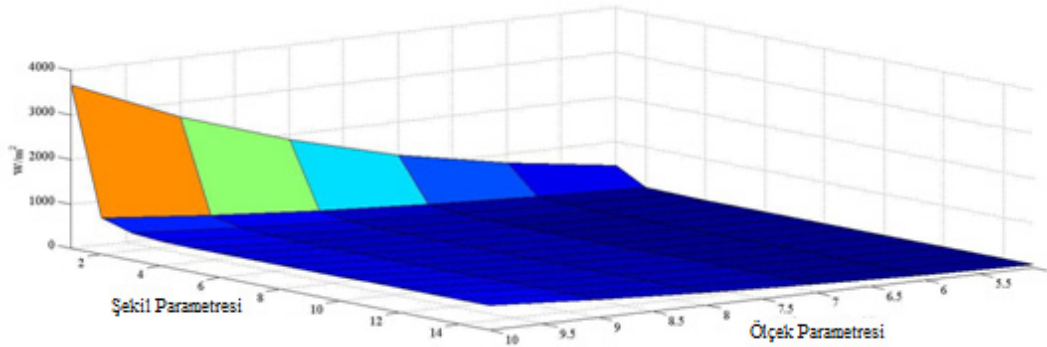
Şekil 3.2 : Farklı ölçek parametreleri için Weibull dağılımı.

Farklı şekil parametreleri için Weibull dağılımı ise Şekil 3.3’de gösterilmektedir.



Şekil 3.3 : Farklı şekil parametreleri için Weibull dağılımı.

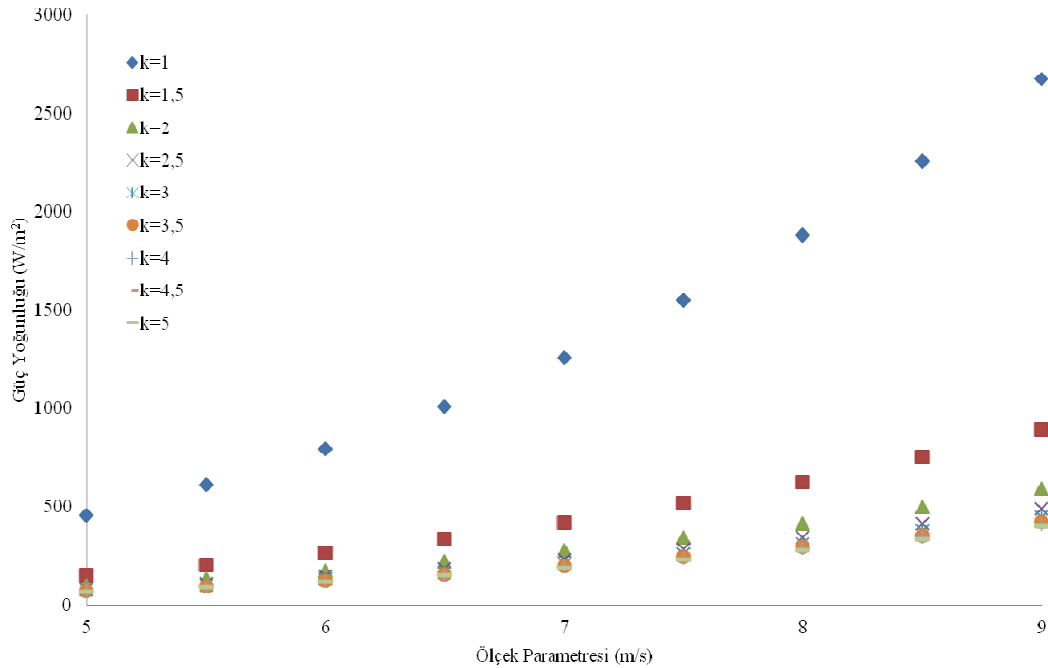
Weibull dağılımı parametrelerine göre güç yoğunluğu değişimi ise Şekil 3.4’de gösterilmektedir.



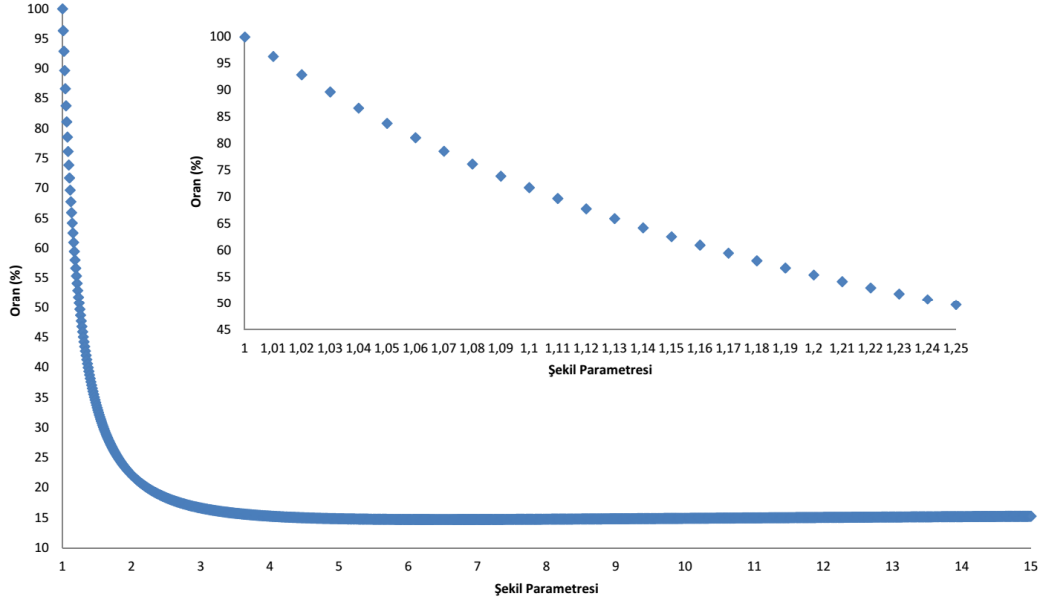
Şekil 3.4 : Weibull dağılımı güç yoğunluğu.

Şekil parametresi Weibull dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonunu davranışını belirgin olarak etkiler. Weibull dağılımı şekil parametresinin 3,6 olması durumunda simetrik olacaktır ve normal dağılıma benzeyecektir, şekil parametresinin birden küçük olma durumu için ters j-şeklinde olacaktır, şekil parametresinin bire eşit olma durumu için üstel olacak ve şekil parametresinin bir ile üç nokta altı arasında olması durumu için pozitif asimetric olacak ve şekil parametresinin üç nokta altıdan büyük olması durumunda negatif asimetric olacaktır. Ölçek parametresinin de dağılım olasılık yoğunluk fonksiyonunun davranışını etkiler. Örneğin, şekil parametresi sabit tutulurken ölçek parametresinin değerinin arttırılması, olasılık yoğunluk fonksiyonunun altındaki alan sabit olduğundan dağılımın tepe noktasının düşmesine ve dağılımın genişlemesine neden olur.

Daha önce de belirtildiği gibi dağılım parametrelerinin doğru olarak belirlenmesi rüzgar türbini enerji üretimi açısından önemlidir. Şekil 3.5 farklı ölçek ve şekil parametrelerine göre güç yoğunluğunu ayrıntılı olarak göstermektedir. Ölçek ve şekil parametresinde olan değişimin güç yoğunluğu üzerinde olan önemli etkisini Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Şekil 3.6'dan da görülebileceği gibi bazı durumlarda şekil parametresinde 0,01'lik değişim güç yoğunluğu tahmininde % 3,65 farka neden olabilmektedir.

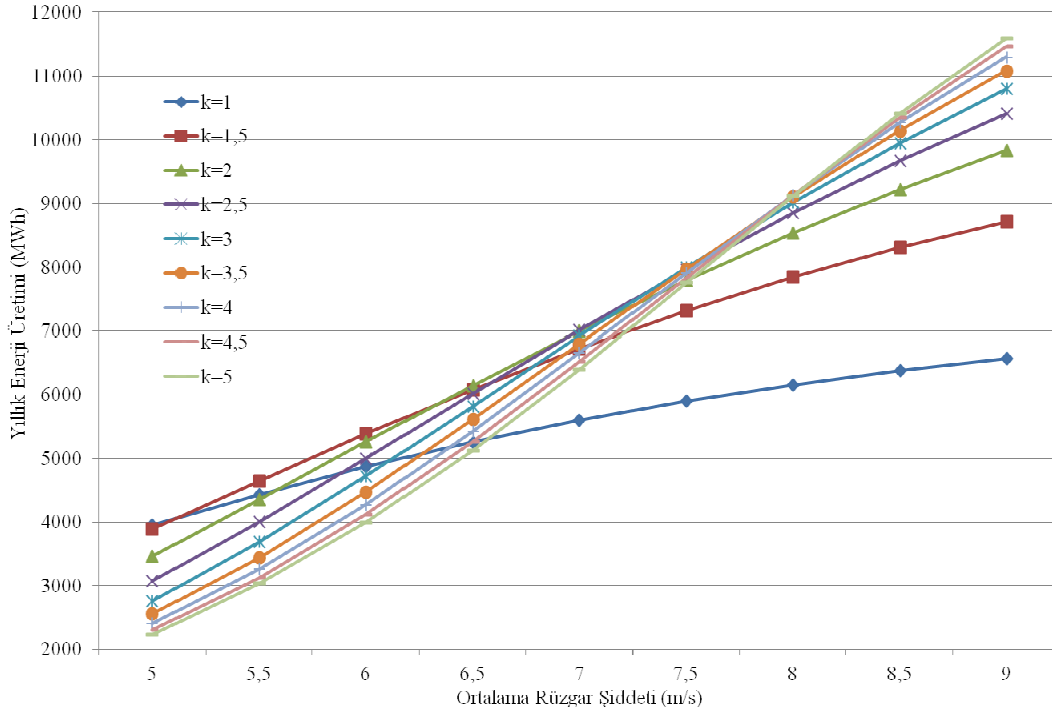


Şekil 3.5 : Farklı parametrelere göre Weibull dağılımı güç yoğunluğu.



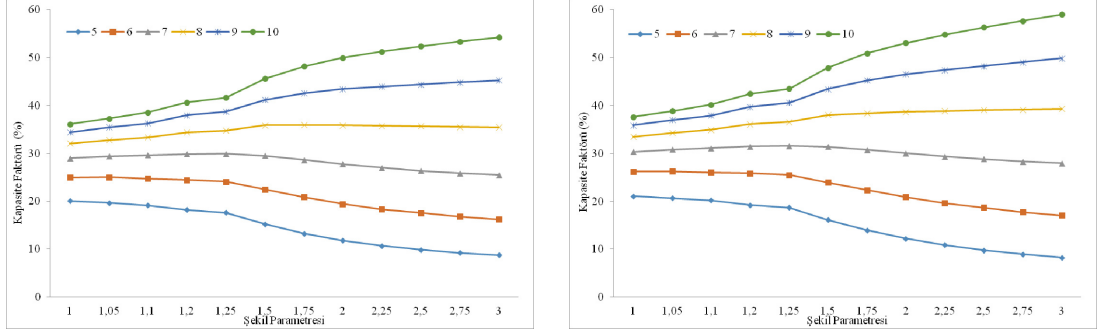
Şekil 3.6 : Şekil parametresinde değişimin güç yoğunluğuna etkisi.

Bununla birlikte parametrelerin belirlenmesinde yapılan hatalar enerji üretim tahminleri için de ciddi risk oluşturmaktadır. Aşağıda Şekil 3.7’de farklı şekil parametrelerinin aynı rüzgar şiddetinde rüzgar enerjisi üretimini göstermektedir.



Şekil 3.7 : Şekil parametresinin enerji üretimine etkisi.

Şekil 3.8 ile 750 kW ve 1600 kW gücünde iki rüzgar türbininin kapasite faktörüne ölçek ve şekil parametrelerinin etkisi gösterilmektedir.



Şekil 3.8 : Ölçek parametresinin kapasite faktörüne etkisi.

Şekil 3.8’den de görülebileceği gibi şekil parametresinin türbin kapasite faktörü üzerinde etkisini ölçek parametresi belirlemektedir.

Dağılım parametrelerinin hatasız olarak belirlenebilmesi için çeşitli parametre belirleme yöntemleri geliştirilmiştir. En sık kullanılan parametre belirleme metotları, Alternative Maximum Likelihood Metodu (AMLH), Graphical Metodu (GM), Justus Moment Metodu (JMM), Maximum Likelihood Metodu (MLH), Modified Maximum Likelihood Metodu (MMLH), Moment Metodu (MM), Power Density Metodu (PD) ve WAsP Metodu (WM)’dur. Parametre belirleme için geliştirilen her bir yöntemin avantajları ve dezavantajları vardır. Geliştirilen parametre belirleme yöntemleri literatür özetinde verilen çeşitli çalışmalarda karşılaştırılmıştır. Çalışmamın devamında literatürde sıklıkla kullanılan bu yöntemlere kısaca açıklanacaktır ve bu yöntemlerin karşılaştırması yapılacaktır. Buna ek olarak bu tez çalışması kapsamında önerilen ve yayınlanan yöntemler de ayrıntılı olarak incelenecektir.

3.1. Moment Yöntemi (MM)

Moment yöntemi literatürde uzun yıllardır kullanılan parametre belirleme yöntemidir. Moment yönteminde veri setinin momentleri ile dağılımın momentleri eşitlenip dağılım parametreleri belirlenmektedir.

Veri setinin ortalaması denklem 3.16 ile ifade edilebilir.

$$v_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (3.16)$$

Weibull dağılımının ortalaması, yani birinci momenti, aşağıdaki denklem 3.17 ve 3.18 ile ifade edilebilir.

$$v_m = \int_0^{\infty} v f(v) dv \quad (3.17)$$

$$v_m = c * \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (3.18)$$

Dağılımın genel moment ifadesi ise denklem 3.19 ve 3.20 ile ifade edilebilir.

$$m_n = \int_0^{\infty} v^n f(v) dv \quad (3.19)$$

$$m_n = c^n \Gamma\left(1 + \frac{n}{k}\right) \quad (3.20)$$

Standart sapma ise ile denklem 3.21 ifade edilebilir.

$$\sigma = \sqrt{(m_2 - v_m^2)} \quad (3.21)$$

Ortalama ve standart sapmanın oranı ise denklem 3.22 ile ifade edilebilir.

$$\frac{\sigma}{v_m} = \sqrt{\frac{\Gamma\left(1+\frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1+\frac{1}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1+\frac{1}{k}\right)}} \quad (3.22)$$

Şekil parametresi veri setinin ortalama ve standart sapmasının oranı belirlenip Weibull dağılımı şekil parametresi sayısal yöntemler kullanılarak belirlenir. Denklem 3.22'nin çözümü için aşağıdaki adımlar takip edilmelidir. Denklem 3.22'de $x = \frac{1}{k}$ dönüşümü yapılırsa aşağıdaki ifade elde edilir.

$$f(x) = \left(\frac{\sigma}{v_m}\right)^2 - \frac{\Gamma(1+2x) - \Gamma^2(1+x)}{\Gamma^2(1+x)} = 0 \quad (3.23)$$

Bu denklem 3.23'ün çözümünde Newton-Rapson iterasyon yöntemi kullanılabilir. Bu yöntem fonksiyonun bir kökünün belirlenmesinde faydalanan iterasyon metodudur. $f(x)$ fonksiyonunun türevi hesaplanarak şekil parametresi belirlenebilir. Kökün yaklaşık değeri x_0 . kökün gerçek değeri x_k ve x_k ile x_0 arasındaki fark h ise aşağıdaki denklem 3.24 ile ifade edilebilir.

$$x_k = x_0 + h \quad (3.24)$$

Bu durumda denklem tekrar düzenlenmesi sonucunda denklem 3.25 elde edilir.

$$f(x_k) = f(x_0 + h) = 0 \quad (3.25)$$

Olacaktır. x_0 civarında $f(x)$ fonksiyonu ikinci dereceye kadar Taylor serisi açılımı denklem 3.26 ile aşağıdaki gibi yapılabilir.

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + hf'(x_0) + \frac{h^2 f''(x_0 + \varepsilon h)}{2}, 0 < \varepsilon < 1 \quad (3.26)$$

Yazılır. Bu durumda $x_0 + h$ değerin gerçekte köke çok yakın olduğu $f(x_0 + h)$ 'in neredeyse sıfır olduğu kabul edilirse denklem 3.27 elde edilir.

$$f(x_0) + hf'(x_0) + \frac{h^2 f''(x_0 + \varepsilon h)}{2} = 0 \quad (3.27)$$

Küçük terimlerin ihmal edilmesi sonucunda denklem 3.28 elde edilir.

$$h = -\frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (3.28)$$

yazılabilir. Burada $h = x_k - x_0$ yazılıp ifade yeniden düzenlenmesi sonucunda denklem 3.29 elde edilir.

$$x_n = x_{n-1} - \frac{f_{n-1}}{f'_{n-1}} \quad (3.29)$$

Denklem ile ifade edilen fonksiyonun türevi aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir

$$f' = \frac{\partial f(x)}{\partial x} = \frac{\Gamma(1+2x)\Gamma(1+x) - 2\Gamma(1+2x)\Gamma'(1+x)}{\Gamma^3(1+x)} \quad (3.30)$$

$$\Gamma'() = \frac{\partial \Gamma()}{\partial x} \quad (3.31)$$

Gamma fonksiyonunun türevinin hesaplanması için Gamma fonksiyonu aşağıdaki denklem 3.32 ile seriye açılabilir.

$$\Gamma(x) = x^{(x-0.5)} e^{-x} \sqrt{2\pi} A(x) \quad (3.32)$$

$A(x)$ ise denklem 3.33 ile katsayıları ise denklem 3.34 ile gösterilmektedir.

$$A(x) = 1 + \frac{a_1}{x} + \frac{a_2}{x^2} + \frac{a_3}{x^3} + \frac{a_4}{x^4} + \dots \quad (3.33)$$

$$a_1 = \frac{1}{12}, a_2 = \frac{1}{288}, a_3 = -\frac{139}{51840}, a_4 = -\frac{571}{248832} \quad (3.34)$$

Parametrelerin belirlenmesi için kullanılabilecek algoritmalarından bir tanesi Şekil 3.9'da gösterilmektedir [228]. Gamma fonksiyonunun türevi ise denklem 3.35 ve 3.36 ile ifade edilebilir.

$$\hat{f}(x) = \frac{\sqrt{2\pi} x^x e^{-x}}{x} \left\{ -\frac{1}{2x} A(x) + A(x) \ln(x) + \frac{dA(x)}{dx} \right\} \quad (3.35)$$

$$\hat{f}(x) = \frac{\sqrt{2\pi} x^x e^{-x}}{x} \left\{ A(x) \left[\frac{1}{2x} + \ln(x) \right] + \frac{dA(x)}{dx} \right\} - \frac{\Gamma(x)}{x} \quad (3.36)$$

Denklem 3.37 ile de ölçek parametresi belirlenebilir.

$$c = \frac{v_m}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (3.37)$$

3.2. Justus Moment Yöntemi (JMM)

Literatürde genellikle moment yöntemi olarak tanınan Justus Moment Yöntemi denklem 3.22'nin amprik olarak çözülmesini ifade eden yöntemdir. Justus yönteminde denklem 3.22'nin çözümü için denklem 3.38 ile ifade edilen amprik ifade kullanılmaktadır.

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_m} \right)^{-1.086} \quad (3.38)$$

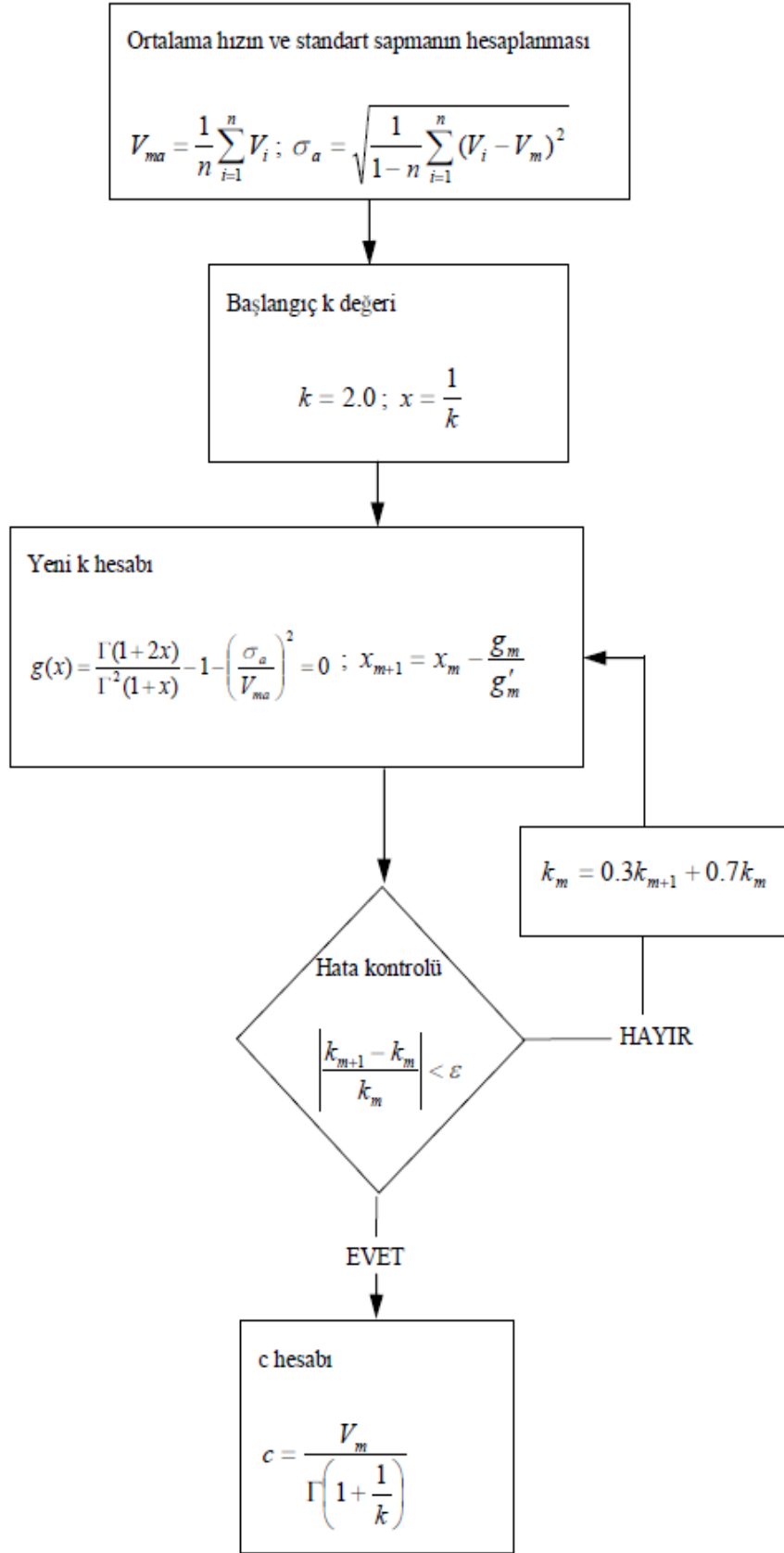
Ölçek parametresi ise Denklem 3.37 kullanılarak belirlenmektedir.

3.3. Grafik Yöntemi (GM) (LS) (LES)

Grafik yöntemi literatürde uzun süredir kullanılan dağılım parametre belirleme yöntemlerinden bir tanesidir. Denklem 3.1 ile ifade edilen Weibull dağılımının kümülatif fonksiyonunun iki kez logaritmasının alınması ile denklem 3.39 elde edilir.

$$\ln[-\ln[1 - F(v)]] = k \ln(v) - k \ln(c) \quad (3.39)$$

Şekil parametresini elde etmek için $\ln[-\ln[1 - F(v)]]$ ile $\ln(v)$ 'ye göre çizilmesi sonucunda oluşan doğrunun eğimi kullanılmaktadır. En küçük kareler yöntemi kullanılarak şekil ve ölçek parametreleri hesaplanır.



Şekil 3.9 : Moment yöntemi algoritması.

3.4. En Yüksek Olabilirlik Yöntemi (MLH)

En yüksek olabilirlik yöntemi Weibull dağılımının parametrelerini hesaplamada sıklıkla kullanılan yöntemlerinden biridir. Bu yöntem kullanılırken rüzgar şiddeti verileri $v_1, v_2 \dots v_n$ şeklinde n elemanlı bir küme oluşturmaktadır. Bir gözlemde $v = v_i$ olma olasılığı, $f(v_i; k; c)$ ile orantılıdır. Benzer bir şekilde $v = v_i \dots v = v_n$ olaylarının meydana gelme olasılığı da ifade edilebilir. Bu olaylarının meydana gelme olasılığı olabilirlik fonksiyonu aşağıdaki denklemler ile ifade edilebilir.

Denklem 3.40' da belirtilen çarpım ifadesinden denklemin her iki tarafın $\ln$ ifadesi alınarak elimine edilebiliriz. Böylece çarpım ifadesini toplam ifadesine dönüştürebiliriz ve aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$L(v_1, v_2, \dots, v_n, k, c) = \prod_{i=1}^n f(v_i; k, c) \quad (3.40)$$

$$L(v_1, v_2, \dots, v_n, k, c) = \frac{k^n}{c^{nk}} \prod_{i=1}^n (v_i)^{k-1} e^{-\left(\frac{1}{c^k} \sum_{i=1}^n (v_i)^k\right)} \quad (3.41)$$

$$\ln L = \left(\sum_{i=1}^n \ln [f(v_i)] \right) \quad (3.42)$$

$$\ln L = n (\ln k - k \ln c) + (k - 1) \ln \left(\prod_{i=1}^n (v_i) \right) - \left(\frac{1}{c^k} \sum_{i=1}^n (v_i)^k \right) \quad (3.43)$$

Denklem 3.43'ün k ve c 'ye göre türevleri alınıp sıfıra eşitlenirse denklemin en büyük yapan değerler elde edilebilir ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{\partial \ln L}{\partial c} = -\frac{nk}{c} + kc^{-(k+1)} \sum_{i=1}^n (v_i)^k = 0 \quad (3.44)$$

Ölçek parametresi ise denklem 3.44'ün kullanılması sonucunda aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$c = \left(\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k}{n} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (3.45)$$

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

$$\frac{\partial \ln L}{\partial k} = \frac{n}{k} + \sum_{i=1}^n (v_i)^k - n \frac{\sum_{i=1}^n (v_i)^k \ln v_i}{\sum_{i=1}^n (v_i)^k} = 0 \quad (3.46)$$

Denklem 3.46' den şekil parametresi aşağıdaki denklem 3.47'deki gibi çekilebilir.

$$k = \left(\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln v_i}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln v_i}{n} \right)^{-1} \quad (3.47)$$

Olabilirlik fonksiyonunu en büyük yapan k ve c değerleri bulunarak denklem 3.47 çözülmüş olur. Burada dikkat edilmesi gereken bir nokta $v_i = 0$ durumu için denklem 3.47 çözülemeyecektir. Bu nedenle veri setinden 0 değerlerinin çıkarılıp kullanılması ya da çok az olan sıfır verilerinin yerine ortalamayı değiştirmeyecek olan sıfır değerlerine çok az büyük bir değerin sıfır verileri yerine veri setine eklenerek çözüm gerçekleştirilebilir.

3.5. Modified Maximum Likelihood Metodu (MMLM)

Modified Maximum Likelihood Metodu, MLH metodunu geliştirilerek oluşturulmuştur. Şekil ve ölçek parametreleri denklem 3.48 ve denklem 3.49 denklemleri ile ifade edilmektedir.

$$k = \left(\frac{\sum_{i=1}^{nb} v_i^k \ln v_i f(v_i)}{\sum_{i=1}^{nb} v_i^k f(v_i)} - \frac{\sum_{i=1}^{nb} \ln v_i f(v_i)}{f(v \geq 0)} \right)^{-1} \quad (3.48)$$

$$c = \left(\frac{\sum_{i=1}^{nb} v_i^k f(v_i)}{f(v \geq 0)} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (3.49)$$

3.6. Alternatif Maximum Likelihood Metodu (AMLM)

MLH yönteminin iteratif yapıda olması nedeni ile AMLM yöntemi çeşitli kabuller altında yapılmıştır [153].

$$\beta = \frac{1}{n-1} \left[\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n v_i^m) * (\sum_{i=1}^n v_i^m) - 1 \right] \quad (3.50)$$

m pozitif bir sayıdır. β ortalama değeri aşağıdaki denklem 3.51 ile ifade edilebilir.

$$E(\beta) = \frac{\pi m}{k} \csc \left(\frac{\pi m}{k} \right) \quad (3.51)$$

β ortalama değeri şekil parametresinin bir fonksiyonudur ve denklem 3.52 ile ifade edilebilir.

$$E(\beta) = \frac{\pi m}{[k]} \csc\left(\frac{\pi m}{[k]}\right) \quad (3.52)$$

Denklem 3.51, 3.52 ve 3.53'in kullanılması sonucunda denklem 3.54 elde edilir.

$$\theta = \frac{\pi m}{[k]} \quad (3.53)$$

$$\frac{\sin(\theta)}{\theta} = \frac{1}{\beta} \quad (3.54)$$

Denklem 3.55 ile yapılan kabul altında denklem 3.56 ve denklem 3.57 elde edilmektedir.

$$\frac{\sin(\theta)}{\theta} \approx 1 - \frac{\theta^2}{6} \quad (3.55)$$

$$\theta = 6 \left[1 - \frac{1}{\beta}\right]^{0.5} \quad (3.56)$$

$$[k] = \pi m \left[6 - \frac{6}{\beta}\right]^{-0.5} \quad (3.57)$$

İki defa L'hospital kuralı uygulanması sonucunda denklem 3.58 elde edilmektedir.

$$[k] = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \left[\frac{n(n-1)}{n(\sum_{i=1}^n \ln^2(v_i)) - (\sum_{i=1}^n \ln(v_i))^2} \right]^{0.5} \quad (3.58)$$

3.7. WAsP Metodu (WM)

Weibull dağılımı parameter belirleme yöntemlerinden bir tanesi de WAsP metodudur. Bu metod WAsP programında ve Windographer programında kullanılmaktadır.

X değeri ortalama rüzgar şiddetinin üzerinde olan şiddetlerin oranını göstermektedir ve denklem 3.59 ile ifade edilebilir. Ortalama rüzgar şiddeti ise denklem 3.5 ile daha önce ifade edilmiştir. Denkleminde ortalama rüzgar şiddeti yerine yazılırsa denklem 3.60 elde edilir

$$X = 1 - F(v_m) \quad (3.59)$$

$$X = e^{[-\Gamma(1+\frac{1}{k})]^k} \quad (3.60)$$

Denklem 3.60'in ln'i alınırsa denklem 3.61 elde edilir.

$$-\ln(X) = \Gamma \left(1 + \frac{1}{k}\right)^k \quad (3.61)$$

Denklem 3.61 iteratif olarak çözülüp şekil parametresi belirlenebilir. Ölçek parametresi ise aşağıdaki denklem 3.62 ile belirlenebilir.

$$c = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i)^3}{\Gamma(1+\frac{3}{k})}} \quad (3.62)$$

3.8. PD Metodu

Weibull dağılımına göre ortalama rüzgar şiddeti aşağıdaki denklem 3.63 ile küplerin ortalaması ise denklem 3.64 ile ifade edilebilir.

Rüzgar şiddeti küplerin ortalamasının ortalama rüzgar şiddetinin küpüne oranı olan Energy Pattern Faktör (EPF) ise denklem 3.65 ve 3.66 ile ifade edilebilir.

$$v_m = c * \Gamma \left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (3.63)$$

$$v_m^3 = c^3 * \Gamma \left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (3.64)$$

$$EPF = \frac{\int_0^\infty v^3 f(v) dv}{\left(\int_0^\infty v f(v) dv\right)^3} \quad (3.65)$$

$$EPF = \frac{\Gamma(1+\frac{3}{k})}{\left(\Gamma(1+\frac{1}{k})\right)^3} \quad (3.66)$$

Akdağ ve Dinler tarafından şekil parametresini çözmek için önerilen amprik denklem ise aşağıdaki denklem 3.67 ile ifade edilmiştir.

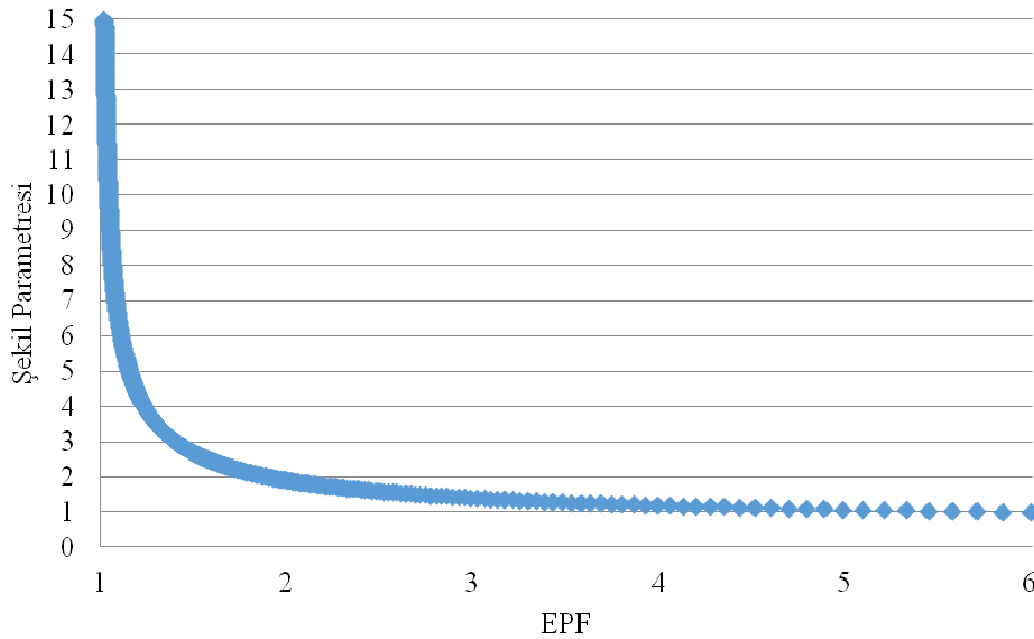
$$k = 1 + \frac{3,69}{EPF^2} \quad (3.67)$$

Ölçek parametresi ise denklem 3.37 ile ifade edilebilir.

Akdağ ve Dinler yapmış oldukları çalışmada denklem 3.66'nın nümerik çözümü ile önerdikleri çözüm yöntemini karşılaştırmışlar ve önerilen çözüm yönteminin kullanılabileceğini göstermişlerdir. Denklemin sayısal çözümü aynı zamanda Azad tarafından da incelenmiştir [138]. Literatürde birçok yöntemle karşılaştırılan PD yönteminin geçerliliği çeşitli araştırmacılar tarafından gösterilmiştir.

3.9. Yeni Enerji Pattern Factor Metodu (NEPFM)

Weibull parametre belirleme yöntemlerinden biri olan PD şekil parametresinin belirlenmesinde iyi sonuçlar vermesine rağmen şekil parametresinin belirli aralığı için iyi çözüm vermektedir. Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen Yeni Enerji Pattern Factor Metodu (NEPFM) ise PD metodunun bu sınırlarını ortadan kaldırmakta ve Şekil parametresinin 1 ile 15 arasında değişmesi durumuna göre Şekil parametresini çok yüksek doğruluk oranı ile belirlemektedir. EPF ile şekil parametresinin değişimi (1-15 arası) Şekil 3.10'da gösterilmektedir.



Şekil 3.10 : EPF ile şekil parametresinin değişimi.

Enerji Pattern Faktör daha önce de ifade edildiği gibi veri setinin küplerinin ortalamasının veri setinin ortalamasının küpüne bölümüdür. Rüzgar verisi için ise küplerin ortalamasının ortalama rüzgar şiddeti küplerine bölümüdür ve aşağıdaki denklem 3.67 ile ifade edilebilir.

$$EPF = \frac{\int_0^T v^3 dv}{T \left(\frac{1}{T} \int_0^T v dv \right)^3} \quad (3.67)$$

Denklem 3.73’de T ölçüm yapılan zaman periyodudur.

Veri setinin güç yoğunluğu denklem 3.68 ile ifade edilebilir.

$$P_{ts} = \frac{1}{2n} * \rho * \sum_{i=1}^n v^3_i \quad (3.68)$$

Denklem 3.74’de ρ hava yoğunluğunu ifade etmektedir ve standart yoğunluk 1,225 kg/m³’dür. Küplerin ortalaması ise güç yoğunluğu değeri biliniyorsa aşağıdaki denklem 3.69 ile ifade edilebilir.

$$v^3_m = \frac{2 * P_{ts}}{\rho} \quad (3.69)$$

Böylece veri seti, güç yoğunluğu ve ortalama rüzgar şiddeti bilinen bölgeler için EPF hesaplanabilir. Veri seti için hesaplanan EPF’nin Weibull dağılımı için de aynı olduğundan şekil parametresi belirlenebilir.

Şekil 3.8’de gösterilen grafiğe eğri uydurulması durumunda ve bu eğrinin denklemi şekil parametresinin EPF ile değişimini verecektir. Şekil parametresinin 1 ile 15 arasında olması durumunda 0,01’lik şekil parametresi artışlarına karşın EPF belirlenmiş ve eğri uydurma yöntemi kullanılarak şekil parametresi EPF cinsinden ifade edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışma kapsamında şekil parametresinin EPF cinsinden ifade edilebilmesi için 100’den fazla fonksiyon denenmiş ve çeşitli denklemler türetilmiştir. Hata değerleri düşük olan türetilen denklem ve bu denklemin hatası Çizelge 3.1’de sunulmaktadır. Tezin EK’inde olan CD içerisinde çeşitli denklemlerin de hata değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.1 : NEPFM modelleme hatası.

Yöntem	Hata
Rat44	0,005379

Weibull dağılımı şekil parametresinin Rat44 fonksiyonu cinsinden ifadesi denklem 3.70 ile gösterilmektedir.

$$k \approx \frac{a_4 E_{pf}^4 + a_3 E_{pf}^3 + a_2 E_{pf}^2 + a_1 E_{pf} + a_0}{b_4 E_{pf}^4 + b_3 E_{pf}^3 + b_2 E_{pf}^2 + b_1 E_{pf} + b_0} \quad (3.70)$$

Bu denklemin katsayıları ise Çizelge 3.2’de sunulmaktadır.

Çizelge 3.2 : Şekil parametresi için NEPFM metodu katsayıları.

a_0	-0,220374	b_0	-1,27285
a_1	3,27527	b_1	3,69115
a_2	- 5,78961	b_2	- 2,60973
a_3	2,15143	b_3	- 0,800468
a_4	0,590396	b_4	0,992007

Önerilen yöntemin uygunluğunun gösterilmesi için aşağıdaki hata analizleri kullanılmıştır. Bu hata analizlerine göre önerilen yöntemin uygunluğu ise aşağıdaki Çizelge 3.3 ile sunulmaktadır.

$$ME (\%) = \frac{100}{kn} * \sum_{i=1}^{kn} \frac{|k_{iestimated}-k_i|}{k_i} \quad (3.71)$$

$$MinE (\%) = 100 * Min \frac{|k_{iestimated}-k_i|}{k_i} \quad (3.72)$$

$$MaxE (\%) = 100 * Max \frac{|k_{iestimated}-k_i|}{k_i} \quad (3.73)$$

$$RMSE = \sum_{i=1}^{kn} \left(\frac{|k_{iestimated}-k_i|}{k_i} \right)^2 \quad (3.74)$$

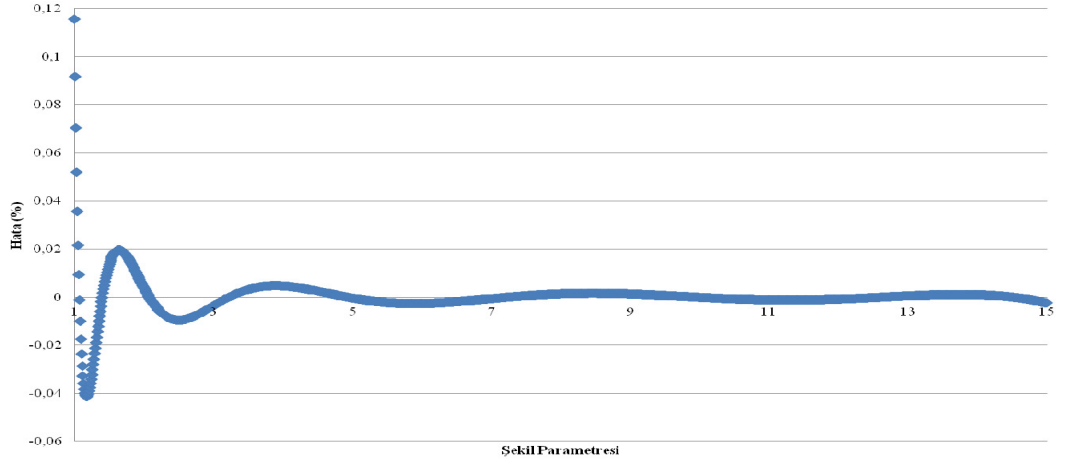
Çizelge 3.3 : NEPFM için hata analizi sonuçları.

Hata Testleri	Sonuçlar
$ME (\%)$	0,003062
$MaxE (\%)$	0,115717
$MinE (\%)$	$2,07*10^{-6}$
$RMSE$	$5,62*10^{-9}$

Çizelge 3.3’den de görülebileceği gibi en büyük hata oranı % 0,12’den daha küçük ve ortalama mutlak hata ise % 0,003062’dir.

Çizelge 3.3’den de görülebileceği gibi Rat44 fonksiyonun hata değerleri çok düşüktür. Rat44 fonksiyonu ile yapılan tahmin ile gerçek değer arasında olan hata (denklem 3.75) ise aşağıdaki Şekil 3.11’de gösterilmektedir.

$$Hata = 100 * \frac{(k_{i,egri} - k_{i,gerçek})}{k_{i,gerçek}} \quad (3.75)$$



Şekil 3.11 : NEPFM hata analizi.

Ölçek parametresini ise Denklem 3.37 ve $\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$ şekil parametresinin 1 ila 15 arasında değişimi dikkate alınarak Rat22 fonksiyonu ile aşağıdaki denklem 3.76 ile ifade edilebilir.

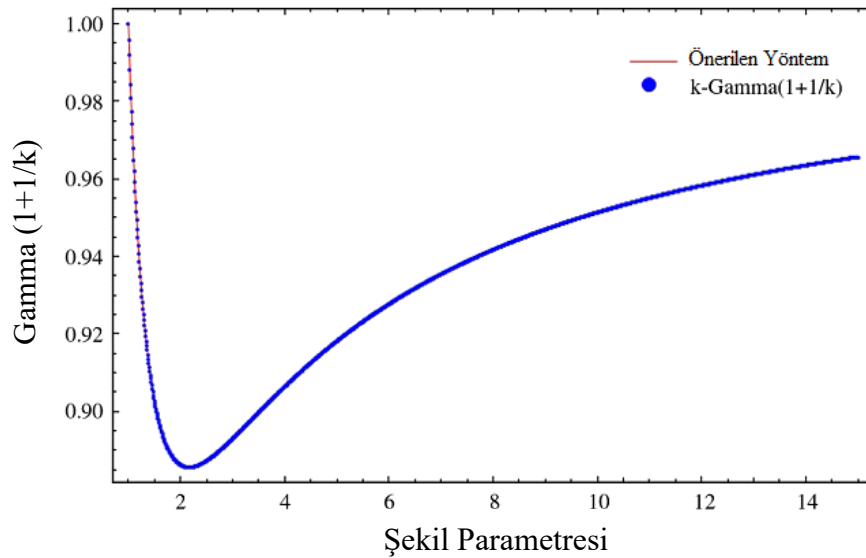
$$\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \approx \frac{k^2 + c_1 k + c_0}{k^2 + d_1 k + d_0}, 1 \leq k \leq 15 \quad (3.76)$$

Denklem 3.76'nın katsayıları ise aşağıdaki Çizelge 3.4'de gösterilmektedir.

Çizelge 3. 4 : Gamma fonksiyonu açılımı katsayıları.

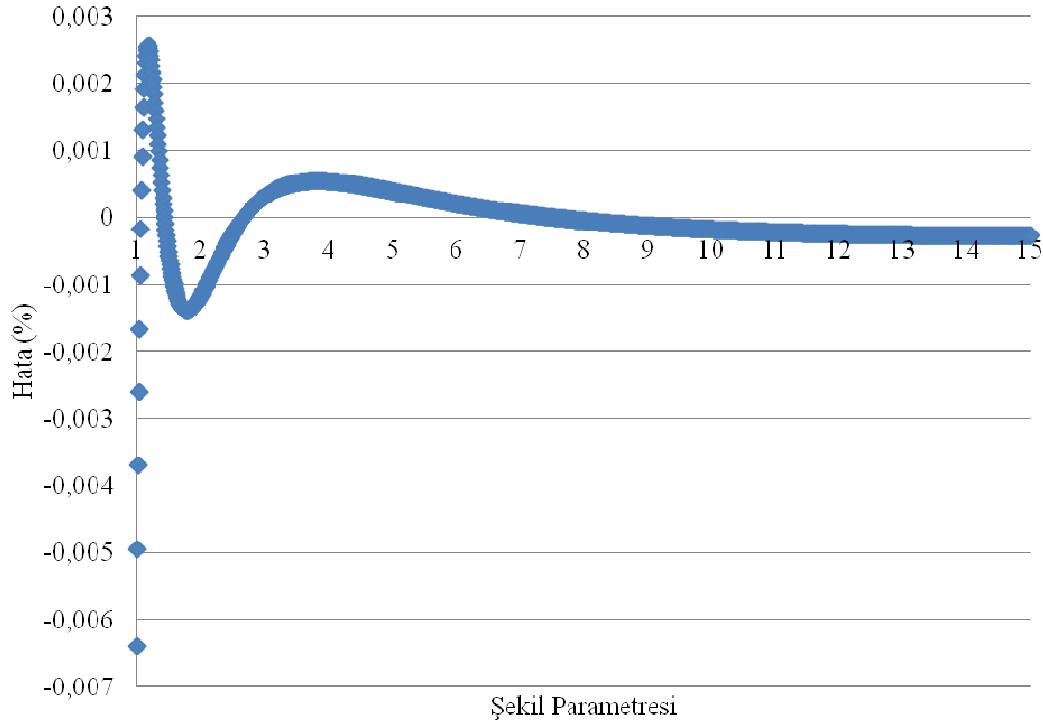
c_0	0,225761	d_0	-0,35144
c_1	0,134704	d_1	0,711818

Şekil 3.12 önerilen açılımın $\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$ ile değişimini göstermektedir.



Şekil 3.12 : Şekil parametresine göre Gamma fonksiyonu ve önerilen model.

Şekil 3.12’den de görülebileceği gibi önerilen fonksiyon yeterince doğrudur. Eğri uydurma sonucu oluşan hatalar Şekil 3.13’de sunulmuştur.



Şekil 3.13 : Gamma fonksiyonu açılım hatası.

Çizelge 3.5’de ise hata analizi sonuçları sunulmaktadır. Çizelge 3.5’de gösterildiği gibi hata analizi sonuçları kabul edilen sınırlar içerisindeydir. Gamma fonksiyonu için önerilen denklemin derecesi artırılıp başarısı yükseltilebilir fakat katsayı sayısı artacağından ve önerilen yöntemin hatasının kabul edilebilir olduğundan daha çok katsayılı bir yöntem önerilmemiştir.

Çizelge 3.5 : Hata analizi sonuçları $\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$ için.

Hata Testleri	Sonuçlar
<i>ME</i> (%)	0,03354
<i>MaxE</i> (%)	0,639488
<i>MinE</i> (%)	$5,09 \cdot 10^{-6}$
<i>RMSE</i>	$3,98 \cdot 10^{-4}$

Denklem 3.37 ve Denklem 3.76 kullanılması sonucunda ölçek parametresi denklem 3.77 ile ifade edilebilir.

$$c \approx \frac{v_m^*(k^2 + d_1 k + d_0)}{k^2 + c_1 k + c_0} \quad (3.77)$$

Akdağ ve Güler yapmış oldukları çalışmada, NEPFM yönteminin veri setine uygunluğunu Monte Carlo yöntemi ile üretmiş oldukları şekil parametresi için 1,25 ile 10 arasında 15 aralık değeri için ve ölçek parametresi için ise 5-10 arasında 6 değeri kullanarak üretmiş oldukları 90 veri setini incelemişler ve önerilen yöntemin doğruluğunu göstermişlerdir [144]. Yapılan çalışmada MSV hata analizi kullanılmıştır. Hata analizi sonuçları Çizelge 3.6 ile sunulmuştur. Çizelge 3.6'dan da görülebileceği gibi şekil parametresinin geniş bir aralığında ve ölçek parametresinin 5-10 arasında değişmesi durumunda yani neredeyse ölçülebilecek bütün yıllık ortalama rüzgar şiddetlerinde önerilen metot denenmiştir. Yapılan analiz sonuçlarına göre çalışma kapsamında önerilen yeni bir parametre belirleme metodu olan NEPFM yeterince doğru bir şekilde Weibull dağılımı parametrelerini belirleyebilmektedir. Ayrıca yapılan analize göre elde edilen en büyük hata % 0,3 seviyesindedir.

Çizelge 3.6 : MSV hata analizi sonuçları (%).

k (-)	c (m/s)					
	5	6	7	8	9	10
1,25	0,060945	0,301568	0,041089	0,055156	0,090931	0,056867
1,5	0,079014	0,060089	0,04904	0,044688	0,048334	0,013762
1,75	0,070184	0,031533	0,027042	0,071969	0,050686	0,032757
2	0,02742	0,020391	0,055753	0,027907	0,034045	0,038073
2,25	0,05076	0,002813	0,011992	0,002501	0,015123	0,020316
2,5	0,010154	0,026924	0,004437	0,026924	0,009903	0,020316
2,75	0,013508	0,005307	0,0095	0,00719	0,008742	0,006495
3	0,007654	0,011233	0,017242	0,012865	0,003542	0,006101
4	0,016538	0,006271	0,00641	0,005798	0,005302	0,006986
5	0,010358	0,009126	0,007235	0,010104	0,008248	0,008039
6	0,01272	0,012711	0,012266	0,012663	0,012459	0,0126
7	0,018828	0,018914	0,019458	0,019448	0,019998	0,020334
8	0,027866	0,028198	0,027722	0,028222	0,027294	0,027558
9	0,018828	0,018914	0,019458	0,019448	0,019998	0,020334
10	0,027866	0,028198	0,027722	0,028222	0,027294	0,027558

Buna ek olarak ülkemizde ölçülen Çizelge 3.7'de gösterilen 13 ölçüm noktasının rüzgar şiddeti verilerini kullanarak karşılaştırma yapmışlardır. Karşılaştırmada kullanılan veri setleri Ankara, Ayvalık, Belen, Biga, Datça, Gebze, Gökçeada, Karaman, Kırklareli, Kocadağ, Konya Raman ve Sinop'da ölçülmüştür. Ölçüm uzunluğu bir yıl ile üç yıl arasında değişmektedir. Ölçüm noktalarında ölçülen rüzgar şiddeti verilerinin ortalaması ise 3,66 m/s ile 7,25 m/s arasında değişmektedir.

Çizelge 3.7 : Ülkemizde ölçülen veri seti ile yapılan uygulama.

Bölge	Veri Sayısı	Mak Siddet (m/s)	Ortalama (m/s)	Ölçüm Dönemi	Ölçüm Sıklığı	Yükseklik (metre)
Ankara	52704	25,57	5,63777	2007-2008	10	30
Ayvalık	148854	21	4,33231	2006-2011	60	10
Belen	33365	21,82	6,98462	2004-2007	60	30
Biga	185071	19,89	4,83993	2007-2009	60	10
Datça	17107	20,76	5,57689	2001-2002	60	10
Gebze	50223	13,5	3,28547	2005-2006	10	10
Gökçeada	8734	23,25	7,2489	2002	60	10
Karaman	8653	21,73	4,30988	2005	60	10
Kırklareli	14547	19,12	4,70042	2005-2007	60	10
Kocadağ	17515	16,19	3,66239	1999-2000	60	10
Konya	51927	21,55	4,90025	2005-2006	10	10
Raman	48175	22,22	4,02485	2004-2005	10	10
Sinop	17498	13,56	4,41037	1999-2000	30	10

Çalışmada karşılaştırılan metodlar GM, MLH, AMLH, MMLH, JMM, MM, PD, WM ve NEPFM metodlarıdır. Çalışma sonucu belirlenen şekil ve ölçek parametreleri ile hata analizi sonuçları aşağıda ki çizelgelerde sunulmaktadır. Güç yoğunluğunu belirleyen bir diğer faktör de şekil parametresidir.

Çizelge 3.8 : Şekil parametresi.

Bölge	GM	MLH	AMLH	MMLH	JMM	MM	PD	WM	NEPFM
Ankara	1,42592	1,37848	1,32184	1,37906	1,46315	1,44154	1,47895	1,582130	1,479458
Ayvalık	1,35197	1,26979	1,36592	1,26899	1,26604	1,2504	1,29289	1,190220	1,276034
Belen	1,91868	1,93118	1,5869	1,94864	2,04752	2,025	2,12721	2,407438	2,115725
Biga	1,74836	1,69292	1,72893	1,67816	1,71069	1,68632	1,69878	1,626475	1,696711
Datça	1,62462	1,50042	1,16936	1,59048	1,73014	1,70572	1,80586	2,119664	1,799938
Gebze	1,75196	1,69665	1,68608	1,6854	1,73172	1,7073	1,72618	1,685814	1,723161
Gökçeada	1,70603	1,69406	1,64245	1,69299	1,73867	1,71424	1,74474	1,809683	1,741056
Karaman	1,42847	1,38797	1,33733	1,40732	1,44569	1,42446	1,4454	1,515741	1,444781
Kırklareli	1,73553	1,75933	1,68612	1,76751	1,79475	1,77034	1,75072	1,695878	1,746819
Kocadağ	1,83211	1,88474	1,8453	1,86831	1,91631	1,89247	1,90296	1,968808	1,893774
Konya	1,58155	1,51993	1,33904	1,56567	1,61311	1,5893	1,60538	1,629129	1,605864
Raman	1,55775	1,6149	1,63128	1,62471	1,6123	1,58851	1,54228	1,469379	1,543467
Sinop	1,99487	1,9489	1,8056	1,95603	1,99849	1,9754	2,00612	2,010226	1,994647

Şekil 3.16'dan da görülebileceği gibi bazı durumlarda şekil parametresinin 0,01 hatalı hesaplanması güç yoğunluğunun belirlenmesinde % 3 hataya neden olmaktadır. Ölçek parametresi ortalama rüzgar şiddeti ile orantılıdır ve güç yoğunluğu üzerinde küpsel bir etkisi vardır.

Çizelge 3.9 : Ölçek parametresi.

Bölge	GM	MLH	AMLH	MMLH	JMM	MM	PD	WM	NEPFM
Ankara	5,85335	6,15167	6,07812	6,1537	6,2254	6,21269	6,23415	6,48800	6,234397
Ayvalık	4,60534	4,67907	4,8002	4,68068	4,66476	4,65182	4,68557	4,39499	4,672786
Belen	7,07656	7,81115	7,53672	7,82591	7,88414	7,88293	7,88657	8,17000	7,886314
Biga	5,34536	5,42767	5,45656	5,41861	5,42673	5,42139	5,42418	5,30900	5,423651
Datça	5,62485	6,09425	5,76593	6,17546	6,25755	6,25183	6,27218	6,66300	6,271097
Gebze	3,60385	3,67973	3,67412	3,68225	3,68667	3,68332	3,68594	3,64700	3,685478
Gökçeada	7,96622	8,11263	8,05256	8,11683	8,13606	8,12886	8,13775	8,27900	8,136621
Karaman	4,62493	4,71292	4,66213	4,73612	4,7513	4,74122	4,75117	4,89700	4,75088
Kırklareli	5,37489	5,27042	5,21748	5,28134	5,28485	5,28112	5,27783	5,20400	5,277076
Kocadağ	4,14747	4,12314	4,10391	4,11995	4,12836	4,12674	4,12748	4,18800	4,126778
Konya	5,31371	5,40551	5,23646	5,44904	5,46956	5,4621	5,4672	5,51000	5,46729
Raman	4,71683	4,49595	4,50839	4,50819	4,49225	4,48611	4,47268	4,34100	4,473014
Sinop	4,88577	4,96151	4,88439	4,96921	4,9765	4,97535	4,97684	4,99000	4,976263

Yapılan MSV hata analizi sonucu aşağıda olan çizelge 3.10’da gösterilmektedir.

Çizelge 3.10 : MSV hata analizi sonuçları (%).

Bölge	GM	MLH	AMLH	MMLH	JMM	MM	PD	WM	NEPFM
Ankara	9,0150	4,4564	7,4641	4,4592	0,8607	1,3501	0,5228	1,4667	0,5249
Ayvalık	9,6909	0,8605	4,0741	0,9179	0,8077	1,2977	1,5719	3,1251	0,5109
Belen	15,8735	2,6071	11,2456	2,3837	1,1874	1,4221	0,7607	1,7280	0,5339
Biga	4,9412	0,2090	0,5469	0,5166	0,5804	0,2509	0,1792	1,1917	0,1112
Datça	14,1619	9,1470	36,2439	5,8275	1,8263	2,2186	1,0070	2,6917	0,8358
Gebze	5,5722	0,6678	0,8908	1,2602	0,4357	0,3760	0,2549	0,6931	0,1585
Gökçeada	3,0255	1,1669	2,3643	1,2815	0,2717	0,6333	0,3703	0,6953	0,2550
Karaman	4,4058	2,4836	4,9550	1,8235	0,3387	0,7482	0,3242	1,1898	0,2935
Kırklareli	4,4247	0,5296	1,0182	0,4988	1,2656	0,5363	0,2702	0,5236	0,2167
Kocadağ	2,9902	0,1287	0,6926	0,5117	0,5954	0,0215	0,2530	0,8337	0,0157
Konya	4,5251	2,6861	11,1602	1,3191	0,4725	0,4653	0,1828	0,2186	0,1945
Raman	10,9619	2,2348	2,5895	2,3152	2,2253	1,3232	0,5726	0,9254	0,5385
Sinop	3,7233	0,6413	2,8381	0,6621	0,2162	0,3271	0,3913	0,1390	0,1296

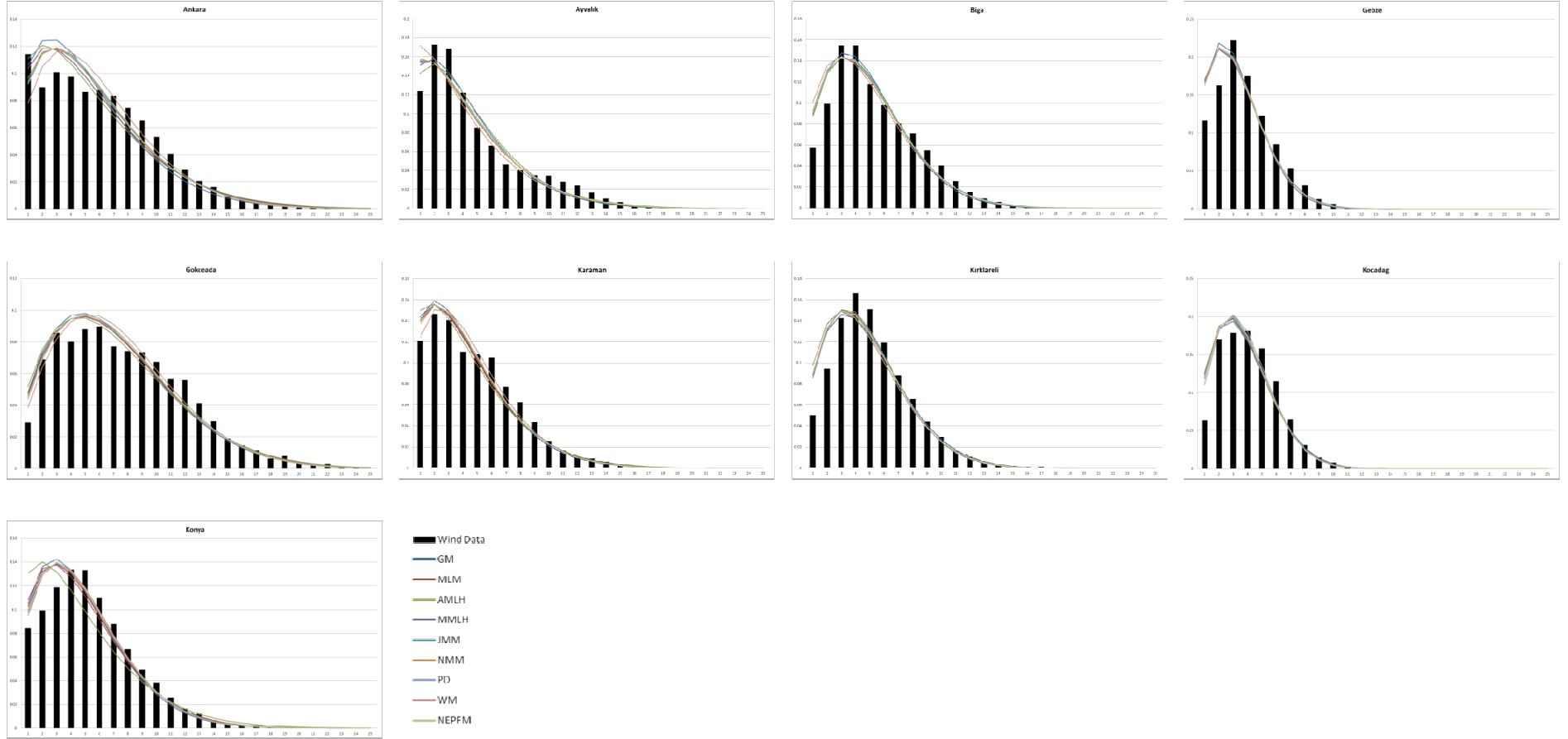
Yapılan hata analizi sonucunda Çizelge 3.10'dan da görülebileceği gibi bu tez çalışmasında parametre belirleme yöntemi olarak önerilen NEPFM yöntemi MSV hata analizine göre diğer parametre belirleme yöntemleri ile karşılaştırıldığı zaman parametre belirleme yöntemi olarak kabul edilebilir olduğunu sonucuna varılmaktadır. Örnek bölgelerin rüzgar şiddeti dağılımı ve çalışmada kullanılan Weibull dağılımı sonuçları aşağıdaki Şekil 3.14’de gösterilmektedir. Şekil 3.14’den de görülebileceği gibi bu tez çalışması kapsamında önerilen yöntemlerden bir tanesi

olan NEPFM yüksek doğrulukla parametre belirleyebilmektedir. Bunun yanında PD, JMM ve WM kullanılması sonucu oluşan hatalarda NEPFM sonuçlarına yakındır.

Çalışmanın sonucunda NEPFM'nın parametre belirlemek için kullanılabilecek bir yöntem olduğunu göstermiştir. Yapılan analizler NEPFM parametre belirlemede kullanılabilecek bir metot olduğunu göstermiştir.

Daha önceden de ifade edildiği gibi parametrelerin doğru belirlenmesi tahmin edilen güç yoğunluğunu, rüzgar türbinleri enerji üretimin tahminini, bölge için seçilecek en uygun rüzgar türbinini ve bölgenin rüzgar karakteristiğinin analizi için önemlidir. Bu nedenle dağılım parametreleri en doğru şekilde belirlenmelidir. Bunlara ek olarak Weibull dağılımı literatürde farklı alanlarda kullanılan önemli dağılımlardan bir tanesidir ve birçok alan için parametrelerin belirlenmesi önemlidir.

frekans (%)



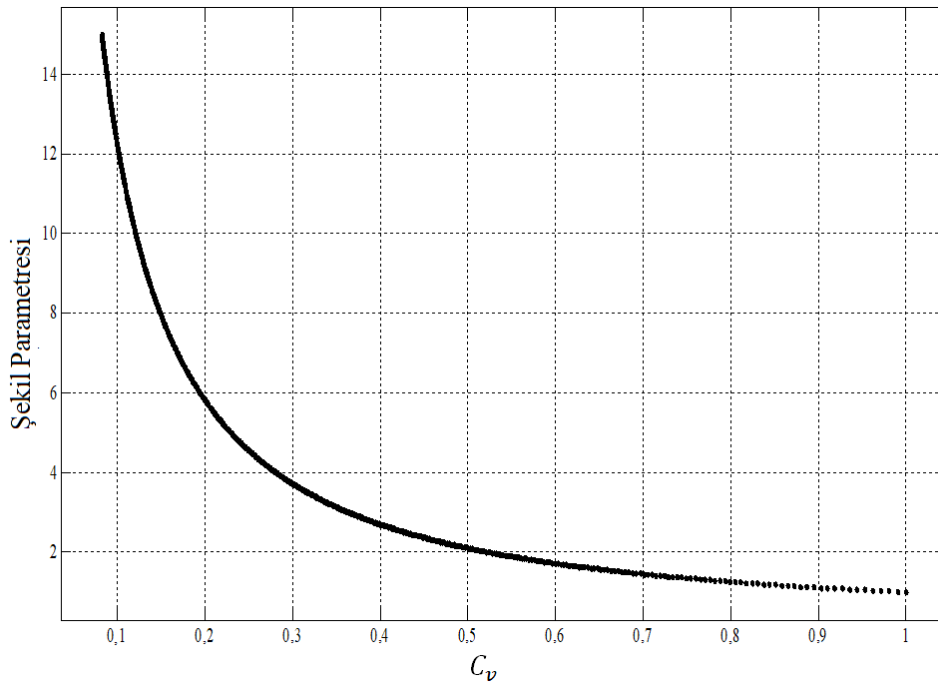
Şekil 3.14 : Bölgelerin frekans dağılımı.

3.9 Alternatif Moment Yöntemi (AMM)

Alternatif moment yöntemi Justus tarafından geliştirilen yöntemin şekil parametresi değerini 1 ile 15 arasında olması durumu için çıkarılmıştır. Weibull dağılımı coefficient of variation aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$C_v = \sqrt{\frac{\Gamma\left(1+\frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1+\frac{1}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1+\frac{1}{k}\right)}} \quad (3.78)$$

Şekil parametresinin 1 ile 15 arasında değişmesinin C_v 'ye göre çizilmesi durumunda Şekil 3.15 elde edilir.



Şekil 3.15 : Şekil parametresinin C_v göre değişimi.

Şekil 3.15'de gösterilen grafiğe eğri uydurulması durumunda ve bu eğrinin denklemi şekil parametresinin C_v ile değişimini verecektir. Şekil parametresinin 1 ile 15 arasında olması durumunda 0,01'lik şekil parametresi artışlarına karşın C_v belirlenmiş ve eğri uydurma yöntemi kullanılarak şekil parametresi C_v cinsinden ifade edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışma kapsamında şekil parametresinin C_v cinsinden ifade edilebilmesi için 100'den fazla fonksiyon denenmiş ve çeşitli denklemler türetilmiştir. Hata değerleri düşük olan türetilen denklem için ve bu denklemlerin hataları Çizelge 3.11'de sunulmaktadır.

Çizelge 3.11 : AMM hata analizi.

Hata Testleri	Sonuçlar
<i>ME</i> (%)	$3.53*10^{-7}$
<i>MaxE</i> (%)	$1.63*10^{-5}$
<i>MinE</i> (%)	0
<i>RMSE</i>	$9*10^{-17}$

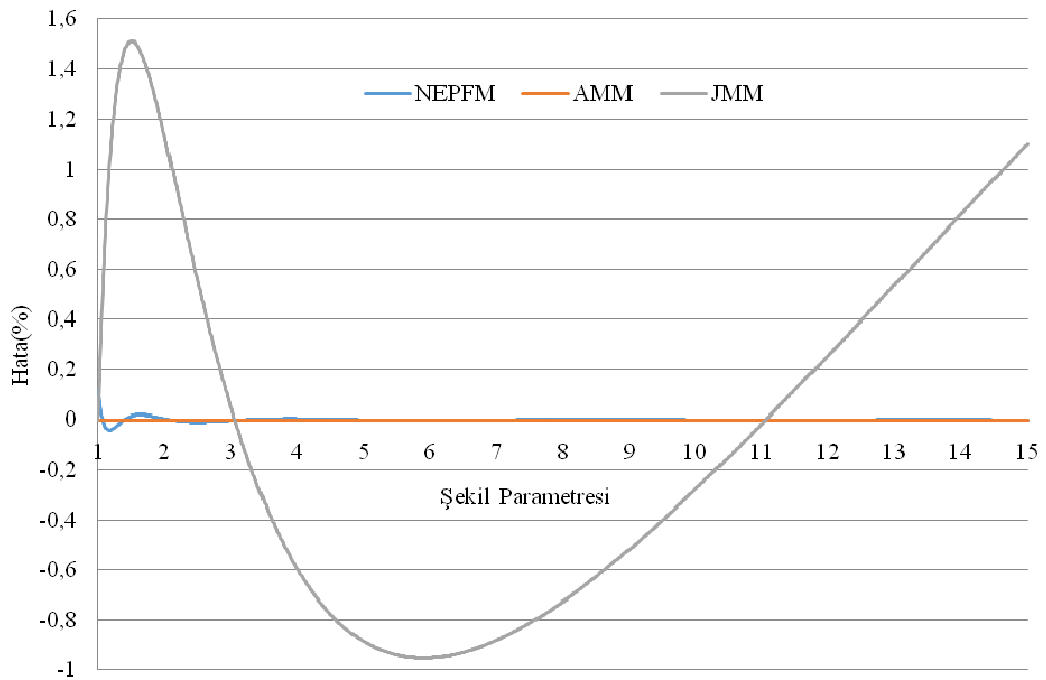
Şekil parametresi denklem 3.79 ile ifade edilebilir [229] ve bu denklemin katsayıları Çizelge 3.12'de sunulmaktadır. Çizelge 3.12 ile AMM yönteminin hata analizi gösterilmiştir diğer yöntemlerin hata analiz sonuçları ise tezin EK'inde olan CD içerisinde sunulmaktadır.

$$k \approx \frac{a_4 C_v^4 + a_3 C_v^3 + a_2 C_v^2 + a_1 C_v + a_0}{b_4 C_v^4 + b_3 C_v^3 + b_2 C_v^2 + b_1 C_v + b_0} \quad (3.79)$$

Çizelge 3.12 : AMM şekil parametresi için katsayılar.

a_0	2,94843	b_0	$3,20694*10^{-7}$
a_1	1,50722	b_1	2,29887
a_2	2,56734	b_2	2,48525
a_3	0,903164	b_3	2,35103
a_4	0,208995	b_4	1

Şekil 3.16 ise AMM, NEPFM ve JMM şekil parametresine göre % olarak hatalarını göstermektedir.



Şekil 3.16 : Yöntemlerin karşılaştırılması.

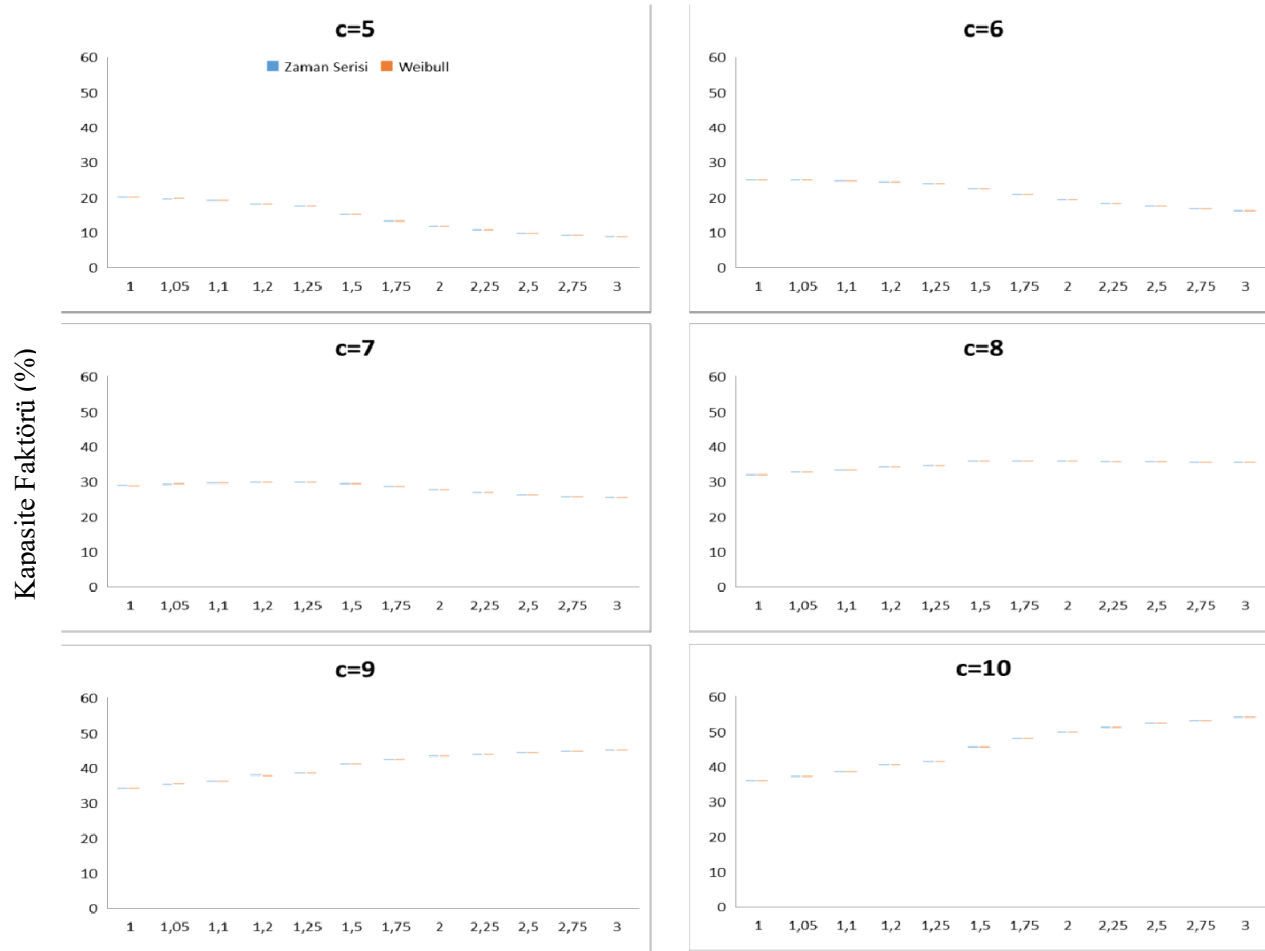
Şekil 3.16'dan da görülebileceği gibi gerek AMM gerekse de NEPFM şekil parametresini yeterinde doğru olarak geniş bir aralıkta hesaplayabilmektedir. Bununla birlikte literatürle sıklıkla kullanılan JMM metoduna göre bu tez çalışmasında önerilen AMM ve NEPFM metotları parametre belirlemede daha iyi sonuçlar vermektedir.

Akdağ ve Güler [229] yapmış oldukları çalışmada Monte Carlo simülasyonu kullanarak ürettikleri 72 veri setini kullanarak 750 kW ile 1600 kW gücünde iki rüzgar türbinin enerji üretimini belirlemişler ve AMM yöntemine göre hesaplanan enerji üretimi ile karşılaştırmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre zaman serisi yöntemine göre olan enerji üretim farkları % 0,18'den daha azdır. Zaman serisi ve Weibull yaklaşımı enerji üretimi aşağıdaki Şekil 3.17-3.18'de gösterilmektedir. Ayrıca İspanya'da 16 ölçüm noktasının verilerini MLH yöntemine göre inceleyen çalışma [179] ile karşılaştırmışlardır, sonuçları Çizelge 3.13'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.13 : AMM ve MLH yöntemlerini 16 bölge için karşılaştırılması.

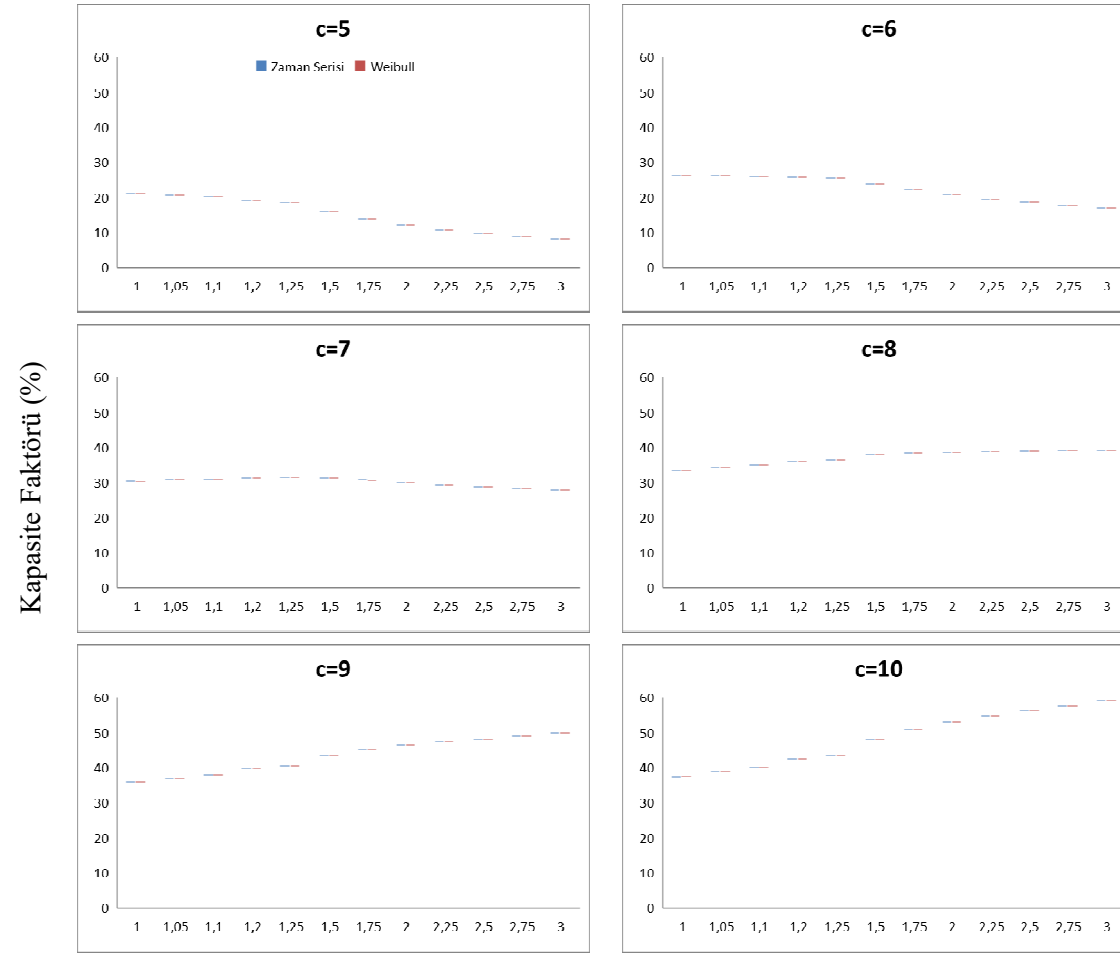
İstasyon	Ort.	Varyans	Küp Ort.	AMM k	AMM c	AMM GY Hatası (%)	MLH k	MLH c	MLH GY Hatası (%)
1	7,94	12,66	816,58	2,374	8,958	0,532	2,365	8,968	1,149
2	5,39	7,14	278,59	2,121	6,086	1,446	2,096	6,079	2,226
3	6,28	8,65	419,57	2,260	7,090	0,756	2,278	7,063	1,011
4	6,98	10,02	547,4	2,343	7,877	2,963	2,442	8,002	4,784
5	7,68	15,42	815,5	2,050	8,669	3,557	2,071	8,902	10,971
6	5,95	8,91	372,73	2,094	6,718	3,260	2,125	6,899	10,255
7	5,86	7,09	327,75	2,338	6,613	1,935	2,438	6,738	4,59
8	8,78	13,78	1028,1	2,534	9,892	2,848	2,822	10,129	3,942
9	6,23	9,6	415,72	2,114	7,034	5,323	2,202	7,344	15,541
10	7,95	17,43	919,46	1,990	8,970	4,909	1,94	9,206	16,651
11	6,32	10,89	459,17	2,002	7,132	4,870	1,979	7,395	18,407
12	7,92	16,64	888,16	2,033	8,939	5,107	2,052	9,263	15,888
13	6,95	15,04	663,73	1,860	7,826	4,249	1,772	8,04	20,26
14	4,28	5,73	155,41	1,856	4,819	4,275	1,826	4,97	16,714
15	9,69	28,02	1733,5	1,905	10,921	5,446	1,92	11,346	17,143
16	5,55	9,31	332,45	1,891	6,254	4,097	1,894	6,375	10,045

Önerilen AMM metodu güç yoğunluğu belirlemede MLH yöntemine göre güç yoğunluğunu daha az hata ile belirlemektedir. Yapılan hata analizlerinin gösterdikleri değerlendirildiğinde, bu tez çalışması kapsamında önerilen AMM yöntemi şekil parametresini belirlemek için uygun bir yöntem olduğu ortaya çıkmaktadır.



Şekil Parametresi

Şekil 3.17 : 750 kW türbinin zaman serisi ve Weibull dağılımı kapasite faktörü.



Şekil 3.18 : 1600 kW türbinin zaman serisi ve Weibull dağılımı kapasite faktörü.

3.10. Kullanılan Diğer Dağılımlar

Bu tez çalışması kapsamında Weibull dağılımı ve 60 standart dağılım kullanılmıştır. Analizler kapsamında kullanılan diğer dağılımlar; Beta, Burr, Burr (4P), Cauchy, Chi-Squared, Chi-Squared (2P), Dagum, Dagum (4P), Erlang, Erlang (3P), Error, Error Function, Exponential, Exponential (2P), Fatigue Life, Fatigue Life (3P), Frechet, Frechet (3P), Gamma, Gamma (3P), Gen. Extreme Value, Gen. Gamma, Gen. Gamma (4P), Gen. Logistic, Gen. Pareto, Gumbel Max, Gumbel Min, Hypersecant, Inv. Gaussian, Inv. Gaussian (3P), Johnson SB, Johnson SU, Kumaraswamy, Laplace, Levy, Levy (2P), Logistic, Log-Logistic, Log-Logistic (3P), Lognormal, Lognormal (3P), Log-Pearson 3, Normal, Pareto, Pareto 2, Pearson 5, Pearson 5 (3P), Pearson 6, Pearson 6 (4P), Pert, Power Function, Rayleigh, Rayleigh (2P), Reciprocal, Rice, Student's t, Triangular, Wakeby, Weibull, Weibull (3P) dağılımlarıdır. Parametrelerin belirlenmesi için Easyfit programı kullanılmıştır. Bunlara ek olarak ilerleyen bölümlerde entropi dağılımları (MEP3, MEP4, MEP5) ve karışım dağılımları gerçek bir bölgenin enerji üretim analizi için kullanılacaktır. Burada kullanılan dağılımların olasılık yoğunluk fonksiyonları literatürde bulunduğu için tek tek yazılmayacaktır. Dağılım parametrelerini belirlemek için, entropi dağılımları hariç, MLH yöntemi kullanılmıştır.

Bu çalışma kapsamında kullanılan dağılımların bir kısmı literatürde ilk defa rüzgar veri setine uygulanmaktadır. Bununla birlikte rüzgar verilerinin olasılık yoğunluk fonksiyonlarını modellemek için çeşitli farklı polinomlar ve fonksiyonlar da kullanılan çalışmalar vardır fakat kullanılan fonksiyonların bir bölümünde olasılık yoğunluk fonksiyonunun altında kalan alan bire eşit olmamaktadır. Bu nedenle bu çalışma kapsamında bu fonksiyonlara yer verilmemiştir.

3.11. Uygulama

Tez çalışmanın bu bölümünde eski adı ile Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) yeni adı ile Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü olan kurum tarafından 10 ve 30 metre yükseklikte ölçülen rüzgar şiddeti verileri kullanılarak bu ölçüm noktaları için en uygun dağılımlar incelenecektir. Çalışmada kullanılan veri seti ülkemizin farklı bölgelerinin rüzgar karakteristiklerini temsil edebilmesi açısından, 7 bölgede olan 13 ilin rüzgar şiddeti verileri kullanılmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Verilerin

analizi sırasında Beta, Burr, Burr (4P), Cauchy, Chi-Squared, Chi-Squared (2P), Dagum, Dagum (4P), Erlang, Erlang (3P), Error, Error Function, Exponential, Exponential (2P), Fatigue Life, Fatigue Life (3P), Frechet, Frechet (3P), Gamma, Gamma (3P), Gen. Extreme Value, Gen. Gamma, Gen. Gamma (4P), Gen. Logistic, Gen. Pareto, Gumbel Max, Gumbel Min, Hypersecant, Inv. Gaussian, Inv. Gaussian (3P), Johnson SB, Kumaraswamy, Laplace, Levy, Levy (2P), Logistic, Log-Logistic, Log-Logistic (3P), Lognormal, Lognormal (3P), Log-Pearson 3, Normal, Pareto, Pareto 2, Pearson 5, Pearson 5 (3P), Pearson 6, Pearson 6 (4P), Pert, Power Function, Rayleigh, Rayleigh (2P), Reciprocal, Rice, Student's t, Triangular, Wakeby, Weibull, Weibull (3P) dağılımları kullanılmıştır. Bu çalışmada dağılımların parametrelerinin belirlenmesinde Easyfit programı ve MLH yöntemi kullanılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan ölçüm noktaları, ölçüm bölgeleri, rüzgar ölçüm periyodu, veri sayısı ve ortalama rüzgar şiddeti Çizelge 3.14’de verilmiştir.

Çizelge 3.14 : Ölçüm noktaları ile ilgili bilgiler.

Ölçüm yeri	Bölgesi	Ölçüm Dönemi	Veri sayısı	Ort Rüzgar Şiddeti (m/s)
Ankara	İç Anadolu	2007	52704	5,64
Ayvalık	Marmara	2006-2010	148854	4,33
Belen	Akdeniz	2004-2007	33365	6,98
Biga	Marmara	2007-2010	185071	4,84
Datça	Ege	2001-2002	17107	5,58
Sinop	Karadeniz	1999-2000	17498	4,41
Gebze	Marmara	2005-2006	50223	3,28
Gokceada	Marmara	2001	8734	7,25
Karaman	İç Anadolu	2005	8653	4,31
Kirklareli	Marmara	2005-2007	14547	4,70
Kocadağ	Doğu Anadolu	1999-2000	17515	3,66
Konya	İç Anadolu	2005	51927	4,90
Raman	G. Doğu Anadolu	2005	48175	4,02

Frekans dağılımlarından da görülebileceği gibi bölgelerin frekans dağılımları tek tip değildir. Bu çalışma kapsamında kullanılan dağılımların parametreleri ise EK’te CD içerisinde sunulmuştur. Dağılımların çeşitli uygunluk testlerine göre de analizi yapılmış bölge rüzgar karakteristiğine en uygun dağılım belirlenmeye çalışılmıştır. Ölçülen veri seti histogramı ile kullanılan dağılımların frekans dağılımları görsel olarak da sunulmuştur.

Ankara bölgesinde ölçülen veri seti için dağılımların gerçek frekans dağılımı Şekil 3.19’da sunulmuştur.

Dağılımların hata analizi sırasında Kolmogorov-Smirnov (K-S), Anderson Darling (A-D) ve Chi-Squared testleri kullanılmıştır. Çizelge 3.15'de hata analizi sonuçları sunulmuştur.

Çizelge 3.15 : Ankara hata analizi sonuçlar.

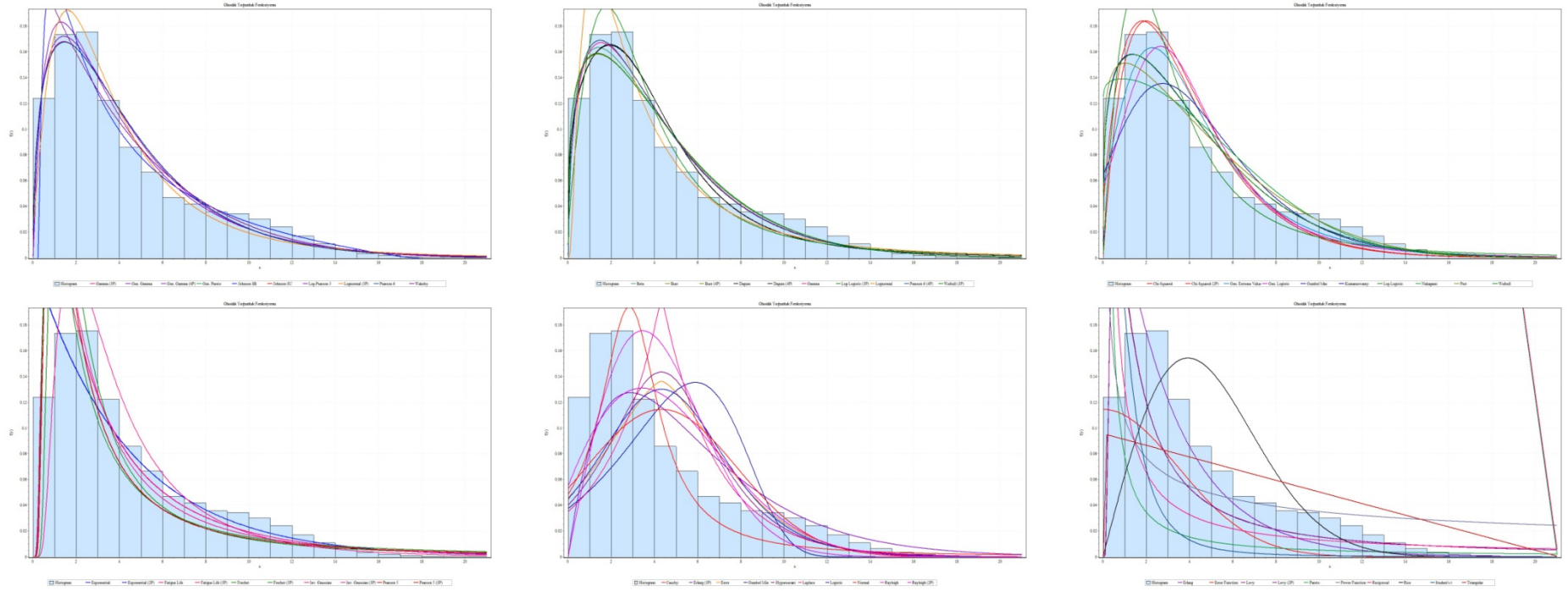
Dağılımlar	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-Squared	
	Hata Analizi Sonucu	Sıralama	Hata Analizi Sonucu	Sıralama	Hata Analizi Sonucu	Sıralama
Gen. Pareto	0,02829	1	2113,4	40	N/A	
Kumaraswamy	0,0289	2	116,77	5	1271	7
Gen. Gamma (4P)	0,03047	3	68,782	2	663,26	3
Pert	0,03082	4	130,16	7	1441,7	8
Beta	0,03169	5	133,92	9	1470,3	9
Nakagami	0,03404	6	128,42	6	1075	5
Wakeby	0,03467	7	54,348	1	N/A	
Dagum (4P)	0,0358	8	70,597	3	295,68	1
Dagum	0,03626	9	71,986	4	385,07	2
Weibull	0,03869	10	212,03	10	2344,1	18
Burr (4P)	0,04142	11	236,07	13	2290,4	17
Burr	0,04216	12	234,67	12	2179,4	13
Weibull (3P)	0,04279	13	239,91	14	2182,5	14
Log-Pearson 3	0,04281	14	261,84	15	3015,1	21
Gumbel Max	0,04731	15	299,05	16	1883,2	10
Log-Logistic (3P)	0,04949	16	410,98	22	4308,7	28
Johnson SB	0,05031	17	131,42	8	681,73	4
Johnson SU	0,0508	18	312,89	17	2790	19
Lognormal (3P)	0,05082	19	315,01	18	2842,8	20
Chi-Squared (2P)	0,05232	20	368,16	19	2288,8	16
Gen. Extreme Value	0,05627	21	217,16	11	1090,3	6
Gamma (3P)	0,05875	22	387,48	20	3631,1	24
Gen. Logistic	0,06095	23	395,5	21	2221,8	15
Pearson 6	0,0619	24	416,23	23	3803,6	26
Rayleigh (2P)	0,06412	25	442,37	24	1883,7	11
Erlang	0,06563	26	736,23	29	5616,9	31
Gen. Gamma	0,06566	27	473,21	25	4133,4	27
Pearson 6 (4P)	0,06705	28	477,06	26	3768,8	25
Gamma	0,06748	29	747,37	30	5485,7	30
Error	0,08783	30	708,18	28	3064	22
Logistic	0,08867	31	763,01	31	3450,4	23
Normal	0,0919	32	612,3	27	2120,5	12
Lognormal	0,10229	33	1324,1	34	11744	39

Çizelge 3.15 (devam) : Ankara hata analizi sonuçlar.

Hypersecant	0,10345	34	976,78	32	4709,9	29
Pareto 2	0,10726	35	1403,4	37	7304,1	33
Exponential (2P)	0,10753	36	1397	36	7232,5	32
Exponential	0,10805	37	1415,8	38	7308,5	34
Erlang (3P)	0,10805	38	3101,3	46	10220	38
Log-Logistic	0,10817	39	1254,4	33	12104	40
Rayleigh	0,11705	40	2802,4	44	14729	44
Chi-Squared	0,11978	41	2406,9	41	12320	41
Inv Gauussian	0,12529	42	6023,5	56	17921	47
Laplace	0,13082	43	1457,7	39	8153,4	35
Gumbel Min	0,13199	44	3237,5	47	10075	37
Rice	0,1376	45	3324,7	49	14777	45
Frechet (3P)	0,14909	46	2957,4	45	N/A	
Fatigue Life	0,15522	47	2446	42	14248	42
Fatigue Life (3P)	0,15581	48	2472,9	43	14358	43
Cauchy	0,16319	49	1352,6	35	9545	36
Frechet	0,1696	50	3842,5	52	27449	49
Pearson 5	0,17471	51	3452,3	50	31001	51
Pearson 5 (3P)	0,17517	52	3478,7	51	31164	52
Inv Gauussian (3P)	0,17676	53	3251,1	48	19520	48
Triangular	0,23799	54	6586,3	57	15107	46
Power Function	0,26493	55	5955,5	55	27826	50
Levy	0,27619	56	4813,5	53	44597	54
Levy (2P)	0,28116	57	4928,7	54	44461	53
Pareto	0,45048	58	17199	58	2,22E+05	57
Reciprocal	0,48248	59	24467	59	85941	55
Error Function	0,5361	60	47527	60	1,64E+05	56
Student's t	0,70981	61	1,03E+05	61	6,13E+05	58

Çizelge 3.15'den görülebileceği hata analizleri sonucu tek bir tane en iyi dağılım bulunmamaktadır. Hatta bazı hata analizlerinde üst sırada olan dağılımlar diğer hata analizinde sıralamada alt sıralarda kalmaktadırlar. Örneğin Johnson SB dağılımı Kolmogorov Smirnov testinde 17. sırada iken Anderson Darling testinde sekizinci sırada ve Chi-Squared testinde ise dördüncü sıradadır. Yine benzer olarak Dagum (4P) dağılımı Kolmogorov Smirnov testinde sekizinci sırada iken Anderson Darling testinde üçüncü sırada ve Chi-Squared testinde ise birinci sıradadır. Daha öncede ifade edildiği gibi hata analizleri sonucu elde edilen dağılımların başarı sıralamaları aynı değildir, bazı durumlarda çok farklı sonuçlar olabilmektedir.

Ayvalık bölgesinde ölçülen veri seti için dağılımların gerçek frekans dağılımı Şekil 3.20'de sunulmuştur.



Şekil 3.20 : Ayvalık rüzgar histogramı ve kullanılan dağılımlar.

Ayvalık bölgesi için hata analizi sonuçları Çizelge 3.16'de sunulmuştur.

Çizelge 3.16 : Ayvalık hata analizi sonuçları.

Dağılımlar	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-Squared	
	Hata Analizi Sonucu	Sıralama	Hata Analizi Sonucu	Sıralama	Hata Analizi Sonucu	Sıralama
Log-Pearson 3	0,02504	1	158,77	1	2604,3	1
Wakeby	0,02972	2	12212	47	N/A	
Gen. Pareto	0,02972	3	12212	48	N/A	
Johnson SB	0,02977	4	8772,2	46	N/A	
Gen. Gamma (4P)	0,03072	5	239,7	2	3013,4	2
Gamma (3P)	0,03089	6	281,85	4	3487,5	5
Gen. Gamma	0,03091	7	279,69	3	3263,9	3
Pearson 6	0,03133	8	294,16	5	3474,4	4
Lognormal (3P)	0,0331	9	325,14	7	3792,7	9
Johnson SU	0,03312	10	325,31	8	3791,9	8
Dagum (4P)	0,03358	11	409,96	13	4581,4	17
Dagum	0,03372	12	412,34	14	4452,9	16
Pearson 6 (4P)	0,0343	13	316,66	6	3747,5	7
Gamma	0,03449	14	346,4	9	3657,5	6
Beta	0,03685	15	346,67	10	3865,1	10
Lognormal	0,03934	16	742,98	20	7557,1	22
Burr (4P)	0,03995	17	404,23	11	4281,8	15
Log-Logistic (3P)	0,04028	18	498,4	18	7078,2	20
Weibull (3P)	0,04046	19	409,69	12	4226	12
Burr	0,04077	20	419,4	15	4234,2	13
Kumaraswamy	0,04115	21	419,68	16	4212,6	11
Weibull	0,04117	22	424,92	17	4255,3	14
Log-Logistic	0,04394	23	819,1	22	7386,8	21
Gen. Extreme Value	0,04418	24	809,79	21	6765,3	19
Gen. Logistic	0,05877	25	1332,7	24	10213	24
Pert	0,0589	26	712,06	19	6357,5	18
Chi-Squared	0,07474	27	2192,1	28	17467	33
Nakagami	0,07504	28	1226,9	23	9653,8	23
Gumbel Max	0,07528	29	1857,6	25	15162	30
Chi-Squared (2P)	0,08133	30	2097,8	26	16569	31
Fatigue Life	0,08853	31	2110,1	27	11070	25
Exponential (2P)	0,08856	32	2209,1	29	11983	27
Inv Gauussian	0,08964	33	5931,9	41	25767	34
Exponential	0,08976	34	2282,2	31	12265	28
Fatigue Life (3P)	0,09068	35	2214	30	11127	26
Pareto 2	0,0959	36	2631,4	32	12388	29
Inv. Gaussian (3P)	0,10756	37	3396,6	33	16688	32
Frechet	0,10764	38	5110,9	38	N/A	
Frechet (3P)	0,12035	39	4518,4	34	N/A	
Pearson 5	0,12335	40	4724	35	35299	36
Pearson 5 (3P)	0,12475	41	4828,1	36	35431	37
Normal	0,13641	42	5578,3	39	47573	41
Rayleigh (2P)	0,13675	43	4939,7	37	26573	35
Logistic	0,14696	44	5869,1	40	46409	40
Error	0,1497	45	5938,5	42	48381	43
Hypersecant	0,15771	46	6469	43	47588	42
Rayleigh	0,16469	47	14043	51	71254	47
Cauchy	0,17563	48	7442,3	44	37799	38
Laplace	0,18567	49	8096,9	45	57148	45
Erlang (3P)	0,20005	50	15086	52	39331	39
Gumbel Min	0,20623	51	17437	53	94484	52
Erlang	0,21534	52	21012	56	52572	44
Rice	0,22111	53	19308	55	77304	48
Power Function	0,22729	54	17514	54	92689	51
Levy	0,26664	55	13240	49	81182	49
Levy (2P)	0,26891	56	13477	50	81627	50
Triangular	0,27126	57	24829	57	57391	46
Pareto	0,45377	58	47942	58	5,01E+05	55
Reciprocal	0,48605	59	60739	59	2,01E+05	53
Error Function	0,52058	60	1,01E+05	60	3,13E+05	54
Student's t	0,67075	61	2,25E+05	61	9,80E+05	56

Ayvalık bölgesinin rüzgar şiddeti frekans dağılımı seçilen bin genişliğinde incelendiğinde Şekil 3.20'den de görülebileceği gibi tek tepeli bir frekans dağılımıdır.

Çizelge 3.16'dan da görülebileceği gibi Log-Pearson 3 dağılımı bütün hata testlerine göre Ayvalık için en iyi sonuçları vermektedir. Kolmogorov Smirnov testine göre en iyi ikinci dağılım Wakeby dağılımıdır. Wakeby dağılımı Anderson Darling testine göre ise 47. sıradadır. Chi Squared testinde ise en iyi ikinci dağılım Gen. Gamma (4P) dağılımıdır. Dağılım Anderson Darling testinde de ikinci sıradadır.

Literatürde sıklıkla kullanılan Weibull dağılımı Kolmogorov Smirnov hata testine göre 22. sıradadır. Anderson Darling hata testine göre ise 17. sıradadır. Chi-Squared hata testine göre ise en iyi 14. sırada yer almaktadır. Sonuçlardan da görülebileceği gibi dağılımların başarı sırası genelde hata testine göre değişmektedir. Bir dağılım bütün hata testlerinde bütün ölçün noktalarında yapılan analizlerde her zaman en iyi sonucu vermemektedir.

Belen bölgesinde ölçülen veri seti için dağılımların gerçek frekans dağılımı Şekil 3.21'de sunulmuştur.

Belen bölgesi için hata analizi sonuçları Çizelge 3.17'de sunulmuştur.

Çizelge 3.17 : Belen hata analizi sonuçları.

Dağılımlar	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-Squared	
	Hata Analizi Sonucu	Sıralama	Hata Analizi Sonucu	Sıralama	Hata Analizi Sonucu	Sıralama
Wakeby	0,0078	1	1056,9	37	N/A	
Dagum (4P)	0,01035	2	3,8836	2	63,639	1
Dagum	0,01062	3	3,2705	1	66,495	2
Error	0,01629	4	16,661	4	163,62	4
Johnson SB	0,0163	5	140,27	13	N/A	
Gen. Gamma (4P)	0,01637	6	10,393	3	99,867	3
Gen. Extreme Value	0,02994	7	115,34	6	N/A	
Gen. Pareto	0,03371	8	4564	53	N/A	
Fatigue Life (3P)	0,03845	9	128,58	11	998,9	6
Normal	0,03906	10	120,26	7	878,53	5
Log-Pearson 3	0,03927	11	5157,9	55	N/A	
Johnson SU	0,04054	12	132,93	12	1072,1	8
Burr (4P)	0,04077	13	124,01	9	1139,6	10
Weibull (3P)	0,04166	14	127,92	10	1179,5	11
Lognormal (3P)	0,04197	15	140,48	14	1108,4	9
Kumaraswamy	0,04201	16	104,71	5	1026,2	7
Pearson 6 (4P)	0,04373	17	145,84	15	1278,8	14
Log-Logistic (3P)	0,04447	18	180,79	18	1560,2	16
Gamma (3P)	0,04509	19	148,77	16	1328,7	15
Beta	0,04589	20	123,84	8	1221,4	12
Gen. Logistic	0,05156	21	228,07	20	1821,8	17
Pert	0,05185	22	201,72	19	1977,9	18
Erlang (3P)	0,05322	23	160,95	17	1248,7	13
Rayleigh	0,05927	24	300,17	22	2483,4	21
Logistic	0,06104	25	312,79	25	2113,4	19
Rayleigh (2P)	0,06444	26	244,79	21	2144,4	20
Weibull	0,06516	27	303,78	23	2607,9	22
Burr	0,06532	28	304,3	24	2635,5	23
Frechet (3P)	0,06599	29	329,44	26	4034,5	27
Rice	0,0707	30	424,61	27	2755,2	24
Hypersecant	0,07487	31	488,56	28	3278,6	25
Gumbel Min	0,08256	32	710,14	30	3811,3	26
Gamma	0,08612	33	895,82	35	6135,5	33
Nakagami	0,087	34	879,6	34	5339,8	29
Gumbel Max	0,09232	35	810,97	32	6482,6	34
Laplace	0,09519	36	819,34	33	5902,2	31
Gen. Gamma	0,102	37	710,57	31	6102,6	32
Cauchy	0,10814	38	652,61	29	7785,1	35
Inv Gauussian	0,11351	39	3274,6	46	11381	38
Pearson 6	0,11783	40	951,75	36	5625,1	30
Triangular	0,12379	41	1197,5	38	8381,2	37
Lognormal	0,13177	42	1334,3	41	12502	40
Log-Logistic	0,13289	43	1277,1	40	12701	41
Chi-Squared (2P)	0,14093	44	1254,4	39	5182	28
Chi-Squared	0,18482	45	2374,1	42	8305,8	36
Exponential (2P)	0,19687	46	2863,6	43	17691	42
Exponential	0,19822	47	2911,2	44	17695	43
Pearson 5	0,20195	48	7532,5	57	19364	45
Frechet	0,2041	49	3044,8	45	26391	48
Pearson 5 (3P)	0,21959	50	3675,2	50	34163	49
Pareto 2	0,22868	51	3671,3	49	19035	44
Erlang	0,22886	52	3960	52	12210	39
Inv. Gaussian (3P)	0,23427	53	3581,4	48	22118	47
Fatigue Life	0,23592	54	3555,1	47	21239	46
Power Function	0,2743	55	3877,4	51	N/A	
Levy	0,33913	56	4682	54	52420	51
Levy (2P)	0,39406	57	5497,1	56	49037	50
Pareto	0,45074	58	11276	58	1,53E+05	53
Reciprocal	0,52486	59	18321	59	70379	52
Error Function	0,63341	60	58410	60	2,93E+05	54
Student's t	0,80971	61	87790	61	6,16E+05	55

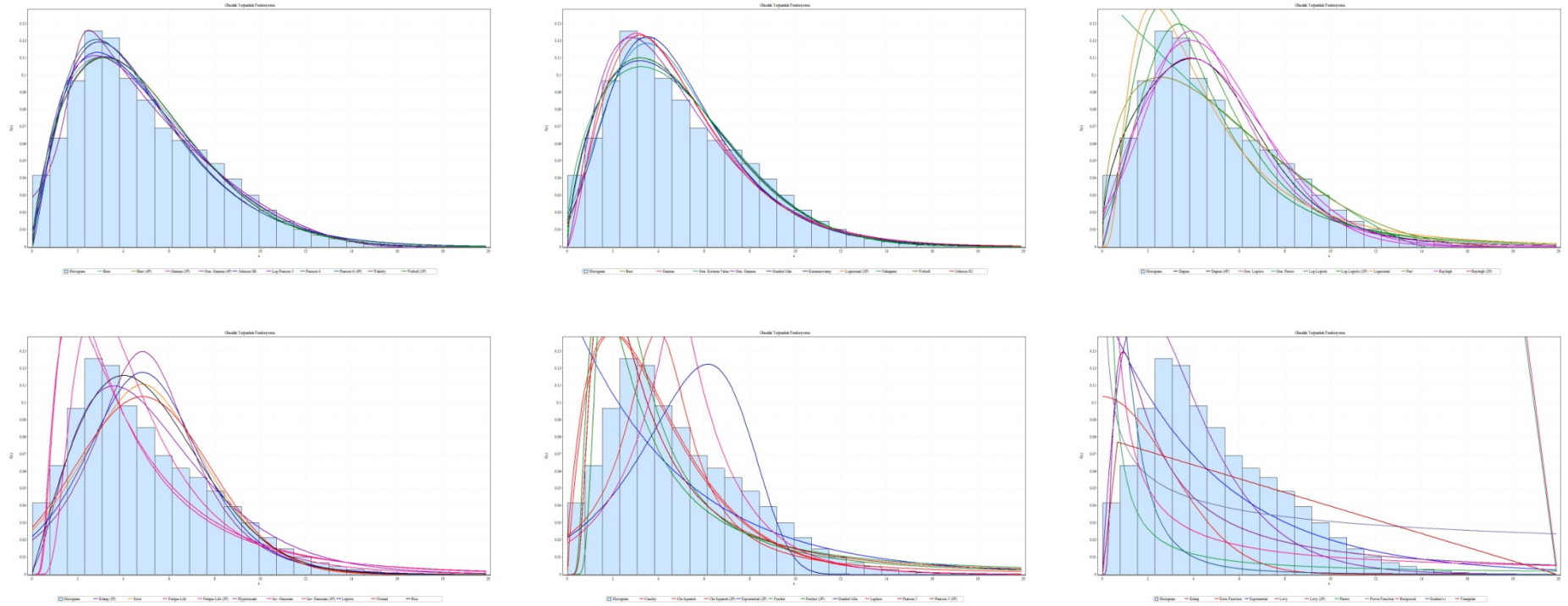
Daha öncede ifade edildiği gibi hata testleri sonuçlarına göre dağılımların başarı sıralamaları farklıdır. Belende ölçülen rüzgar şiddeti verileri kullanılarak yapılan hesaplamalarda bütün hata testlerine göre en iyi sonucu veren tek dağılım bulunmamaktadır. Kolmogorov Smirnov testine göre en iyi sonucu veren Wakeby dağılımı Anderson Darling testine göre ise 37. sıradadır. Kolmogorov Simirnov testine göre en iyi ikinci dağılım Dagum (4P) dağılımıdır.

Anderson Darling testine göre en iyi dağılım ise Dagum dağılımıdır. Dagum dağılımı Chi Squared testinde ise en iyi ikinci dağılımdır.

Chi Squared testine göre en iyi dağılım ise yine Dagum (4P) dağılımıdır.

Weibull dağılımı ise Kolmogorov Smirnov testine göre 27., Anderson Darling testine göre 23. ve Chi Squared testine göre ise 22. sıradadır. Çalışmanın devamında ülkemizde ölçülen diğer bölgelerin rüzgar verileri analiz edildikten sonra gerçek bir rüzgar enerjisi santralinin enerji üretim modellemesinde dağılımların başarısı rüzgar enerjisi güç yoğunluğunu ve ortalama rüzgar türbini gücünü tahmin etmede olan başarısına göre incelenecektir.

Biga bölgesinde ölçülen veri seti için dağılımların gerçek frekans dağılımı Şekil 3.22'de sunulmuştur.



Şekil 3.22 : Biga rüzgar histogramı ve kullanılan dağılımlar.

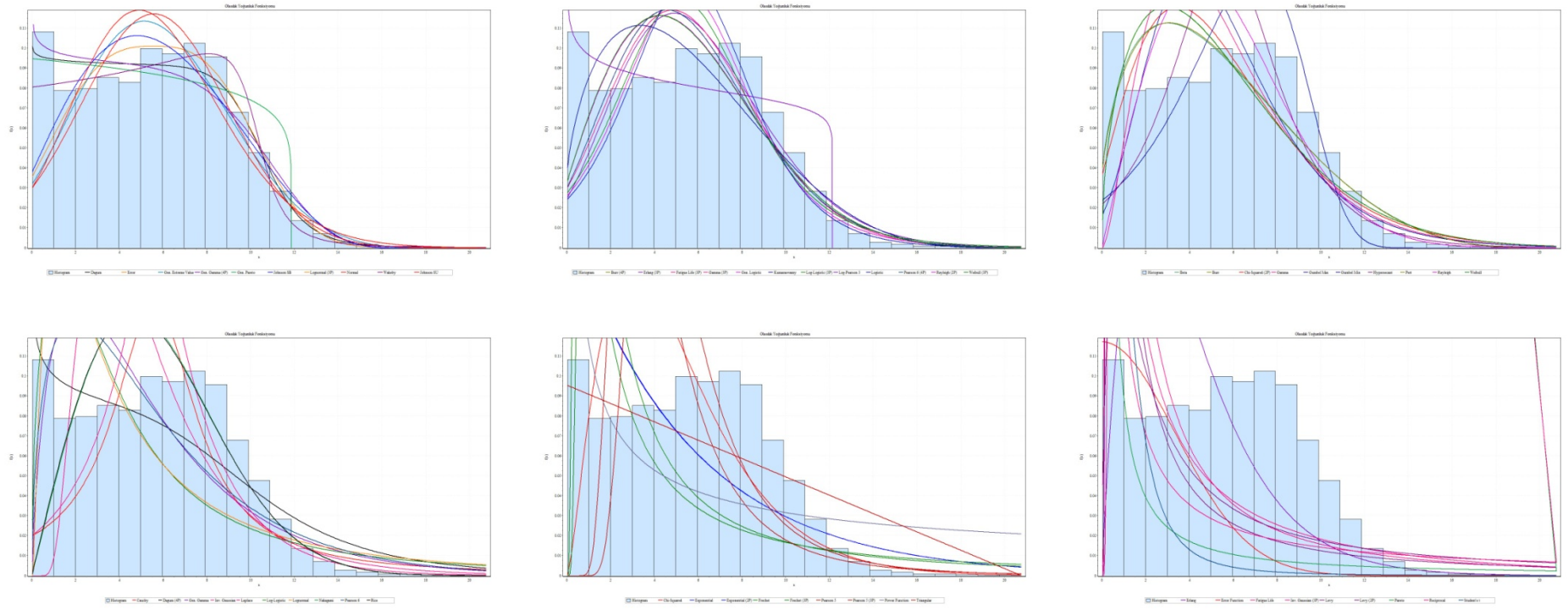
Biga bölgesi için hata analizi sonuçları Çizelge 3.18'de sunulmuştur.

Çizelge 3.18 : Biga hata analizi sonuçları.

Dağılımlar	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-Squared	
	Hata Analizi	Sıralama	Hata Analizi	Sıralama	Hata Analizi	Sıralama
Wakeby	0,01506	1	557,29	22	N/A	
Johnson SB	0,01896	2	104,47	1	N/A	
Log-Pearson 3	0,02076	3	119,23	2	2660,3	6
Beta	0,0237	4	125,56	3	2888,9	7
Gamma (3P)	0,02606	5	206,01	10	2925,3	8
Pearson 6 (4P)	0,02642	6	209,89	11	3235,9	11
Pearson 6	0,02659	7	274,96	13	3489,6	12
Gen. Gamma (4P)	0,02669	8	157,59	4	2593,7	3
Weibull (3P)	0,02784	9	162,92	5	2593,7	5
Burr (4P)	0,02789	10	164,99	6	2593,7	4
Burr	0,02818	11	165,79	8	2593,5	1
Weibull	0,02827	12	165,58	7	2593,5	2
Gen. Gamma	0,02933	13	323,91	16	4045,8	13
Kumaraswamy	0,02971	14	171,39	9	3130,1	9
Nakagami	0,03017	15	234,03	12	3163,7	10
Gen. Extreme Value	0,03223	16	370,1	17	4045,9	14
Gamma	0,0324	17	522,25	20	4537,7	17
Lognormal (3P)	0,03264	18	304,55	14	4321,9	16
Johnson SU	0,03269	19	304,8	15	4321,5	15
Gumbel Max	0,03736	20	522,8	21	4578,5	18
Log-Logistic (3P)	0,03787	21	567,82	23	8261,6	23
Pert	0,04087	22	833,96	24	6405,5	22
Dagum (4P)	0,04393	23	441,41	18	5724,1	20
Dagum	0,04396	24	443,02	19	5726,6	21
Gen. Pareto	0,04534	25	33356	57	N/A	
Gen. Logistic	0,04946	26	971,61	25	8472,3	24
Lognormal	0,05609	27	1878,3	28	16298	28
Log-Logistic	0,05823	28	1667,6	27	16695	29
Rayleigh (2P)	0,06582	29	1028,5	26	5662,1	19
Rayleigh	0,06628	30	2023,9	29	11903	27
Inv Gauussian	0,06965	31	5600,8	40	21957	33
Rice	0,08745	32	2607,7	31	11270	26
Normal	0,08959	33	2554,1	30	20942	30
Erlang (3P)	0,09582	34	3939	34	11177	25
Error	0,09599	35	2729,3	32	22188	34
Fatigue Life	0,10117	36	3990,7	36	21420	31
Fatigue Life (3P)	0,10137	37	4015,4	37	21424	32
Logistic	0,104	38	3141,3	33	24096	36
Inv Gauussian (3P)	0,1083	39	4784,3	38	26071	37
Hypersecant	0,11681	40	3939,1	35	28912	39
Frechet	0,12538	41	8931,2	45	N/A	
Pearson 5 (3P)	0,12901	42	7134,6	42	52816	46
Pearson 5	0,12917	43	7136,5	43	53094	47
Chi-Squared	0,1319	44	9579,8	46	22434	35
Frechet (3P)	0,1405	45	8391,4	44	N/A	
Cauchy	0,14141	46	5566,7	39	52090	43
Laplace	0,14522	47	5789,5	41	42178	40
Chi-Squared (2P)	0,14812	48	11831	50	26580	38
Gumbel Min	0,15773	49	12669	51	67546	49
Exponential (2P)	0,18351	50	11371	47	51956	42
Exponential	0,18429	51	11475	48	52540	44
Erlang	0,18515	52	20372	53	50221	41
Pareto 2	0,18517	53	11586	49	52609	45
Triangular	0,21338	54	18344	52	56995	48
Power Function	0,28511	55	26726	54	1,40E+05	50
Levy (2P)	0,34781	56	27773	55	1,72E+05	51
Levy	0,34812	57	27825	56	1,72E+05	52
Pareto	0,48359	58	65799	58	1,00E+06	55
Reciprocal	0,5622	59	1,02E+05	59	3,87E+05	53
Error Function	0,59898	60	2,24E+05	60	8,45E+05	54
Student's t	0,76633	61	3,63E+05	61	1,97E+06	56

Biga sonuçları incelendiği zaman Wakeby dağılımı ölçülen rüzgar şiddeti verileri modellemede Kolmogorov Smirnov hata testlerine göre en iyi sonucu verdiği belirlenmiştir. Buna karşılık Anderson Darling testinde 22. sırada yer almaktadır. Kolmogorov Smirnov hata testine göre en iyi ikinci dağılım Literatürde kullanımı sınırlı olan Johnson SB dağılımıdır. Johnson SB dağılımı Anderson Darling testinde de birinci sırada yer almaktadır. Literatürde sıklıkla kullanılan Weibull dağılımı ise Kolmogorov Smirnov testine göre 12. sırada, Anderson Darling testinde 12. sırada ve Chi Squared testinde ise yedinci sıradadır. Burr dağılımı ise Chi-Squared testine göre en iyi sonucu vermekte, Kolmogorov Smirnov hata testine göre 11 sıradadır ve Anderson Darling testinde sekizinci sırada yer almaktadır

Datça bölgesinde ölçülen veri seti için dağılımların gerçek frekans dağılımı Şekil 3.23'de sunulmuştur.



Şekil 3.23 : Datça rüzgar histogramı ve kullanılan dağılımlar.

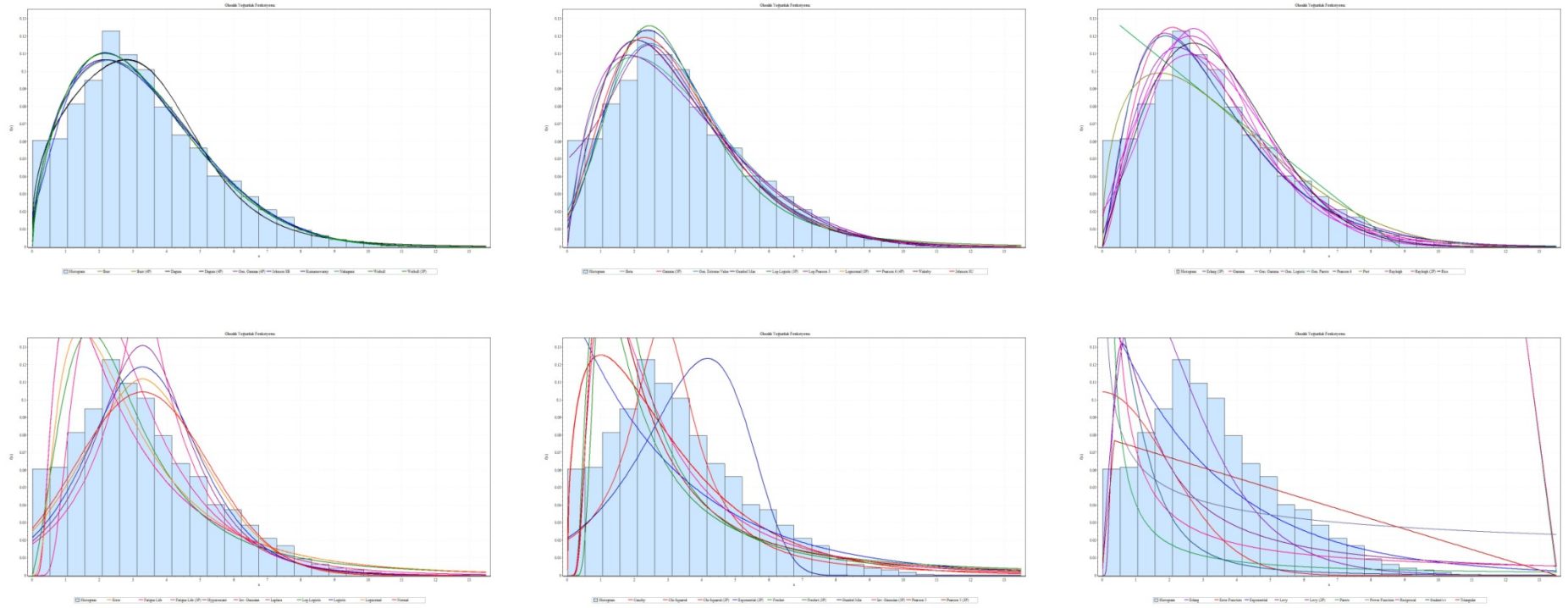
Datça bölgesi için hata analizi sonuçları Çizelge 3.19'da sunulmuştur.

Çizelge 3.19 : Datça hata analizi sonuçları.

Dağılımlar	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-Squared	
	Hata Analizi Sonucu	Sıralama	Hata Analizi Sonucu	Sıralama	Hata Analizi Sonucu	Sıralama
Wakeby	0,01945	1	12,758	1	176,1	1
Dagum	0,03482	2	27,653	2	201,43	3
Johnson SB	0,03606	3	125,99	11	N/A	
Gen. Pareto	0,03758	4	1813,3	47	N/A	
Gen. Extreme Value	0,04456	5	96,429	5	N/A	
Gen. Gamma (4P)	0,04504	6	394,28	28	N/A	
Error	0,04629	7	41,761	3	183,45	2
Lognormal (3P)	0,04846	8	109,23	7	938,79	6
Johnson SU	0,04859	9	109,14	6	921,2	5
Normal	0,05	10	87,487	4	485,27	4
Fatigue Life (3P)	0,05062	11	112,9	8	996,06	7
Log-Logistic (3P)	0,05403	12	129,87	12	1105,6	8
Pearson 6 (4P)	0,05644	13	124,91	9	1189,6	10
Gamma (3P)	0,05659	14	125,29	10	1212	12
Log-Pearson 3	0,05728	15	1540,7	45	N/A	
Rayleigh (2P)	0,05808	16	134,21	13	1306,6	13
Burr (4P)	0,05876	17	136,62	15	1332,8	14
Weibull (3P)	0,0588	18	136,1	14	1347,9	16
Gen. Logistic	0,06096	19	150,52	17	1107	9
Kumaraswamy	0,06583	20	145,33	16	1347,3	15
Erlang (3P)	0,06846	21	171,96	20	1481,1	17
Logistic	0,07118	22	186	21	1200	11
Pert	0,07191	23	166,88	18	1585,1	18
Beta	0,07248	24	170,42	19	1606,3	19
Hypersecant	0,08367	25	277,33	23	1845	21
Weibull	0,08936	26	297,16	25	2503,5	23
Burr	0,0894	27	297,06	24	2511,1	24
Gumbel Max	0,0898	28	396,12	29	3314,7	28
Gumbel Min	0,09029	29	454,79	32	1709,9	20
Chi-Squared (2P)	0,09121	30	237,66	22	2129,2	22
Gamma	0,09329	31	725,18	37	4217,9	34
Rayleigh	0,09581	32	629,93	35	3562,9	31
Rice	0,10044	33	611,71	34	3381,4	29
Laplace	0,1022	34	449,25	31	3112,4	26
Nakagami	0,10257	35	638,57	36	3480,2	30
Dagum (4P)	0,1135	36	356,83	27	2766,7	25
Pearson 6	0,11439	37	433,15	30	3863,6	32
Cauchy	0,12539	38	355,82	26	3225,6	27
Gen. Gamma	0,12871	39	531,88	33	4225,9	35
Inv. Gaussian	0,13674	40	3919,1	55	7935,8	40
Lognormal	0,15622	41	938,49	42	9058,7	42
Log-Logistic	0,15713	42	904,7	41	9512,8	43
Chi-Squared	0,15871	43	1017	43	4726,4	36
Exponential (2P)	0,16034	44	894,01	40	6257,8	37
Exponential	0,16072	45	892,36	39	6266,9	38
Triangular	0,17504	46	802,35	38	3988,7	33
Pareto 2	0,18428	47	1114	44	6681,4	39
Pearson 5 (3P)	0,18586	48	7725,5	58	12940	46
Power Function	0,19418	49	1584,8	46	12216	44
Frechet	0,22793	50	1876,2	48	18135	48
Pearson 5	0,23295	51	5870	57	12352	45
Frechet (3P)	0,25211	52	2046,6	49	N/A	
Erlang	0,26752	53	2753,4	51	8776	41
Levy	0,27827	54	2775,3	52	30972	51
Fatigue Life	0,32146	55	3301,3	53	17541	47
Inv. Gaussian (3P)	0,32172	56	3436	54	20099	49
Levy (2P)	0,34321	57	2132,4	50	22053	50
Pareto	0,41782	58	5424,6	56	66654	53
Reciprocal	0,477	59	7926,9	59	31547	52
Error Function	0,54798	60	21841	60	98433	54
Student's t	0,7224	61	35166	61	2,22E+05	55

Datça bölgesinin sonuçları incelendiği zaman Wakeby dağılımı ölçülen rüzgar şiddeti verileri modellemede bütün hata testlerine göre en iyi sonucu verdiği belirlenmiştir. Kolmogorov Smirnov hata testine göre en iyi ikinci dağılım Dagum dağılımıdır. Dagum dağılımı Anderson Darling testinde de ikinci sırada ve Chi Squared testinde ise üçüncü sıradadır. Literatürde kullanımı sınırlı olan Johnson SU dağılımı ise Anderson Darling testinde üçüncü sıradadır. Literatürde sıklıkla kullanılan Weibull dağılımı ise Kolmogorov Smirnov testine göre 26. sırada, Anderson Darling testinde 25. sırada ve Chi Squared testinde ise 23. sıradadır.

Gebze bölgesinde ölçülen veri seti için dağılımların gerçek frekans dağılımı Şekil 3.24'de sunulmuştur.



Şekil 3.24 : Gebze rüzgar histogramı ve kullanılan dağılımlar.

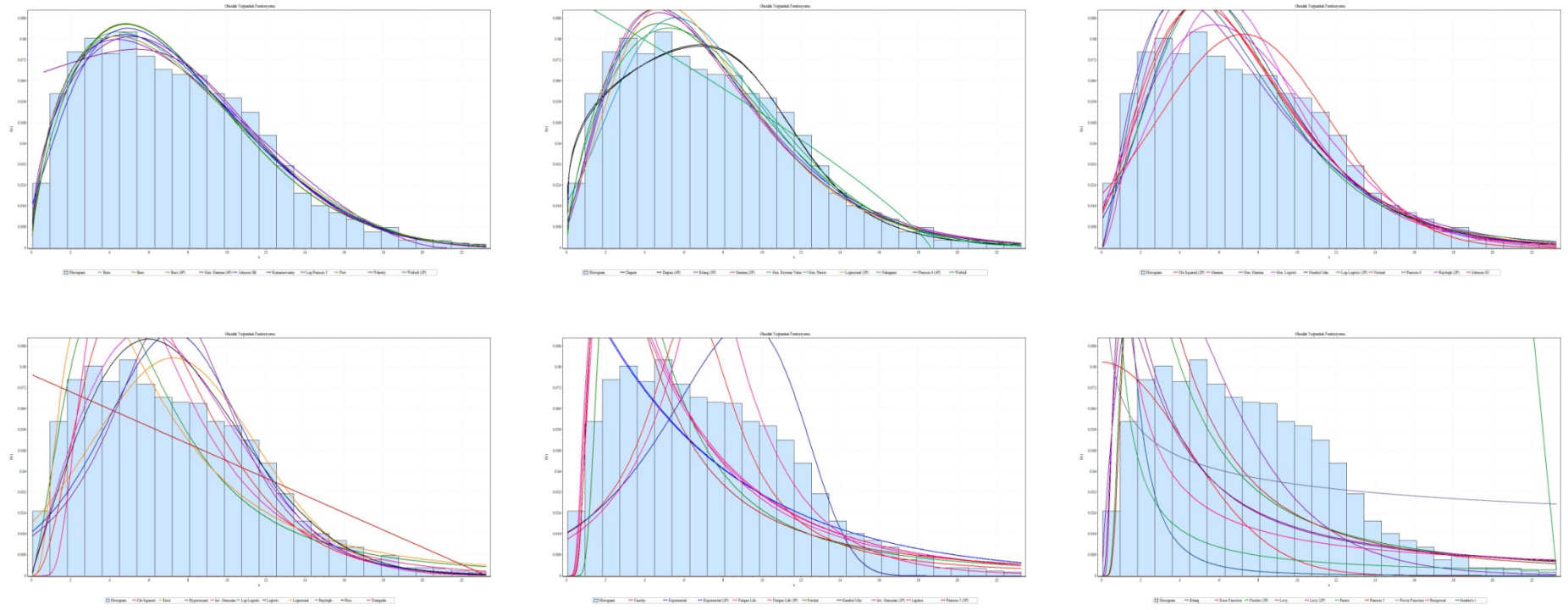
Gebze bölgesi için hata analizi sonuçları Çizelge 3.20'de sunulmuştur.

Çizelge 3.20 : Gebze hata analizi sonuçları.

Dağılımlar	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-Squared	
	Hata Analizi Sonucu	Sıralama	Hata Analizi Sonucu	Sıralama	Hata Analizi Sonucu	Sıralama
Nakagami	0,0237	1	60,127	3	981,23	6
Gen. Gamma (4P)	0,02429	2	60,688	4	1083,4	9
Kumaraswamy	0,02508	3	65,464	5	1142,5	10
Johnson SB	0,02623	4	56,859	2	928,1	3
Burr	0,02841	5	72,618	7	1146,6	12
Dagum	0,02842	6	73,113	10	930,59	4
Weibull	0,02844	7	72,825	9	1146,5	11
Dagum (4P)	0,02851	8	72,793	8	935,78	5
Weibull (3P)	0,02879	9	75,113	11	1152	14
Burr (4P)	0,02921	10	75,687	12	1148,5	13
Lognormal (3P)	0,0296	11	89,368	15	1014,1	7
Johnson SU	0,02964	12	89,294	14	1014,3	8
Log-Logistic (3P)	0,03013	13	135,36	19	1288,2	16
Wakeby	0,03015	14	47,702	1	N/A	
Beta	0,0311	15	83,006	13	1166,4	15
Pearson 6 (4P)	0,03304	16	125,26	17	1487,1	19
Gamma (3P)	0,03309	17	131,1	18	1428,5	17
Gen. Extreme Value	0,03555	18	65,619	6	518,59	1
Gumbel Max	0,03569	19	140,39	20	1479,9	18
Log-Pearson 3	0,03822	20	119,93	16	N/A	
Rayleigh (2P)	0,03948	21	164,17	22	1497,7	20
Gen. Logistic	0,04294	22	157,5	21	898,03	2
Pert	0,04335	23	245,67	24	2125,7	22
Erlang (3P)	0,0437	24	257,42	26	1631	21
Pearson 6	0,04627	25	230,24	23	2239,4	24
Gen. Gamma	0,04782	26	257,06	25	2201,7	23
Rayleigh	0,05069	27	490,41	29	3405,9	30
Gamma	0,05125	28	324,61	27	2352,4	25
Rice	0,05649	29	608,62	32	3080,7	28
Gen. Pareto	0,06404	30	11529	57	N/A	
Normal	0,07285	31	489,97	28	2719,7	27
Error	0,07488	32	506,12	30	2680,3	26
Logistic	0,07855	33	573,78	31	3142,2	29
Log-Logistic	0,08876	34	811,43	34	6717,6	35
Hypersecant	0,08975	35	724,13	33	3776,7	31
Inv Gauussian	0,08998	36	2526,3	43	7251,9	37
Lognormal	0,09335	37	934,84	35	7157	36
Laplace	0,11795	38	1105,1	37	6309,2	32
Fatigue Life	0,13566	39	1591,6	38	8902	39
Fatigue Life (3P)	0,13591	40	1606,8	39	8903,4	40
Cauchy	0,13726	41	1022,9	36	7394,4	38
Gumbel Min	0,14336	42	3077,9	47	11967	42
Inv Gauussian (3P)	0,14529	43	1912	41	10390	41
Chi-Squared (2P)	0,14972	44	1861,5	40	6432,3	33
Chi-Squared	0,15172	45	1925,2	42	6533,7	34
Frechet (3P)	0,15365	46	2735,1	46	N/A	
Pearson 5	0,16252	47	2589,8	44	18890	49
Pearson 5 (3P)	0,16252	48	2605,1	45	18766	48
Frechet	0,16702	49	3427,1	51	N/A	
Exponential (2P)	0,18327	50	3106,4	48	14633	43
Exponential	0,18415	51	3147,3	49	14768	44
Pareto 2	0,19121	52	3354,5	50	14969	45
Triangular	0,22026	53	4767	52	15606	46
Erlang	0,2318	54	6661,3	53	16294	47
Power Function	0,28435	55	7134,7	54	37051	50
Levy (2P)	0,3461	56	7354	55	50583	51
Levy	0,34631	57	7363,3	56	50607	52
Pareto	0,47487	58	17398	58	2,46E+05	55
Reciprocal	0,52655	59	25603	59	1,01E+05	53
Error Function	0,59317	60	62412	60	2,26E+05	54
Student's t	0,68648	61	71612	61	2,82E+05	56

Gebze'de ölçülen rüzgar şiddeti verileri analiz edildiği zaman Kolmogorov Smirnov testine göre en iyi sonucu literatürde çok sık kullanılmayan Nakagami dağılımı elde etmiştir. Anderson darling testine göre Nakagami dağılımı üçüncü sıradadır. Dağılım Chi Squared testinde ise altıncı sıradadır. Anderson Darling testinde en iyi sonucu Wakeby dağılımı elde etmiştir fakat bu dağılım Kolmogorov Smirnov testine göre ise 14. sıradadır. Chi Squared testinde en iyi sonucu ise Gen. Extreme Value dağılımı elde etmiştir fakat bu dağılım Kolmogorov Smirnov testinde 17. sıradadır ve Anderson Darling testinde ise altıncı sıradadır. Literatürde sıklıkla kullanılan Weibull dağılımı ise Kolmogorov Smirnov testine göre yedinci sırada, Anderson darling testine göre dokuzuncu sırada ve Chi Squared testinde ise 11. sıradadır.

Gökçeada bölgesinde ölçülen veri seti için dağılımların gerçek frekans dağılımı Şekil 3.25'de sunulmuştur.



Şekil 3.25 : Gökçeada rüzgar histogramı ve kullanılan dağılımlar.

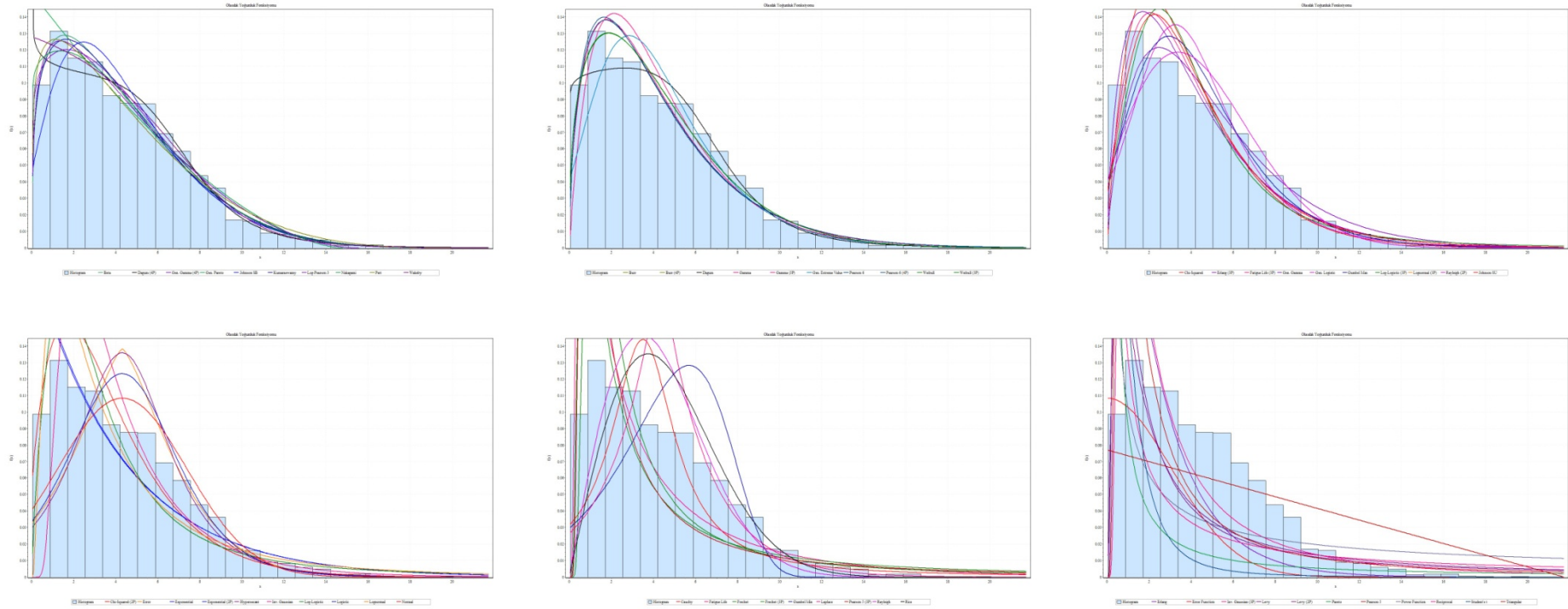
Gökçeada bölgesi için hata analizi sonuçları Çizelge 3.21'de sunulmuştur.

Çizelge 3.21 : Gökçeada hata analizi sonuçları.

Dağılımlar	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-Squared	
	Hata Analizi Sonucu	Sıralama	Hata Analizi Sonucu	Sıralama	Hata Analizi Sonucu	Sıralama
Wakeby	0,01426	1	447,4	44	N/A	
Log-Pearson 3	0,01536	2	139,62	34	N/A	
Kumaraswamy	0,01624	3	3,0716	1	72,622	3
Gen. Gamma (4P)	0,01632	4	3,4755	3	72,431	2
Pert	0,01865	5	3,4363	2	63,302	1
Beta	0,01899	6	3,7342	4	84,93	4
Johnson SB	0,02097	7	7,3891	5	111,91	7
Burr (4P)	0,02574	8	8,5974	6	119,41	10
Burr	0,02654	9	9,1678	8	113,44	8
Weibull (3P)	0,02681	10	8,9435	7	111,04	6
Weibull	0,02761	11	9,2323	9	113,49	9
Gen. Pareto	0,02967	12	988,84	54	N/A	
Nakagami	0,02976	13	10,753	10	106,56	5
Gen. Extreme Value	0,03448	14	21,817	13	186,09	14
Erlang (3P)	0,03496	15	23,225	15	253,3	19
Dagum (4P)	0,03498	16	12,156	11	156,94	11
Dagum	0,03626	17	13,213	12	157,3	12
Lognormal (3P)	0,04092	18	27,905	17	259,27	20
Pearson 6 (4P)	0,04171	19	23,396	16	236,85	16
Gamma (3P)	0,0419	20	22,689	14	237,2	17
Johnson SU	0,04218	21	28,679	19	252,75	18
Log-Logistic (3P)	0,04441	22	44,953	22	427,03	26
Rayleigh (2P)	0,04519	23	28,077	18	160,52	13
Gamma	0,04772	24	61,07	26	433,48	27
Gumbel Max	0,04997	25	47,913	23	361,82	22
Gen. Logistic	0,05026	26	52,964	24	398,55	25
Gen. Gamma	0,054	27	39,751	21	329,54	21
Chi-Squared (2P)	0,05419	28	38,901	20	233,82	15
Pearson 6	0,06349	29	56,55	25	387,12	24
Normal	0,06522	30	72,746	27	386,68	23
Rayleigh	0,06575	31	93,84	29	509,96	29
Error	0,06756	32	75	28	442,8	28
Rice	0,0756	33	108,86	31	547,04	30
Chi-Squared	0,07626	34	200,48	37	1166	36
Lognormal	0,08187	35	133,84	33	1104,8	33
Logistic	0,08356	36	103,83	30	590,89	31
Log-Logistic	0,08879	37	132,15	32	1129,4	35
Triangular	0,09682	38	182,21	36	1113,8	34
Inv Gauussian	0,09683	39	417,33	43	1812,8	42
Hypersecant	0,09808	40	142,18	35	777,59	32
Laplace	0,12574	41	224,81	39	1353	37
Gumbel Min	0,12925	42	456,82	45	1519,6	38
Cauchy	0,13233	43	206,15	38	1771,4	41
Fatigue Life (3P)	0,13855	44	334,96	40	1614	39
Fatigue Life	0,14463	45	353,37	41	1710,8	40
Inv Gauussian (3P)	0,14858	46	381,37	42	1969,1	43
Frechet	0,14998	47	458,1	46	3079,9	48
Exponential (2P)	0,1562	48	513,74	49	2434,7	44
Pearson 5 (3P)	0,15667	49	483,83	47	3548,1	49
Exponential	0,15759	50	526,69	51	2541	45
Pearson 5	0,16125	51	505,63	48	3797,3	50
Pareto 2	0,16985	52	589,2	52	2546,6	46
Frechet (3P)	0,17768	53	515,7	50	N/A	
Erlang	0,22676	54	1200,7	56	3039,6	47
Power Function	0,24045	55	867,24	53	N/A	
Levy	0,32995	56	1158,7	55	8590,7	52
Levy (2P)	0,35119	57	1287	57	8589,5	51
Pareto	0,46179	58	2907,4	58	27338	54
Reciprocal	0,51762	59	4488,7	59	14037	53
Error Function	0,58039	60	10959	60	41885	55
Student's t	0,81294	61	22619	61	1,38E+05	56

Ülkemiz rüzgar enerjisi potansiyeli en yüksek bölgelerden bir tanesi olan Gökçeada'da ölçülen rüzgar şiddeti verileri incelendiğinde ise Kolmogorov Smirnov testine göre en iyi sonucu Wakeby dağılımı elde etmiştir. Buna karşılık dağılım Anderson Darling testinde 44. sırada yer almaktadır. Anderson Darling testine göre en iyi sonucu veren dağılım ise Kumaraswamy dağılımıdır. Dağılım Kolmogorov Smirnov ve Chi Squared testinde üçüncü sırayı almaktadır. Kolmogorov Smirnov testine göre en iyi ikinci sonucu veren Log-Pearson 3 dağılımı Anderson Darling testinde 34. sırada yer almaktadır. Weibull dağılımı ise Kolmogorov Smirnov testinde 11. sırada iken diğer testlerde dokuzuncu sıradadır.

Karaman bölgesinde ölçülen veri seti için dağılımların gerçek frekans dağılımı Şekil 3.26'da sunulmuştur.



Şekil 3.26 : Karaman rüzgar histogramı ve kullanılan dağılımlar.

Karaman bölgesi için hata analizi sonuçları Çizelge 3.22'de sunulmuştur.

Çizelge 3.22 : Karaman hata analizi sonuçları.

Dağılımlar	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-Squared	
	Hata Analizi	Sıralama	Hata Analizi	Sıralama	Hata Analizi	Sıralama
	Sonucu		Sonucu		Sonucu	
Wakeby	0,01253	1	323,79	40	N/A	
Gen. Gamma (4P)	0,01585	2	2,3026	1	50,163	1
Log-Pearson 3	0,01726	3	127,8	27	N/A	
Nakagami	0,02106	4	6,7102	4	84,493	4
Kumaraswamy	0,02302	5	4,2288	2	73,825	3
Dagum (4P)	0,02317	6	9,8236	8	111,06	8
Beta	0,02558	7	5,8115	3	73,37	2
Gen. Pareto	0,02742	8	912,53	53	N/A	
Johnson SB	0,02963	9	14,797	12	115,92	10
Pert	0,03128	10	14,268	11	117,84	11
Burr	0,03131	11	9,6194	5	111,64	9
Weibull	0,03132	12	9,6336	6	109,94	7
Burr (4P)	0,03152	13	9,8967	9	109,74	6
Weibull (3P)	0,03179	14	9,9089	10	109,73	5
Dagum	0,034	15	9,6875	7	120,88	12
Gen. Extreme Value	0,04262	16	30,42	16	232,02	16
Pearson 6 (4P)	0,04301	17	21,208	13	220,08	14
Gamma (3P)	0,04419	18	21,69	14	209,67	13
Gamma	0,04561	19	51,922	22	354,86	23
Pearson 6	0,04652	20	24,953	15	221,26	15
Gumbel Max	0,0482	21	34,757	21	274,07	17
Johnson SU	0,04887	22	34,06	19	316,99	20
Lognormal (3P)	0,04904	23	34,124	20	322,61	21
Fatigue Life (3P)	0,05027	24	30,765	17	289,72	19
Log-Logistic (3P)	0,05028	25	52,356	23	591,76	26
Gen. Gamma	0,05262	26	32,602	18	275,06	18
Gen. Logistic	0,05916	27	60,235	24	397,08	24
Rayleigh (2P)	0,07742	28	86,107	25	346,83	22
Erlang (3P)	0,08098	29	183,53	34	628,18	29
Chi-Squared	0,08126	30	104,4	26	488,19	25
Normal	0,0821	31	128,35	28	627,15	28
Lognormal	0,08588	32	146,63	30	1211	35
Log-Logistic	0,09409	33	140,9	29	1245,1	37
Logistic	0,09996	34	146,97	31	758,14	30
Exponential (2P)	0,10112	35	223,53	36	1063,3	33
Exponential	0,10426	36	237,73	37	1157,7	34
Error	0,10902	37	162,57	32	926,75	32
Inv Gauussian	0,11064	38	619,09	48	2061,6	41
Chi-Squared (2P)	0,1144	39	219,77	35	605,58	27
Hypersecant	0,11476	40	179,98	33	859,76	31
Rayleigh	0,12135	41	396,86	42	1995,9	40
Pareto 2	0,12845	42	343,57	41	1222,3	36
Laplace	0,142	43	259,15	39	1403,8	38
Gumbel Min	0,14542	44	619,39	50	N/A	
Rice	0,14745	45	510,3	45	2133,8	42
Frechet	0,15566	46	490,47	43	3395,1	46
Cauchy	0,15599	47	253,79	38	1727,4	39
Frechet (3P)	0,16766	48	604,18	47	N/A	
Pearson 5 (3P)	0,16903	49	623,17	51	4458,4	47
Fatigue Life	0,17123	50	502,64	44	2155,1	43
Inv Gauussian (3P)	0,17635	51	594,65	46	2550,1	44
Pearson 5	0,18115	52	619,35	49	4992,8	48
Levy	0,25715	53	786,55	52	7123	50
Triangular	0,28477	54	1472,5	56	3290,5	45
Power Function	0,28703	55	1290,2	55	7959,5	51
Levy (2P)	0,30199	56	948,19	54	6552,1	49
Erlang	0,34438	57	3152,5	59	8256,6	52
Reciprocal	0,39614	58	2402,2	57	9975,4	53
Pareto	0,41182	59	2539,5	58	27399	55
Error Function	0,5184	60	7602,7	60	24516	54
Student's t	0,67728	61	13876	61	66728	56

Karaman'da ölçülen rüzgar şiddeti verileri incelendiğinde ise Kolmogorov Smirnov testine göre en iyi sonucu Wakeby dağılımı elde etmiştir. Buna karşılık dağılım Anderson Darling testinde 40. sırada yer almaktadır. Anderson Darling testine göre en iyi sonucu veren dağılım ise Gen. Gamma (4P) dağılımıdır. Dağılım Kolmogorov Smirnov ve Chi Squared testinde göre sırasıyla ikinci ve birinci sırada yer almaktadır. Weibull dağılımı ise Kolmogorov Smirnov testinde 21. sırada iken Anderson Darling testinde altıncı ve Chi Squared testinde ise yedinci sırada yer almaktadır.

Kırklareli bölgesinde ölçülen veri seti için dağılımların gerçek frekans dağılımı Şekil 3.27'de sunulmuştur.

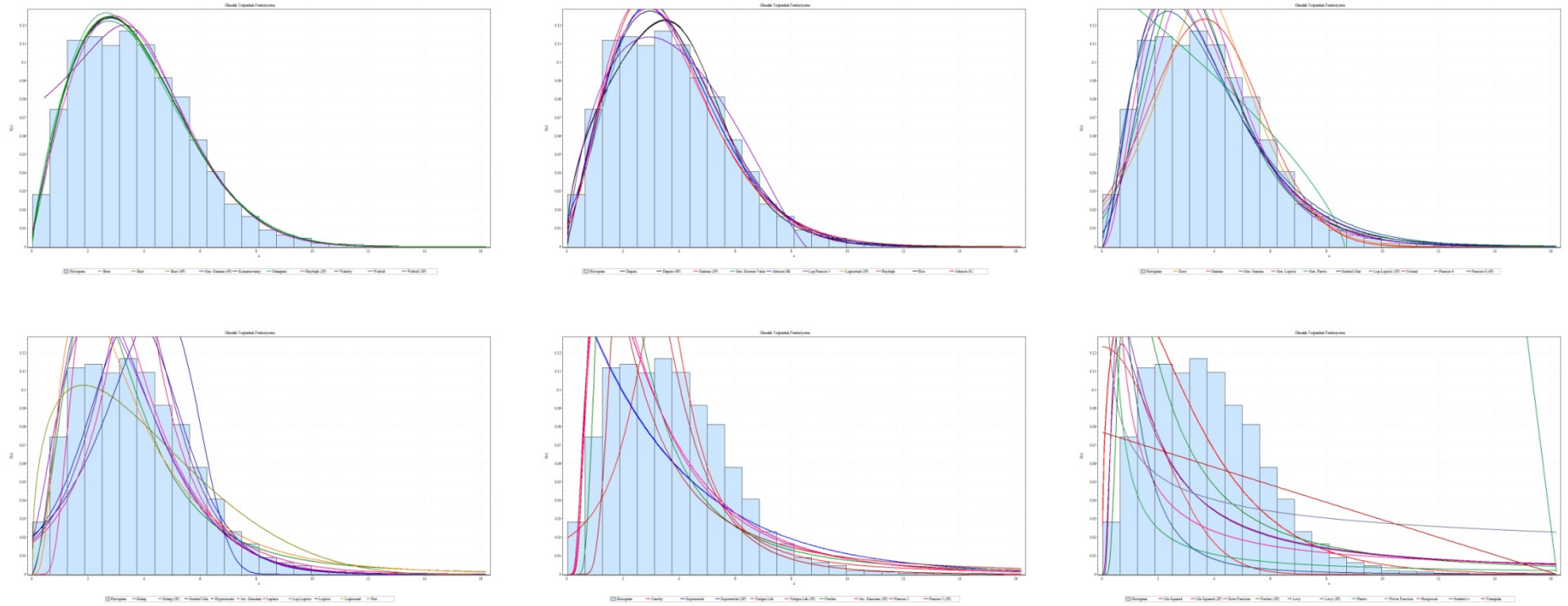
Kırklareli bölgesi için hata analizi sonuçları Çizelge 3.23'de sunulmuştur.

Çizelge 3.23 : Kırklareli hata analizi sonuçları.

Dağılımlar	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-Squared	
	Hata Analizi	Sıralama	Hata Analizi	Sıralama	Hata Analizi	Sıralama
Johnson SB	0,00857	1	1,2511	1	23,7	1
Gen. Extreme Value	0,00982	2	2,4103	5	38,268	9
Fatigue Life (3P)	0,01039	3	2,2294	2	28,154	3
Lognormal (3P)	0,01044	4	2,7092	6	35,725	8
Johnson SU	0,01045	5	2,7196	7	34,711	6
Wakeby	0,01146	6	628,71	39	N/A	
Gamma (3P)	0,01164	7	2,2742	3	29,787	5
Pearson 6 (4P)	0,01169	8	2,2873	4	29,774	4
Burr (4P)	0,01229	9	3,2733	9	43,14	10
Beta	0,01271	10	2,8393	8	24,329	2
Gen. Gamma (4P)	0,01313	11	3,6961	10	34,725	7
Gumbel Max	0,01413	12	5,7544	11	52,716	12
Dagum (4P)	0,01777	13	7,1268	12	102,21	15
Dagum	0,01799	14	8,1058	13	88,326	14
Burr	0,01875	15	8,6063	14	76,346	13
Erlang (3P)	0,02007	16	11,413	15	50,314	11
Weibull (3P)	0,02027	17	11,494	16	104,78	17
Log-Logistic (3P)	0,02069	18	16,129	19	149,66	21
Kumaraswamy	0,02131	19	11,724	17	111,18	19
Weibull	0,02149	20	12,864	18	109,89	18
Gamma	0,02489	21	27,556	22	104,75	16
Gen. Logistic	0,02543	22	23,144	20	159,62	22
Rayleigh	0,02884	23	41,321	24	184,62	23
Rayleigh (2P)	0,03522	24	23,68	21	138,97	20
Chi-Squared (2P)	0,03782	25	52,266	26	380,63	27
Pearson 6	0,03968	26	40,609	23	209,64	25
Gen. Gamma	0,04099	27	42,72	25	187,43	24
Rice	0,04631	28	69,256	27	221,42	26
Gen. Pareto	0,05251	29	2881,7	56	N/A	
Nakagami	0,0564	30	80,111	28	448,11	28
Pert	0,05841	31	147,36	29	898,18	29
Inv Gaussian	0,06011	32	437,17	38	1034,4	32
Normal	0,07093	33	152,07	30	932,52	30
Log-Pearson 3	0,07416	34	4085,5	57	N/A	
Logistic	0,07669	35	156,53	31	949,75	31
Log-Logistic	0,08318	36	216,73	34	1439,9	35
Hypersecant	0,08593	37	190,1	32	1178,2	33
Lognormal	0,08857	38	255,4	35	1631,1	37
Error	0,091	39	193,1	33	1274,1	34
Pearson 5	0,1103	40	1206,2	47	2607,5	40
Laplace	0,11376	41	289,62	36	1785	38
Cauchy	0,11463	42	292,37	37	2232,8	39
Gumbel Min	0,1416	43	975,68	41	3392,5	41
Chi-Squared	0,15273	44	734,99	40	1610,1	36
Frechet	0,16481	45	984,07	42	N/A	
Inv Gaussian (3P)	0,19261	46	1038	43	4387,3	42
Pearson 5 (3P)	0,19302	47	1275,9	49	8086,8	49
Exponential (2P)	0,20055	48	1110,4	44	5220,4	44
Exponential	0,20206	49	1126,8	45	5307,9	45
Fatigue Life	0,21045	50	1191,3	46	4959	43
Frechet (3P)	0,21086	51	1315,5	50	N/A	
Pareto 2	0,2135	52	1241,2	48	5367,7	46
Triangular	0,22182	53	1343,5	51	5748,7	47
Erlang	0,27196	54	2878,7	55	6413	48
Power Function	0,29311	55	2223,8	53	N/A	
Levy	0,31131	56	2080,6	52	17096	51
Levy (2P)	0,36493	57	2516,6	54	16117	50
Pareto	0,47704	58	5075,2	58	71885	54
Reciprocal	0,54176	59	7193,3	59	29882	52
Error Function	0,62506	60	19387	60	69490	53
Student's t	0,77762	61	28912	61	1,58E+05	55

Kırklareli'nde ölçülen rüzgar şiddeti verileri incelendiğinde ise bütün hata testlerine göre en iyi sonucu literatürde yeni kullanılmaya başlayan Johnson SB dağılımı elde etmiştir. Kolmogorov Smirnov testine göre en iyi ikinci dağılım olan Gen. Extreme Value dağılımı Anderson Darling testinde beşinci ve Chi Squared testinde ise dokuzuncu sırada yer almaktadır. Weibull dağılımı ise Kolmogorov Smirnov testinde 20. sırada iken Anderson Darling testinde ve Chi Squared testinde ise 18. sırada yer almaktadır.

Kocadağ bölgesinde ölçülen veri seti için dağılımların gerçek frekans dağılımı Şekil 3.28'de sunulmuştur.



Şekil 3.28 : Kocadağ rüzgar histogramı ve kullanılan dağılımlar.

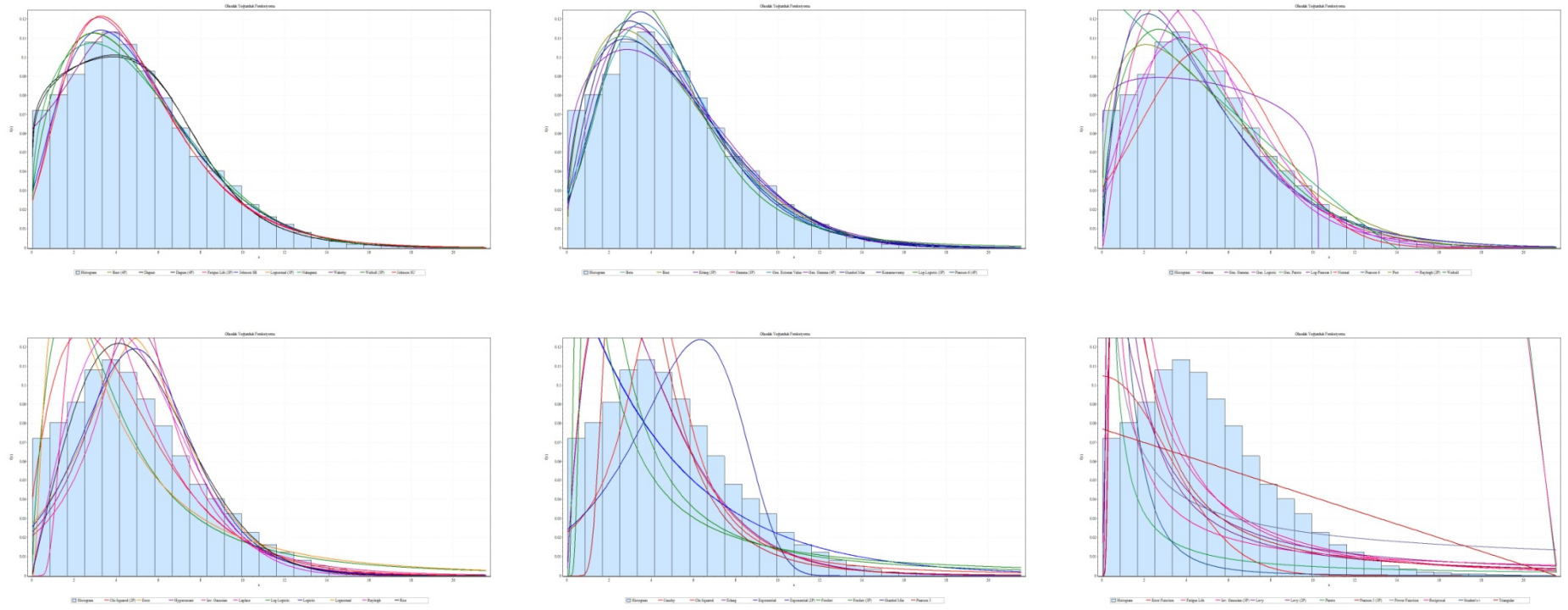
Kocadağ bölgesi için hata analizi sonuçları Çizelge 3.24'de sunulmuştur.

Çizelge 3.24 : Kocadağ hata analizi sonuçları.

Dağılımlar	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-Squared	
	Hata Analizi		Hata Analizi		Hata Analizi	
	Sonucu	Sıralama	Sonucu	Sıralama	Sonucu	Sıralama
Gen. Gamma (4P)	0,01412	1	5,0694	1	96,031	3
Kumaraswamy	0,01437	2	5,2712	2	93,204	2
Weibull (3P)	0,0146	3	5,4733	3	88,949	1
Burr (4P)	0,01523	4	5,8468	4	120,43	8
Wakeby	0,01532	5	1111,9	44	N/A	
Nakagami	0,01589	6	6,1331	5	111,51	7
Weibull	0,01615	7	6,1427	6	103,22	4
Burr	0,01654	8	6,3445	7	108,24	5
Beta	0,02087	9	9,6489	9	133,26	9
Rayleigh (2P)	0,02375	10	9,0132	8	110,93	6
Log-Pearson 3	0,02404	11	1266,9	46	N/A	
Johnson SB	0,02508	12	15,148	10	189,17	12
Dagum (4P)	0,02644	13	16,291	11	205,38	13
Dagum	0,02729	14	17,076	12	206,42	14
Gen. Extreme Value	0,02883	15	22,203	14	240,53	15
Gamma (3P)	0,02963	16	24,139	15	277,74	16
Lognormal (3P)	0,03006	17	30,352	17	288,14	18
Johnson SU	0,03023	18	30,43	18	287,86	17
Rayleigh	0,03027	19	21,091	13	155,83	11
Rice	0,03407	20	24,93	16	147,62	10
Pearson 6 (4P)	0,03535	21	52,321	19	515,36	21
Gen. Pareto	0,03909	22	2463,6	54	N/A	
Gamma	0,03987	23	78,881	25	569,75	22
Log-Logistic (3P)	0,04009	24	61,782	21	661,35	25
Gumbel Max	0,04351	25	76,693	24	595,65	23
Gen. Logistic	0,04597	26	70,579	23	631,69	24
Pearson 6	0,04625	27	56,539	20	472,44	19
Normal	0,04848	28	105,47	26	864,13	26
Gen. Gamma	0,04965	29	64,358	22	512,13	20
Error	0,06519	30	133,93	27	1004	27
Logistic	0,06991	31	148,94	28	1099,9	29
Inv Gauussian	0,07707	32	548,34	37	2659,7	36
Lognormal	0,08134	33	246,52	31	2040,2	33
Hypersecant	0,08536	34	211,86	29	1449,6	31
Log-Logistic	0,0858	35	234,07	30	2107,6	34
Pert	0,08725	36	298,8	32	1848,4	32
Erlang (3P)	0,10675	37	411,15	36	1022,9	28
Erlang	0,10888	38	384,11	35	1106,9	30
Laplace	0,11038	39	355,11	34	2405,7	35
Gumbel Min	0,11424	40	866,31	41	N/A	
Cauchy	0,11627	41	347,97	33	4171,9	40
Fatigue Life (3P)	0,13891	42	696,29	39	3571,2	37
Fatigue Life	0,13968	43	692,26	38	3571,4	38
Pearson 5	0,14395	44	1857,2	52	5833	43
Inv Gauussian (3P)	0,14613	45	750,92	40	3987,5	39
Pearson 5 (3P)	0,14954	46	1022,1	43	7380,7	47
Frechet	0,15198	47	925,36	42	N/A	
Pareto 2	0,18271	48	1335,8	47	7170,3	45
Exponential (2P)	0,19579	49	1461	48	7076,5	44
Exponential	0,19773	50	1487,4	49	7269,8	46
Frechet (3P)	0,19882	51	1236,1	45	N/A	
Chi-Squared (2P)	0,19915	52	1672,2	50	4518	41
Chi-Squared	0,20087	53	1702,7	51	4583,1	42
Triangular	0,27601	54	2233,3	53	8588	48
Power Function	0,33546	55	3050,1	56	17352	49
Levy	0,36084	56	2852,7	55	20491	51
Levy (2P)	0,37996	57	3109,7	57	20312	50
Pareto	0,48113	58	6096	58	94265	53
Reciprocal	0,52229	59	8044,2	59	36555	52
Error Function	0,63657	60	26497	60	1,11E+05	54
Student's t	0,73407	61	28928	61	1,30E+05	55

Kocadağ'da ölçülen rüzgar şiddeti verileri analiz edildiğinde ise Kolmogorov Smirnov ve Anderson Darling testlerinde en iyi sonucu Gen. Gamma (4P) dağılımı elde etmektedir. Dağılım Chi Squared hata testinde ise üçüncü sırada yer almaktadır. Chi Squared hata testine göre en iyi dağılım Weibull (3P) dağılımıdır. Weibull (3P) dağılımı diğer hata testlerine göre ise üçüncü sırada yer almaktadır. Weibull dağılımı ise Kolmogorov Smirnov testine göre yedinci sırada, Anderson Darling testine göre altıncı sırada ve Chi Squared testine göre ise dördüncü sırada yer almaktadır. Daha önce iyi sonuçlar veren Johnson SB dağılımı ise Kolmogorov Smirnov ve Chi Squared testine göre 12. sırada yer almaktadır. Dağılım Anderson Darling testinde ise 10 sıradadır.

Konya bölgesinde ölçülen veri seti için dağılımların gerçek frekans dağılımı Şekil 3.29'da sunulmuştur.



Şekil 3.29 : Konya rüzgar histogramı ve kullanılan dağılımlar.

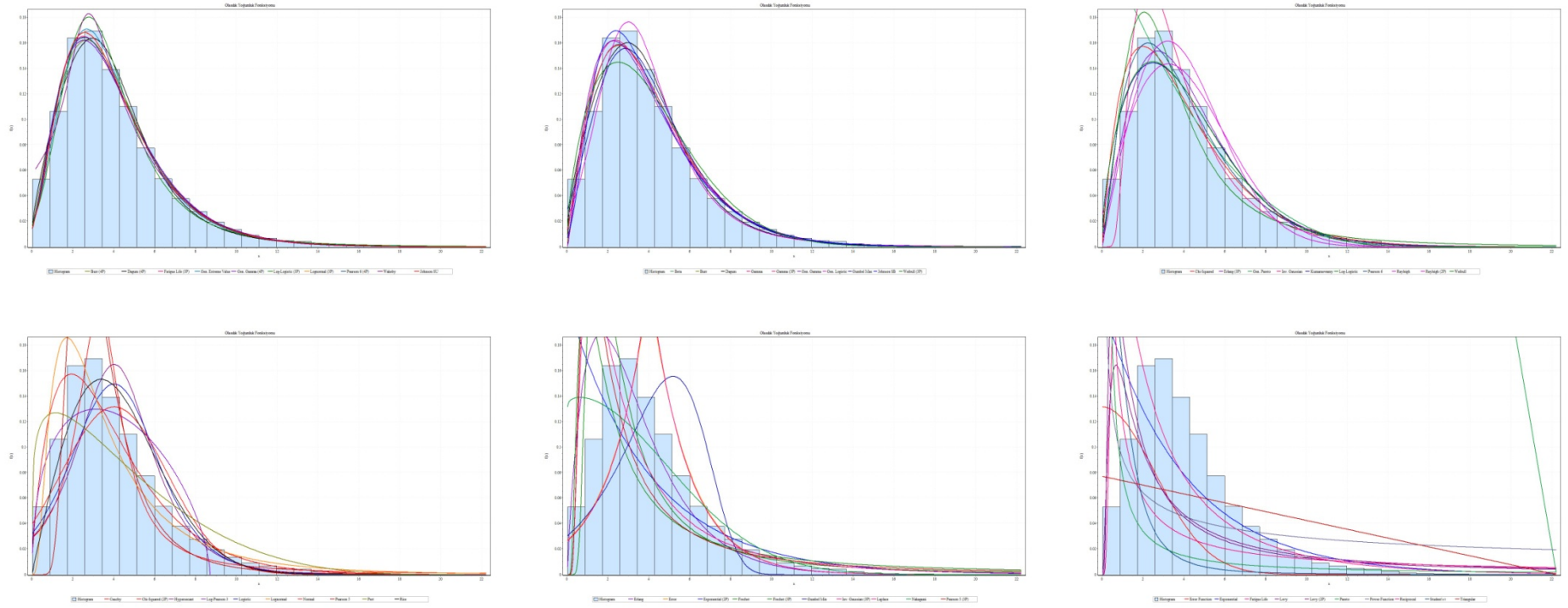
Konya bölgesi için hata analizi sonuçları Çizelge 3.25'de sunulmuştur.

Çizelge 3.25 : Konya hata analizi sonuçları.

Dağılımlar	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-Squared	
	Hata Analizi	Sıralama	Hata Analizi	Sıralama	Hata Analizi	Sıralama
Wakeby	0,00465	1	1,6118	1	57,659	1
Dagum	0,01649	2	29,879	3	418,67	6
Johnson SB	0,01713	3	18,957	2	188,65	2
Dagum (4P)	0,01947	4	36,64	4	460,41	9
Fatigue Life (3P)	0,01965	5	58,453	11	560,35	11
Weibull (3P)	0,02018	6	38,657	5	427,95	8
Johnson SU	0,02077	7	60,221	13	599,27	13
Lognormal (3P)	0,0208	8	60,185	12	600,55	14
Burr (4P)	0,02091	9	39,734	6	425,46	7
Nakagami	0,02253	10	43,318	8	406,96	4
Kumaraswamy	0,02379	11	45,604	9	409,63	5
Gen. Extreme Value	0,02452	12	41,552	7	226,33	3
Pearson 6 (4P)	0,02482	13	64,676	15	605,35	15
Gamma (3P)	0,02527	14	65,802	16	626,6	16
Gen. Gamma (4P)	0,02536	15	48,299	10	470,57	10
Beta	0,02772	16	60,552	14	581,61	12
Erlang (3P)	0,02873	17	121,62	20	866,84	22
Gumbel Max	0,02935	18	89,848	17	741,58	19
Log-Logistic (3P)	0,02957	19	124,55	21	1127,1	23
Burr	0,03161	20	103,13	18	769,05	20
Weibull	0,03185	21	103,92	19	738,14	18
Rayleigh (2P)	0,03207	22	136,58	22	629,58	17
Gen. Logistic	0,03301	23	144,25	23	789,1	21
Pert	0,0421	24	191,08	24	1342,1	24
Gamma	0,04429	25	396,02	26	2226,2	26
Gen. Pareto	0,04812	26	9921,8	55	N/A	
Pearson 6	0,06009	27	350,9	25	2154,8	25
Normal	0,06396	28	502,26	28	2519,6	29
Log-Pearson 3	0,06425	29	12627	57	N/A	
Gen. Gamma	0,06513	30	413,24	27	2310,3	28
Rayleigh	0,06676	31	980,73	32	5019	33
Logistic	0,07179	32	567,86	29	2719,5	30
Error	0,07445	33	569,8	30	2953,6	31
Rice	0,07809	34	1250,7	36	5077,8	34
Hypersecant	0,08254	35	713,94	31	3641,5	32
Inv Gauussian	0,09264	36	4423,4	46	9963,1	39
Chi-Squared (2P)	0,09667	37	988,38	33	2245,9	27
Laplace	0,11071	38	1093,2	35	5860,3	35
Log-Logistic	0,11354	39	1410,7	37	10447	40
Lognormal	0,11667	40	1553,9	38	10793	41
Cauchy	0,13056	41	1045,8	34	7899,6	38
Gumbel Min	0,13428	42	3279	44	11604	43
Pareto 2	0,14232	43	2150,9	39	11752	44
Erlang	0,1467	44	2557,3	42	6383,3	36
Chi-Squared	0,15511	45	2909,9	43	7201,7	37
Exponential (2P)	0,15634	46	2426,5	40	11588	42
Exponential	0,15745	47	2461,7	41	11800	45
Pearson 5	0,15755	48	10880	56	22724	47
Frechet	0,19512	49	4348,7	45	26663	48
Frechet (3P)	0,20887	50	5145,1	47	N/A	
Triangular	0,23569	51	5537,7	48	16487	46
Pearson 5 (3P)	0,23624	52	6396,4	49	45755	51
Levy	0,23933	53	6751	51	62458	53
Inv Gaussian (3P)	0,26019	54	6685,6	50	28166	49
Power Function	0,26024	55	7693,6	54	N/A	
Fatigue Life	0,27575	56	7017,7	52	28646	50
Levy (2P)	0,32975	57	7030,4	53	49754	52
Pareto	0,44505	58	16957	58	2,29E+05	56
Reciprocal	0,4885	59	21925	59	88918	54
Error Function	0,55293	60	56428	60	1,96E+05	55
Student's t	0,73371	61	98610	61	5,70E+05	57

Konya'da ölçülen rüzgar şiddeti verileri analiz edildiğinde ise Wakeby dağılımı bütün hata testlerinde en iyi sonucu vermiştir. Kolmogorov Smirnov testine göre en iyi ikinci dağılım Dagum dağılımıdır. Dagum dağılımı Anderson Darling testinde üçüncü sırada ve Chi Squared testinde ise altıncı sıradadır. Weibull dağılımı ise Kolmogorov Smirnov testine göre 21. sırada, Anderson Darling testine göre 19. sırada ve Chi Squared testine göre ise 18. sırada yer almaktadır. Daha önce başarı sıralamalarında üst sıralarda yer alabilen Johnson SB dağılımı ise Kolmogorov Smirnov testinde üçüncü ve Chi Squared ile Anderson Darling testine göre ikinci sırada yer almaktadır.

Raman bölgesinde ölçülen veri seti için dağılımların gerçek frekans dağılımı Şekil 3.30'da sunulmuştur.



Şekil 3.30 : Raman rüzgar histogramı ve kullanılan dağılımlar.

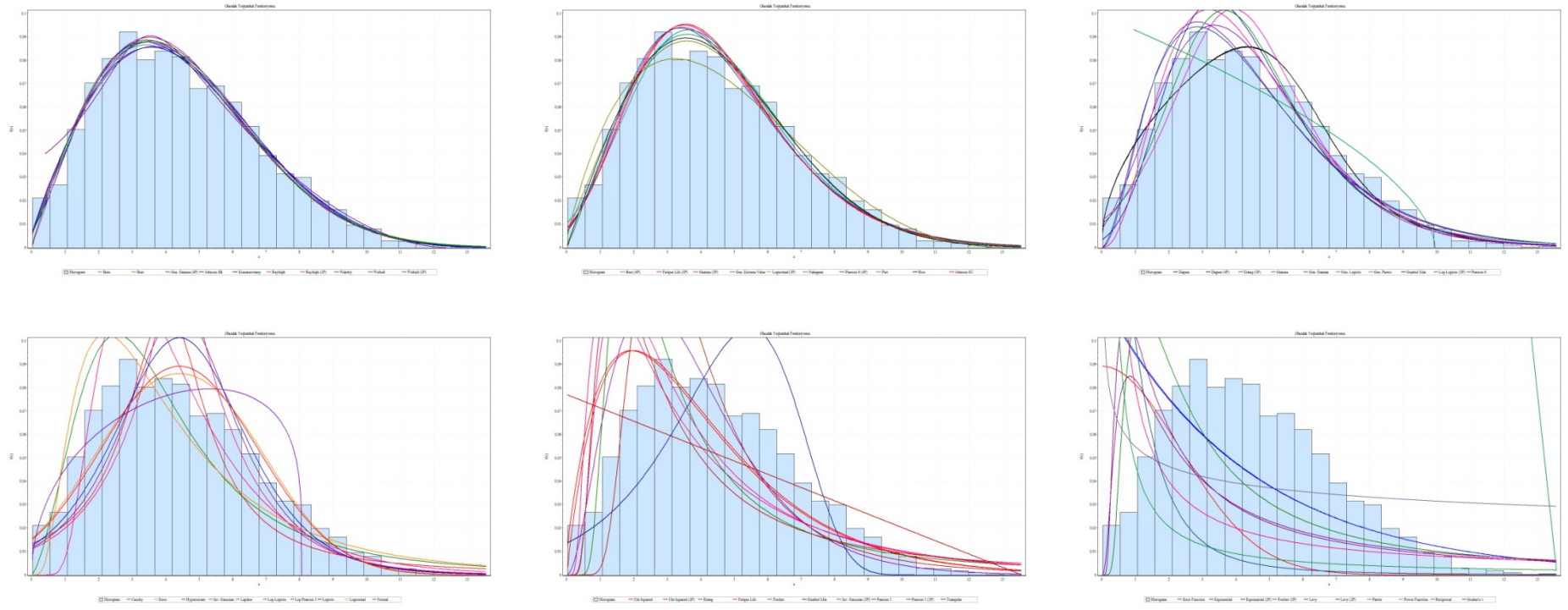
Raman bölgesi için hata analizi sonuçları Çizelge 3.26'de sunulmuştur.

Çizelge 3.26 : Raman hata analizi sonuçları.

Dağılımlar	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-Squared	
	Hata Analizi Sonucu	Sıralama	Hata Analizi Sonucu	Sıralama	Hata Analizi Sonucu	Sıralama
Wakeby	0,00935	1	1760,1	40	N/A	
Gen. Extreme Value	0,00977	2	5,3591	1	65,425	1
Lognormal (3P)	0,01155	3	8,1437	2	128,55	3
Johnson SU	0,01167	4	8,1557	3	115,62	2
Log-Logistic (3P)	0,0129	5	22,645	8	206,98	6
Fatigue Life (3P)	0,01496	6	15,512	5	185,54	4
Burr (4P)	0,01514	7	16,292	6	222,08	7
Pearson 6 (4P)	0,01514	8	15,182	4	195,2	5
Dagum (4P)	0,01698	9	20,324	7	258,54	8
Gen. Gamma (4P)	0,01734	10	22,93	9	283,9	9
Dagum	0,01752	11	28,755	10	354,25	13
Johnson SB	0,01829	12	31,282	11	324,01	10
Beta	0,01922	13	34,764	12	333,1	12
Gamma (3P)	0,02024	14	36,941	13	387,25	15
Gen. Logistic	0,02247	15	49,297	15	331,14	11
Burr	0,02446	16	42,365	14	360,72	14
Gamma	0,02492	17	56,749	16	420,16	16
Gumbel Max	0,02521	18	77,218	17	608,22	18
Gen. Gamma	0,03448	19	84,026	18	548,36	17
Weibull (3P)	0,03512	20	140,26	21	1162,6	22
Kumaraswamy	0,0353	21	146,91	22	1179,9	23
Pearson 6	0,03569	22	92,605	19	615,63	19
Weibull	0,03583	23	139,03	20	1160,7	21
Erlang (3P)	0,04816	24	208,96	23	620,76	20
Gen. Pareto	0,05059	25	10042	55	N/A	
Inv Gauussian	0,05082	26	1056,4	34	2279,7	27
Chi-Squared	0,0611	27	275,31	24	1491,3	24
Rayleigh	0,06215	28	504,62	28	2296,9	28
Log-Logistic	0,06857	29	490,66	27	2974,9	30
Rayleigh (2P)	0,07129	30	427,83	26	1845,9	25
Log-Pearson 3	0,07214	31	11147	56	N/A	
Chi-Squared (2P)	0,07384	32	408,92	25	1883,4	26
Lognormal	0,07914	33	644,66	29	3574	31
Rice	0,09429	34	920,34	31	2726,9	29
Normal	0,0951	35	998,54	33	6940	36
Logistic	0,09897	36	906,69	30	5963,3	34
Pert	0,10125	37	1261,8	38	7583,5	37
Hypersecant	0,10811	38	968,42	32	6554,3	35
Pearson 5	0,11102	39	5300,2	51	12852	42
Cauchy	0,12047	40	1166,8	36	8003,3	38
Nakagami	0,1206	41	1154	35	5838,5	33
Error	0,13234	42	1217,1	37	8094	39
Laplace	0,1356	43	1264,7	39	8491,4	40
Erlang	0,13966	44	2260,3	41	4834,5	32
Frechet	0,15195	45	2938,3	43	N/A	
Gumbel Min	0,16504	46	4604	50	N/A	
Inv Gauussian (3P)	0,17646	47	2857,9	42	10977	41
Frechet (3P)	0,1836	48	3946,9	49	N/A	
Pearson 5 (3P)	0,18505	49	3768,9	48	21213	47
Exponential (2P)	0,19081	50	3073,6	44	14110	44
Exponential	0,19262	51	3135,5	45	14485	45
Fatigue Life	0,20376	52	3439,6	46	13496	43
Pareto 2	0,20416	53	3477,3	47	14534	46
Levy	0,29027	54	6572,2	52	50517	50
Power Function	0,32552	55	9072,4	54	N/A	
Levy (2P)	0,34165	56	7903,3	53	47839	49
Triangular	0,35537	57	11376	57	35282	48
Pareto	0,47463	58	16456	58	2,30E+05	53
Reciprocal	0,49995	59	18904	59	94343	51
Error Function	0,5964	60	52387	60	1,64E+05	52
Student's t	0,74263	61	82059	61	3,73E+05	54

Raman'da ölçülen rüzgar şiddeti verileri analiz edildiğinde ise Kolmogorov Smirnov testine göre en iyi sonucu Wakeby dağılımı vermektedir. Fakat Wakeby dağılımı Anderson Darling testine göre ise 40. sırada yer almaktadır. Anderson Darling ve Chi Squared testine göre birinci sırada yer alana Gen. Extreme Value dağılımı Kolmogorov Smirnov testine göre ikinci sırada yer almaktadır. Weibull dağılımı ise Kolmogorov Smirnov 23. sırada, Anderson Darling ve Chi Squared testine göre ise sırasıyla 20. ve 21. sırada yer almaktadır. Daha önce sıralamalarda üst sıralarda yer alan Dagum dağılımı ise Kolmogorov Smirnov ve Anderson Darling testine göre 11 ve 12. sırada iken Chi Squares testine göre ise 13. sırada yer almaktadır.

Sinop bölgesinde ölçülen veri seti için dağılımların gerçek frekans dağılımı Şekil 3.31'de sunulmuştur.



Şekil 3.31 : Sinop rüzgar histogramı ve kullanılan dağılımlar.

Sinop bölgesi için hata analizi sonuçları Çizelge 3.27'de sunulmuştur.

Çizelge 3.27 : Sinop hata analizi sonuçları.

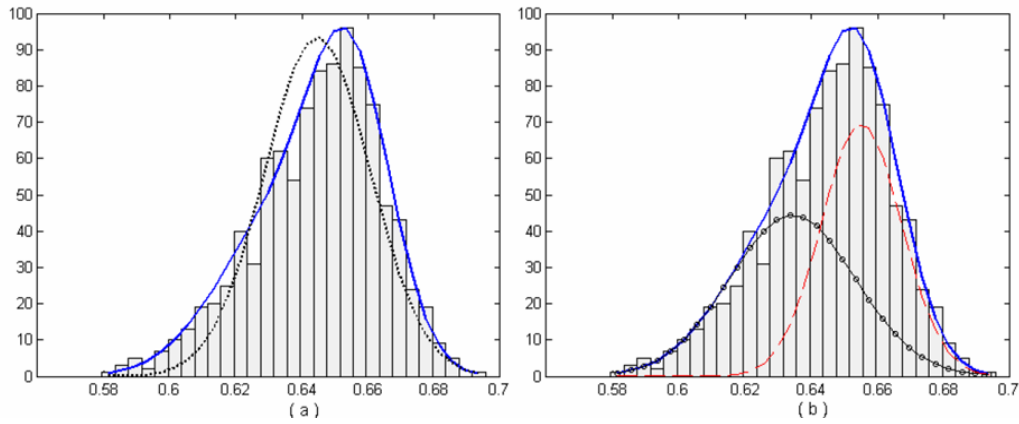
Dağılımlar	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-Squared	
	Hata Analizi Sonucu	Sıralama	Hata Analizi Sonucu	Sıralama	Hata Analizi Sonucu	Sıralama
Beta	0,00972	1	1,7317	2	53,611	4
Johnson SB	0,01086	2	1,3443	1	48,309	2
Kumaraswamy	0,01282	3	3,1363	3	92,433	10
Rayleigh (2P)	0,01307	4	4,2636	7	35,299	1
Burr	0,014	5	5,7719	8	49,14	3
Wakeby	0,01427	6	927,01	42	N/A	
Weibull (3P)	0,01488	7	3,7837	4	59,158	6
Weibull	0,01491	8	6,1712	9	54,495	5
Gen. Gamma (4P)	0,01503	9	4,1478	6	90,195	9
Rayleigh	0,01543	10	8,8024	10	70,307	7
Burr (4P)	0,01551	11	3,8711	5	87,703	8
Rice	0,01796	12	13,511	11	148,79	16
Gen. Extreme Value	0,02342	13	14,892	14	131,63	12
Gamma (3P)	0,02373	14	14,421	13	137,29	15
Pearson 6 (4P)	0,02395	15	13,937	12	132,9	13
Johnson SU	0,02434	16	19,791	18	152,28	18
Lognormal (3P)	0,02435	17	19,68	17	152,41	19
Fatigue Life (3P)	0,02451	18	17,595	15	133,93	14
Pert	0,02463	19	22,09	19	155,35	20
Nakagami	0,0253	20	19,605	16	110,08	11
Dagum	0,02835	21	22,834	20	282,17	22
Dagum (4P)	0,02883	22	22,942	21	273,88	21
Log-Logistic (3P)	0,03335	23	47,989	23	421,33	24
Erlang (3P)	0,03773	24	33,624	22	150,26	17
Gamma	0,03886	25	88,493	28	422,49	25
Gen. Pareto	0,03977	26	2762,6	55	N/A	
Pearson 6	0,04258	27	68,696	25	418,69	23
Gen. Logistic	0,04363	28	66,086	24	492,23	27
Gumbel Max	0,04437	29	87,175	27	530,82	28
Gen. Gamma	0,04663	30	77,805	26	453,39	26
Error	0,04838	31	92,732	29	742,24	29
Normal	0,05285	32	97,968	30	807,15	30
Inv Gauussian	0,068	33	611,12	37	2018,7	33
Logistic	0,07309	34	155,55	31	1156,4	31
Log-Pearson 3	0,07934	35	5197,6	57	N/A	
Lognormal	0,08161	36	311,01	34	2270,9	36
Log-Logistic	0,0827	37	280,07	33	2122,6	35
Hypersecant	0,08852	38	225,02	32	1540,1	32
Cauchy	0,11201	39	353,91	35	3807,1	41
Laplace	0,11357	40	376,45	36	2654,5	39
Gumbel Min	0,11853	41	795,69	40	3926,9	43
Pearson 5	0,12254	42	1317,2	48	3366,6	40
Triangular	0,12328	43	652,45	38	3846,7	42
Chi-Squared	0,13147	44	693,49	39	2060,1	34
Chi-Squared (2P)	0,14497	45	849,51	41	2392,1	37
Frechet	0,15583	46	1144	45	N/A	
Erlang	0,15696	47	1060,5	44	2529,1	38
Inv Gauussian (3P)	0,16185	48	992,86	43	4638,1	44
Pearson 5 (3P)	0,1679	49	1284,6	47	8439	49
Fatigue Life	0,19044	50	1278,7	46	5787,9	45
Exponential (2P)	0,21298	51	1574,1	50	7502,7	46
Pareto 2	0,21385	52	1590,7	51	7762,8	48
Exponential	0,21447	53	1595,2	52	7673,9	47
Frechet (3P)	0,2162	54	1492,4	49	N/A	
Power Function	0,25362	55	2140,5	53	N/A	
Levy	0,34652	56	2732,4	54	22194	51
Levy (2P)	0,38987	57	3229,9	56	21587	50
Pareto	0,48749	58	6204,1	58	76661	53
Reciprocal	0,57572	59	10531	59	36711	52
Error Function	0,65767	60	28633	60	1,22E+05	54
Student's t	0,77803	61	34086	61	1,82E+05	55

Ülkemizde çeşitli ölçüm noktalarında ölçülen rüzgar şiddeti verilerinin modellenmesinde standart dağılımlarla yapılan analizler sonucunda bütün ölçüm noktalarında en iyi sonucu veren tek bir standart dağılım olmadığı belirlenmiştir. Bununla birlikte dağılımların başarısını sıralamak için kullanılan 3 hata analizine göre dağılımların başarı sıralamasında da önemli değişikliklerin olduğu görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında kullanılan veri seti şehir yerleşim yerlerinin uzağında olan ve rüzgar enerjisi potansiyeli olabilecek yerlerde yapılan ölçümlerden elde edilmiş veri setleridir. Bununla birlikte ülkemizde meteoroloji genel müdürlüğü tarafından yapılan rüzgar ölçümlerinin büyük bir bölümü zamanlar şehrin içinde kalmış ve çeşitli faktörlerden etkilenmişlerdir. Bu nedenle bu çalışma kapsamında bu veri setleri analiz edilmemiştir. Bu nedenle standart dağılımların yanında veri seti modellemesinde alternatif olarak kullanılabilecek karışım dağılımları ve MEP dağılımları modellemede başarının artırılması için incelenmesi gereken dağılımlar arasındadır.

4. KARIŞIM DAĞILIMLARI

Verilerin istatistiksel olarak modellenmesinde kullanılan yöntemlerden bir tanesi de karışım dağılımlı modelleme teknikleridir. Karışım dağılımları en az iki dağılımın bileşiminden oluşan dağılımlardır. Konu hakkında ilk çalışmaların 19. Yüzyılın sonunda yapıldığı bilinmektedir [230]. Çalışmada kullanılan veri seti yengeçlere aittir. Bu veri setinin simetrik olmadığı belirlenmiş ve bu veri setinde olan yengeçlerin iki farklı aileden geldiği düşünülmüştür. Önce normal dağılım ile model kurulmuş ardından ise veri seti için iki ortalama, varyans ve ağırlıklı tek değişkene sahip bir model kurulup yengeçlerin aynı aileden gelip gelmediği incelenmiştir. Yengeç ailesinin frekans dağılımı ile bu dağılıma göre klasik dağılım ve karışım dağılımı Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1 : a) Yengeç verisi için frekans dağılımı (kesikli çizgi tek bileşenli, sürekli çizgi karışım dağılımı) b) Karışım dağılımı için toplanmış iki ayrı dağılım ve oluşan karışım dağılımı.

Yapılan çalışmada karışım dağılımının parametrelerinin belirlenmesi için moment yöntemi kullanılmış ve parametrelerin belirlenmesi dokuzuncu derecede bir polinomun çözülmesini gerektirmiştir. Daha sonra ise karışım dağılımları farklı alanlarda, jeoloji, genetik, astronomi, botanik, finans, tıp, kimya, elektrik mühendisliği, görüntü işleme ve su ürünleri gibi, birçok araştırmacı karışım dağılımlarını çeşitli veri setlerinin modellenmesi için kullanmıştır.

Karışım dağılımların kullanılmasının temel nedeni özellikle çok tepeli verilerin modellenmesinde klasik dağılımların yetersiz kalması ve iyi sonuç verememesidir. Karışım dağılımları, dağılımların olasılık yoğunluk fonksiyonlarının toplamı bir olan katsayılar ile çarpılması ve elde edilen olasılık yoğunluk fonksiyonlarının toplanması sonucu elde edilen dağılım modelleridir ve aşağıdaki denklemler 4.1 ve 4.2 ile ifade edilebilirler [231].

$$f_{in}(x) = \sum_{i=1}^n p_i f_i \quad (4.1)$$

$$f_{in}(x) = p_1 f_1 + p_2 f_2 \dots \dots p_n f_n \quad (4.2)$$

Burada $f_{in}(x)$ karışım dağılımını, n dağılımın bileşen sayısını, p_i ağırlık oranı ve f_i ise karışım dağılımdaki bileşen dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonunu göstermektedir. Karışım dağılımlarında olan kısıtlar denklem 4.3-4.5 ile ifade edilebilir [232].

$$f_i(x) \geq 0 \quad (4.3)$$

$$\int_0^{\infty} f_i(x) dx = 1 \quad (4.4)$$

$$0 \leq p_i \leq 1, \sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (4.5)$$

Bir dağılımın karışım dağılımı olabilmesi için yukarıda verilen şartlarının sağlanması gerekmektedir.

Karışım dağılımları farklı özellikler taşıyan dağılımların veya farklı parametrelere sahip aynı dağılımların toplanmasından oluştuğundan veri setinin modellenmesinde standart dağılımlara göre daha esnek bir yapıya sahiptirler ve daha başarılı olabilirler. Literatürde karışım dağılımları olarak kullanılan dağılımın bileşen sayısının belirlenmesi için çeşitli çalışmalar yapılmıştır ve yapılmaktadır. Bu tez kapsamında yapılan literatür araştırmasında bileşen sayısı iki olan karışım dağılımlarının kullanıldığı belirlenmiştir. Bu nedenle bu tez kapsamında bileşen sayısı iki olan karışım dağılımları ile modelleme gerçekleştirilecektir.

Son zamanlarda rüzgar verilerine uygulanan Weibull&Weibull karışım modeli literatürde rüzgar verilerinin dağılımını Weibull dağılımından daha iyi temsil edebileceğini gösterilmiştir [180]. Temel olarak Weibull&Weibull karışım modeli iki

Weibull dağılımının toplamları bir olan iki katsayı ile çarpılması ve toplanması şeklinde basit olarak aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$f_{WW}(v, k_1, c_1, k_2, c_2, p_1, p_2) = p_1 f_{w1}(v, k_1, c_1) + p_2 f_{w2}(v, k_2, c_2) \quad (4.6)$$

Denkleminde $p_1 + p_2 = 1$ 'dir. f_{w1} ve f_{w2} ise Weibull dağılımını göstermektedir. Denklem 4.6 tekrar aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$f_{WW}(v, k_1, c_1, k_2, c_2, p_1, p_2) = p f_{w1}(v, k_1, c_1) + (1 - p) f_{w2}(v, k_2, c_2) \quad (4.7)$$

Denklem 4.7'den de görülebileceği gibi Weibull&Weibull karışım dağılımının 5 parametresi bulunmaktadır. Bunlar iki ölçek (c_1, c_2) , iki şekil (k_1, k_2) ve ağırlık (p) parametreleridir. Ağırlık parametresinin sıfır ya da bir olması durumunda dağılım iki parametrelili Weibull dağılımına dönüşmektedir. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan karışım dağılımları iki dağılımın birleştirilmesi ile oluşmuştur. Buna karşın farklı sayıda dağılımların karışımı ile de karışım dağılımları oluşturulabilmektedir.

Karışım dağılımlarının tanımlanması konusunda literatürde çeşitli teoremler mevcuttur [233]. Bu teoremlerin en önemlilerden biri olduğu kabul edilen 1963 yılında ortaya atılan Teicher teoremi aynı aileden gelen dağılımların karışımına izin vermektedir. Fakat daha sonra yapılan çeşitli çalışmalar Teicher teoreminin koşullarını hafifleterek farklı ailelerden gelen dağılımların da karışım dağılımı olarak tanımlanabileceğini göstermiştir [234].

Bu tez kapsamında 109 karışım dağılımı kullanılmıştır. Yapılan literatür araştırmasına göre kullanılan 96 karışım dağılımı ilk defa rüzgar enerjisi potansiyel analizinde kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında karışım dağılımları ise; Mixture Burr 3P Dağ. Burr 3P Dağ., Mixture Burr 3P Dağ. Exponential Dağ., Mixture Burr 3P Dağ. Gamma Dağ., Mixture Burr 3P Dağ. Gumbel Dağ., Mixture Burr 3P Dağ. HalfNormal Dağ., Mixture Burr 3P Dağ. Inverse Gamma Dağ., Mixture Burr 3P Dağ. Inverse Gaussian Dağ., Mixture Burr 3P Dağ. LogNormal Dağ., Mixture Burr 3P Dağ. Normal Dağ., Mixture Burr 3P Dağ. Rayleigh Dağ., Mixture Burr 3P Dağ. Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağ., Mixture Burr 3P Dağ. Truncated Weibull Dağ., Mixture Burr 3P Dağ. Weibull Dağ., Mixture Exponential Dağ. ExtremeValue Dağ., Mixture Exponential Dağ. Gamma Dağ., Mixture Inverse Gamma Dağ. Exponential Dağ., Mixture Exponential Dağ. LogNormal Dağ., Mixture Exponential Dağ.

Logistic Dağ., Mixture Exponential Dağ. Weibull Dağ., Mixture ExtremeValue Dağ. ExtremeValue Dağ., Mixture ExtremeValue Dağ. Gumbel Dağ., Mixture ExtremeValue Dağ. Normal Dağ., Mixture ExtremeValue Dağ. Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağ., Mixture Gamma Dağ. ExtremeValue Dağ., Mixture Gamma Dağ. Gamma Dağ., Mixture Gamma Dağ. Gumbel Dağ., Mixture Gamma Dağ. HalfNormal Dağ., Mixture Gamma Dağ. Inverse Gauss Dağ., Mixture Gamma Dağ. Lognormal Dağ., Mixture Gamma Dağ. Logistic Dağ., Mixture Gamma Dağ. Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağ., Mixture Gamma Dağ. Weibull Dağ., Mixture HalfNormal Dağ. ExtremeValue Dağ., Mixture HalfNormal Dağ. Inverse Gamma Dağ., Mixture HalfNormal Dağ. Gumbell Dağ., Mixture HalfNormal Dağ. Inverse Gauss Dağ., Mixture HalfNormal Dağ. LogNormal Dağ., Mixture HalfNormal Dağ. Logistic Dağ., Mixture HalfNormal Dağ. Normal Dağ., Mixture HalfNormal Dağ. Rayleigh Dağ., Mixture Inverse Gamma Dağ. ExtremeValue Dağ., Mixture Inverse Gamma Dağ. Gamma Dağ., Mixture Inverse Gamma Dağ. Gumbel Dağ., Mixture Inverse Gamma Dağ. LogNormal Dağ., Mixture Inverse Gamma Dağ. Normal Dağ., Mixture Inverse Gamma Dağ. Rayleigh Dağ., Mixture Inverse Gamma Dağ. Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağ., Mixture Inverse Gamma Dağ. Weibull Dağ., Mixture Inverse Gaussian Dağ. Exponential Dağ., Mixture Inverse Gaussian Dağ. Gumbel Dağ., Mixture Inverse Gaussian Dağ. Inverse Gamma Dağ., Mixture Inverse Gaussian Dağ. Lognormal Dağ., Mixture Inverse Gaussian Dağ. Rayleigh Dağ., Mixture Inverse Gaussian Dağ. Weibull Dağ., Mixture Inverse Weibull Dağ. ExtremeValue Dağ., Mixture Inverse Weibull Dağ. Gamma Dağ., Mixture Inverse Weibull Dağ. Normal Dağ., Mixture Inverse Weibull Dağ. Rayleigh Dağ., Mixture Inverse Weibull Dağ. Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağ., Mixture LogNormal Dağ. ExtremeValue Dağ., Mixture LogNormal Dağ. Gumbel Dağ., Mixture LogNormal Dağ. LogNormal Dağ., Mixture LogNormal Dağ. Logistic Dağ., Mixture LogNormal Dağ. Normal Dağ., Mixture LogNormal Dağ. Rayleigh Dağ., Mixture LogNormal Dağ. Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağ., Mixture LogNormal Dağ. Weibull Dağ., Mixture Logistic Dağ. ExtremeValue Dağ., Mixture Logistic Dağ. Inverse Gamma Dağ., Mixture Logistic Dağ. Inverse Gaussian Dağ., Mixture Logistic Dağ. Logistic Dağ., Mixture Logistic Dağ. Normal Dağ., Mixture Logistic Dağ. Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağ., Mixture Nakagami Dağ. Nakagami Dağ., Mixture Normal Dağ. Gamma Dağ., Mixture Normal Dağ. Inverse Gaussian Dağ., Mixture Normal Dağ. Normal Dağ., Mixture Rayleigh Dağ. Weibull Dağ., Mixture Rayleigh Dağ.

Exponential Dağ., Mixture Rayleigh Dağ. ExtremeValue Dağ., Mixture Rayleigh Dağ. Gamma Dağ., Mixture Rayleigh Dağ. Gumbel Dağ., Mixture Rayleigh Dağ. Logistic Dağ., Mixture Rayleigh Dağ. Normal Dağ., Mixture Rayleigh Dağ. Rayleigh Dağ., Mixture (LES) Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağ. Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağ., Mixture (MLH)Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağ. Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağ., Mixture Truncated Weibull Dağ. ExtremeValue Dağ., Mixture Truncated Weibull Dağ. Gamma Dağ., Mixture Truncated Weibull Dağ. Gumbel Dağ., Mixture Truncated Weibull Dağ. Inverse Gamma Dağ., Mixture Truncated Weibull Dağ. Inverse Gaussian Dağ., Mixture Truncated Weibull Dağ. Inverse Weibull Dağ., Mixture Truncated Weibull Dağ. Lognormal Dağ., Mixture Truncated Weibull Dağ. Logistic Dağ., Mixture Truncated Weibull Dağ. Normal Dağ., Mixture Truncated Weibull Dağ. Rayleigh Dağ., Mixture Truncated Weibull Dağ. Truncated Weibull Dağ., Mixture Truncated Weibull Dağ. Weibull Dağ., Mixture Weibull Dağ. ExtremeValue Dağ., Mixture Weibull Dağ. Gumbel Dağ., Mixture Weibull Dağ. HalfNormal Dağ., Mixture Weibull Dağ. Inverse Weibull Dağ., Mixture Weibull Dağ. Logistic Dağ., Mixture Weibull Dağ. Normal Dağ., Mixture Weibull Dağ. Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağ., Mixture (LES)Weibull Dağ. Weibull Dağ., Mixture (Mom)Weibull Dağ. Weibull Dağ. ve Mixture Weibull Dağ. Weibull Dağ. dağılımlarıdır. Kullanılan dağılımların olasılık yoğunluk fonksiyonlarının ve çeşitli özelliklerinin tek tek yazılması büyük hacim kaplayacağından tezde verilmiştir. Dağılımların parametre belirleme yöntemi olarak en yüksek olabilirlik yöntemi kullanılmıştır. Parametre belirlemek için Mathematica kullanılarak yazılan program kullanılmıştır. Örnek olması açısından ve literatürde kullanılmış olması nedeni ile Weibull&Weibull karışım dağılımı modeli ile Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağılım Weibull Karışım Dağılımı modeline ait istatistiki çeşitli bilgiler aşağıda sunulmuştur.

4.1. Weibull&Weibull Karışım Dağılımı Modeli (MWblWbl)

Rüzgar enerji analizinde ilk kullanılan karışım dağılımlarından bir tanesi Weibull&Weibull karışım dağılımıdır. Rüzgar enerjisi modellemesinde Jaramillo ve Borja yapmış oldukları çalışmada bu dağılımı ilk defa kullanmıştır [171]. Karışımın olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$f_{WW}(v) = p \frac{k_1}{c_1} \left(\frac{v}{c_1}\right)^{k_1-1} e^{-\left(\frac{v}{c_1}\right)^{k_1}} + (1-p) \frac{k_2}{c_2} \left(\frac{v}{c_2}\right)^{k_2-1} e^{-\left(\frac{v}{c_2}\right)^{k_2}}, f_{WW}(v) \geq 0, v > 0, k_{1,2} > 0, c_{1,2} > 0 \quad (4.8)$$

Kümülatif dağılım ise aşağıdaki denklem 4.9 ve 4.10 ile ifade edilebilir.

$$F_{WW}(v) = \int_0^v f_{WW}(v) dv \quad (4.9)$$

$$F_{WW}(v) = 1 - \left(p e^{-\left(\frac{v}{c_1}\right)^{k_1}} + (1-p) e^{-\left(\frac{v}{c_2}\right)^{k_2}} \right) \quad (4.10)$$

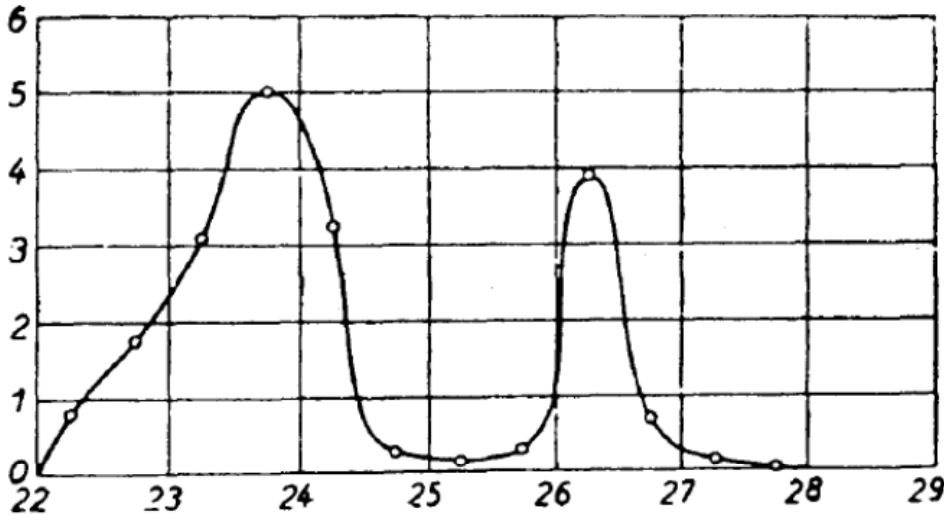
Dağılımın ortalama şiddeti, küplerin ortalaması ve standart sapması aşağıdaki denklemler 4.11-4.13 ile ifade edilebilir.

$$\bar{v}_{ww} = p c_1 \Gamma\left(1 + \frac{1}{k_1}\right) + (1-p) c_2 \Gamma\left(1 + \frac{1}{k_2}\right) \quad (4.11)$$

$$\overline{v^3}_{ww} = p c_1^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k_1}\right) + (1-p) c_2^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k_2}\right) \quad (4.12)$$

$$\sigma^2_{ww} = p[\sigma^2_{w1} - (p-1)(\bar{v}_{w1} - \bar{v}_{w2})^2] - (p-1)\sigma^2_{w2}, [m^2 s^{-2}] \quad (4.13)$$

Literatürde farklı alanlarda birçok veri seti birden çok tepeli olabilmektedir. Hatta Weibull dağılımının tanıtıldığı çalışmada kullanılan veri setlerinden bir tanesi de iki tepeli bir dağılımdır ve aşağıdaki Şekil 4.2’de gösterilmektedir [224].



Şekil 4.2 : Çeliklerin mukavemeti ile ilgili dağılım.

Şekil 4.2'den de görülebileceği gibi birçok veri seti birden fazla tepeli olabilmektedir ve bu veri setlerinin modellenmesinde karışım dağılımlarının kullanılması modellemeye olan başarıyı artırabilmektedir.

Karışım dağılımlarının parametrelerinin belirlenmesi üzerinde uzun yıllardır çalışılan bir konudur. Literatürde dağılımın parametrelerini belirlemek için grafik yöntem (en küçük kareler yöntemi), moment yöntemi ve en yüksek olasılık yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Bununla birlikte alternatif çeşitli yöntemlerde bulunmaktadır. Tez çalışmasının hacmi ve bu çalışma kapsamında kullanılan dağılım sayısının fazla olması nedeni ile bu çalışmada kullanılan karışım dağılımlarının parametre belirlenmesinde en yüksek olasılık yöntemi kullanılmıştır. Fakat Weibull&Weibull karışım dağılımının rüzgar enerjisi alanında önemi nedeni ile parametre belirlenmesinde moment, grafik ve en yüksek olasılık yöntemi kullanılmıştır. Literatürde birçok doktora tezinde ya da makalede parametre belirlemek için R istatistik programında hazırlanmış olan hazır kütüphaneler kullanılmaktadır [235-238]. Bu tez çalışması kapsamında ise parametreleri belirlemek için Mathematica’da bir program geliştirilmiştir.

4.1.1 Weibull&Weibull karışım dağılımı için Moment yöntemi

Moment yöntemi birçok dağılımın parametrelerini belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Temel olarak veri setinin moment değerlerine göre dağılım parametrelerini belirleyen yöntemdir. Weibull&Weibull dağılımında beş bilinmeyen olmasından dolayı beş denklemin birlikte çözülmesi ile dağılım parametrelerinin bulunur.

$$\bar{v}_{ww} - \left[pc_1 \Gamma \left(1 + \frac{1}{k_1} \right) + (1 - p)c_2 \Gamma \left(1 + \frac{1}{k_2} \right) \right] = 0 \quad (4.14)$$

$$\bar{v}_{ww}^2 - \left[pc_1^2 \Gamma \left(1 + \frac{2}{k_1} \right) + (1 - p)c_2^2 \Gamma \left(1 + \frac{2}{k_2} \right) \right] = 0 \quad (4.15)$$

$$\bar{v}_{ww}^3 - \left[pc_1^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k_1} \right) + (1 - p)c_2^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k_2} \right) \right] = 0 \quad (4.16)$$

$$\bar{v}_{ww}^4 - \left[pc_1^4 \Gamma \left(1 + \frac{4}{k_1} \right) + (1 - p)c_2^4 \Gamma \left(1 + \frac{4}{k_2} \right) \right] = 0 \quad (4.17)$$

$$\bar{v}_{ww}^5 - \left[pc_1^5 \Gamma \left(1 + \frac{5}{k_1} \right) + (1 - p)c_2^5 \Gamma \left(1 + \frac{5}{k_2} \right) \right] = 0 \quad (4.18)$$

Karışım dağılımının ilk beş momentleri ile veri setinin ilk beş momentleri arasında farkın sifıra eşitlenmesi ile dağılımın parametreleri belirlenmektedir. Moment yönteminde

bilinmeyen sayısı kadar moment kullanılmalıdır. Bilinmeyen sayısına bağlı olarak kullanılan moment sayısını arttırmak denklem setinin çözülmesini zorlaştırabilmektedir, bazı durumlarda denklem takımı çözülememektedir. Bu nedenle parametreleri belirlemek için denklem 4.19 ve 4.20 uygulanmıştır.

$$\varepsilon_i = 1 - \left(\frac{pc_1^r \Gamma\left(1 + \frac{r}{k_1}\right) + (1-p)c_2^r \Gamma\left(1 + \frac{r}{k_2}\right)}{m_i} \right) \quad (4.19)$$

$$\text{Min} \sum_{i=1}^r (\varepsilon_i)^2 \quad (4.20)$$

Denklem 4.19 ile dağılımın momentleri ile gerçek verilerin momentleri arasındaki hata tanımlanmıştır. Denklem 4.20 ile ise bu hataların karelerinin toplamalarının minimize edilip karışım dağılımı parametreleri belirlenmiştir.

4.1.2 Weibull&Weibull karışım dağılımı grafik yöntem

Grafik yöntem de moment yöntemi gibi birçok dağılımın parametrelerini belirlemek için uzun yıllardır kullanılan bir yöntemdir. Grafik yöntem de veri seti ile dağılımın kümülatif fonksiyonları arasındaki farkların toplamalarının karesi minimize edilemeye çalışılmaktadır. Denklem 4.21 grafik yöntemi göstermektedir.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \left\{ P_i - p \left[1 - e^{-\left(\frac{v_i}{c_1}\right)^{k_1}} \right] - (1-p)e^{-\left(\frac{v_i}{c_2}\right)^{k_2}} \right\}^2, k_{1,2} > 0; c_{1,2} > 0; 0 \leq p \leq 1 \quad (4.21)$$

4.1.3 Weibull&Weibull karışım dağılımı için en yüksek olabilirlik yöntemi

En yüksek olabilirlik yönteminde olabilirlik fonksiyonu maksimize edilmektedir. Bu sayede dağılım parametreleri belirlenebilir. Denklem 4.22 ve 4.23 bu maksimizasyonu göstermektedir.

$$\text{Max} \left(\ln \prod_{i=1}^n \left\{ p \left[\frac{k_1}{c_1} \left(\frac{v_i}{c_1} \right)^{k_1-1} \exp \left[-\left(\frac{v_i}{c_1} \right)^{k_1} \right] \right] + (1-p) \left[\frac{k_2}{c_2} \left(\frac{v_i}{c_2} \right)^{k_2-1} \exp \left[-\left(\frac{v_i}{c_2} \right)^{k_2} \right] \right] \right\} \right) \quad (4.22)$$

$$\sum_{i=1}^n \ln \left\{ p \left[\frac{k_1}{c_1} \left(\frac{v_i}{c_1} \right)^{k_1-1} \exp \left[-\left(\frac{v_i}{c_1} \right)^{k_1} \right] \right] + (1-p) \left[\frac{k_2}{c_2} \left(\frac{v_i}{c_2} \right)^{k_2-1} \exp \left[-\left(\frac{v_i}{c_2} \right)^{k_2} \right] \right] \right\} \quad (4.23)$$

Belirtilen yöntemler ile parametrelerin belirlenmesi için çeşitli nümerik yöntemler kullanılmaktadır.

4.2. Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağılım (Tnd)

Tek taraftan kesilmiş normal dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu ($g(v; \xi, \theta)$) aşağıdaki denklem 4.24 ile ifade edilebilir.

$$g(v; \xi, \theta) = \frac{1}{I_0(\xi, \theta)\theta} Z(v; \xi, \theta), 0 \leq v; \theta > 0 \quad (4.24)$$

Burada $Z(v; \xi, \theta)$ ve $I_0(\xi, \theta)$ aşağıdaki denklemler 4.25 ve 4.26 ile ifade edilebilir.

$$Z(v; \xi, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \text{Exp} \left[-\frac{(v-\xi)^2}{2\theta^2} \right] \quad (4.25)$$

$$I_0(\xi, \theta) = \frac{1}{\theta} \int_0^\infty Z(v; \xi, \theta) dv = \frac{1}{\theta\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty \text{Exp} \left[-\frac{(v-\xi)^2}{2\theta^2} \right] dv \quad (4.26)$$

Kümülatif dağılım ise denklem 4.27 ve 4.28 ile ifade edilebilir.

$$G(v; \xi, \theta) = P(V \leq v) \quad (4.27)$$

$$G(v; \xi, \theta) = \int_0^v \frac{1}{I_0(\xi, \theta)\theta\sqrt{2\pi}} \text{Exp} \left[-\frac{(v-\xi)^2}{2\theta^2} \right] dv \quad (4.28)$$

Bu dağılıma ait ortalama şiddet ve küplerin ortalaması ise aşağıdaki denklemler ile ifade edilmektedir.

$$\bar{v}_{TN} = \xi + \frac{Z(0; \xi, \theta)}{I_0(\xi, \theta)} \quad (4.29)$$

$$\overline{v^3}_{TN} = \xi^3 + 3\theta^2\xi + (\xi^2\theta + 2\theta^3) \frac{Z(0; \xi, \theta)}{I_0(\xi, \theta)} \quad (4.30)$$

$$\sigma^2_{TN} = \theta^2 \left\{ 1 - \left(\frac{\xi Z(0; \xi, \theta)}{\theta I_0(\xi, \theta)} \right) - \left(\frac{Z(0; \xi, \theta)}{I_0(\xi, \theta)} \right)^2 \right\} \quad (4.31)$$

Bu dağılımın Weibull dağılımına göre avantajı sıfır rüzgar şiddeti değerlerinin bu dağılımda dikkate alınmasıdır. Bu nedenle veri setinde çok sayıda rüzgar şiddeti değerleri sıfır ise kullanılması daha uygundur. Buna karşılık, dağılımın çok

parametresi olması nedeni ile dağılım parametrelerini belirlemek uzun zaman alabilmektedir.

4.3. Tek Taraftan Kesilmiş Normal Weibull Dağılımı Karışım Modeli (MTndWbl)

Diğer bir karışım dağılımı modeli Tek taraftan kesilmiş normal dağılım Weibull dağılımı modelidir. Bu dağılım iki dağılımın toplamı şeklindedir ve dağılıma ait olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki denklem 4.32 ve 4.33 ile gösterilebilir.

$$gf_w(v; \xi, \theta, k, c, p) = pg(v; \xi, \theta) + (1 - p)f_w(v; k, c) \quad (4.32)$$

$$gf_w(v; \xi, \theta, k, c, p) = p \frac{1}{I_0(\xi, \theta)\theta} Z(v; \xi, \theta) + (1 - p) \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (4.33)$$

Kümülatif dağılımı ise aşağıdaki denklem 4.34 ifade edilebilir.

$$GF_w(v; \xi, \theta, k, c, p) = pG(v; \xi, \theta) + (1 - p)F_w(v; k, c) \quad (4.34)$$

Dağılıma ait ortalama şiddet, küplerin ortalaması ve standart sapma ise aşağıdaki denklemler 4.45-4.39 ile ifade edilebilir.

$$\bar{v}_{TNW} = p\bar{v}_{TN} + (1 - p)\bar{v}_W \quad (4.35)$$

$$\overline{v^3}_{TNW} = p\overline{v^3}_{TN} + (1 - p)\overline{v^3}_W \quad (4.36)$$

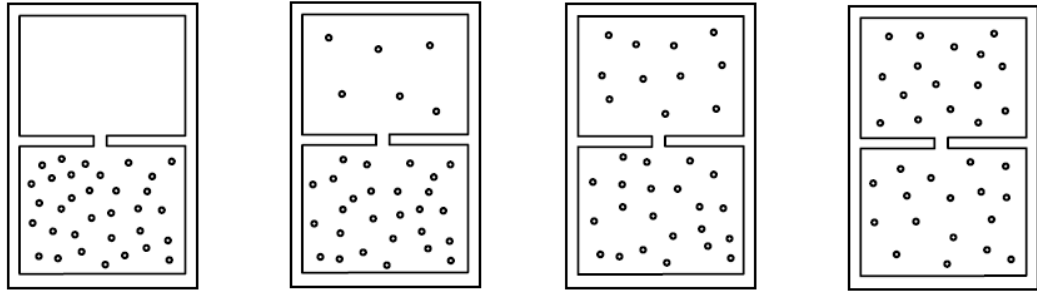
$$\sigma^2_{TNW} = p[\sigma^2_{TN} - (1 - p)(\bar{v}_{TN} - \bar{v}_{TN})^2] - (1 - p)\sigma^2_W \quad (4.37)$$

Bu dağılım Weibull&Weibull karışım modeline göre sıfır verilerini de kapsamı bakımından üstündür, buna karşılık dağılım parametrelerini belirlemek daha uzun zaman almaktadır.

4.4. Entropi Optimizasyon Dağılımları

Yunanca kökenli bir kelime olan Entropi belirsizlik anlamına gelmektedir. Termodinamiğin 2. Yasasının temelini oluşturan entropi kavramı ilk olarak termodinamikte Clausius tarafından kullanılmıştır. Entropi tersinmezlik sonucu oluşan enerji kaybını ifade etmektedir. Termodinamiğin ikinci yasasına göre entropi azalmaz ve artma eğilimindedir. Entropi daha sonra Ludwig Boltzmann tarafından

gaz moleküllerinin kapalı bir sisteme dağılımının belirsizliğinin ölçüsünü belirlemek için kullanılmıştır. Şekil 4.3 gaz moleküllerinin kapalı bir sistemde çeşitli dağılım olasılıklarını göstermektedir. Gaz moleküllerinin kapalı sistemin bir noktasında toplanması mümkündür ve bu bir düzenin göstergesidir. Buna karşın bu olasılık sadece bir tanedir. Fakat gaz moleküllerinin düzensiz dağıldığı durum sayısı daha fazladır ve yeterince uzun zaman sonunda kapalı bir sistem de gaz molekülleri eşit dağılma eğilimindedir. Sistemde oluşan bu denge halinde entropi maksimumdur. Diğer bir ifade ile entropi artış ve maksimuma erişme eğilimindedir.



Şekil 4.3 : Gaz moleküllerinin dağılımı.

Herhangi bir olayın olma olasılığı aynı zamanda bu olayın meydana gelip gelmeyeceği ile ilgili belirsizliğin diğer bir ifade ile entropinin göstergesidir. Termodinamiğin ikinci yasası olasılık artışının ölçüsünü entropi ifade etmektedir. Boltzmann gaz moleküllerin kapalı sisteme farklı dağılmasının tüm durumlarını K ile ifade etmiştir. Alt kümelerin eleman sayısı ve evrensel uzayı ise sırası ile N_k ve N ile ifade edilmiştir. Bu durumda her bir durumun olasılığı aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$p_k = \frac{N_k}{N} \quad (4.38)$$

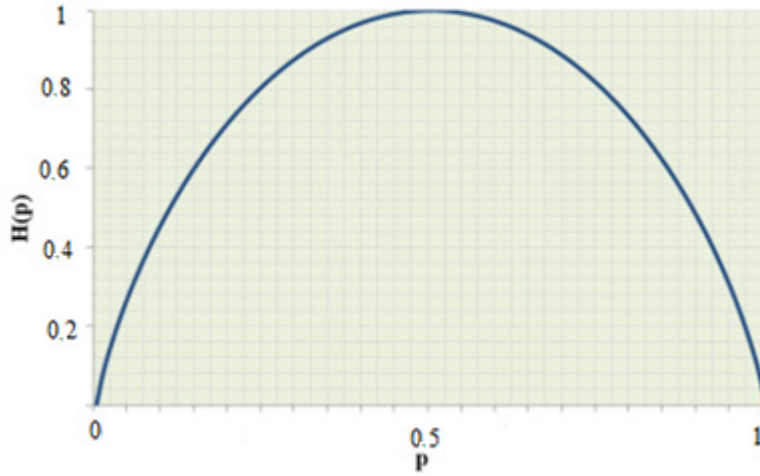
Entropi bir durumda bulunma olasılığını göstermektedir ve Boltzmann entropiyi aşağıdaki denklem 4.39 ile ifade etmiştir.

$$H_{SB}(x) = -\sum_{k=1}^K p_k \ln(p_k) \quad (4.39)$$

Entropi, dengedeki bir sisteminin makroskopik durumlarına karşılık gelen mikroskopik durum sayılarının bir ölçüsüdür.

İstatistikte entropi belirsizliğinin ölçüsüdür. Belirsizlik ne kadar fazla ise entropi o kadar büyüktür. Örneğin içinde farklı renklerde (mavi ve sarı) fakat özdeş iki top

bulunan kapalı bir torbadan top çekilmesi sonucunda mavi topun çekilmesi ya da sarı topun çekilmesi olasılığı 0,5 ve bu olasılıklar birbirine eşittir. Bu nedenle bu durumda maksimum belirsizlik yani maksimum entropi söz konusudur. Şekil 4.4 içinde iki top bulunan bir torbadan top çekilmesi durumunda oluşan entropi grafiğini göstermektedir. Fakat torbada olan toplardan bir tanesi hileli ise hileli olan topun çekilme olasılığı daha fazladır ve belirsizlik daha az olacaktır. Hileli bir çekiliş sonucunda elde edilen bilgi ve entropi daha az olacaktır. Diğer bir ifade ile entropi ve bilgi miktarı ilişkili iki kavramdır. Entropi fonksiyonu konkavdır. Bir olaydaki sonuçların olma olasılıkları birbirine eşit ise entropi maksimum olacaktır. Olayın kesin olması durumunda yani belirsizliğin olmaması durumunda entropi ise sıfır olmaktadır.



Şekil 4.4 : Farklı olasılık değerlerine göre entropi grafiği.

Entropi kavramı termodinamikte doğmuş olmasına rağmen farklı birçok disiplinde benzer entropi tanımları yapılarak kullanılmaktadır. Boltzmann tarafından yapılan entropi tanımının benzerini haberleşme alanında çalışan Claude Shannon tarafından enformasyon (bilgi) teorisinin temellerinin atıldığı “A Mathematical Theory of Communication” isimli çalışmada yapılmıştır [239]. Bir olasılık dağılımına ait herhangi bir bilgiye sahip olunmaması durumunda belirsizlik yani entropinin maksimize edilerek en uygun dağılım seçilebilir. Dağılımın momentleri ile ilgili bilginin olması durumunda ise bu moment kısıtlarını sağlayan ve aynı zamanda belirsizliği maksimize eden dağılım seçilmelidir. Jaynes moment kısıtlarına göre Shannon’un entropi ölçümünü maksimize ederek olasılık dağılımlarının elde edilebildiği bir yöntem gösterilmiştir [240]. Bu yöntem Maksimum Entropi (MaxEnt) olarak adlandırılmıştır. Bu yöntemle göre elde edilen dağılım ise Maksimum Entropi

dağılımı olarak adlandırılmıştır. Maksimum Entropi dağılımının yanı sıra literatürde farklı ölçütlerin minimize ya da maksimize edilmesi sonucu elde edilen çeşitli entropi dağılımları da mevcuttur. Entropinin istatistik biliminde ise bir sisteme ait belirsizlik düzeyinin ölçüsünü ifade etmektedir. Başka bir ifade ile herhangi bir olayın gerçekleşip gerçekleşmeyeceği hakkında belirsizliği ölçüsü entropidir. Bir olayın olma olasılığının artması durumunda belirsizliği azalmaktadır. İstatistik biliminde olan birçok olasılık dağılımı moment bilgileri kullanıp entropi maksimize edilerek elde edilebilmektedir. Başka bir ifade ile Maksimum Entropi dağılımları birçok dağılımın şeklini alabilmektedir.

Son yıllarda kullanılmaya başlayan çeşitli entropi dağılımları farklı problemlerin çözümünde sağladığı avantajlardan dolayı, istatistik, fizik, mühendislik, görüntü işleme, şehir bölge planlama, finans, ekonometri gibi çeşitli alanlarında önemli uygulamalara sahip olmuştur. Maksimum Entropi dağılımlarının rüzgar enerjisi alanında ilk uygulaması Li ve Li [190] tarafından yapılmıştır.

4.4.1 Maksimum entropi dağılımı

Moment bilgilerine göre Shannon entropi ölçümünü maksimum yapan dağılım Maksimum Entropi dağılımıdır. Diğer bir ifade ile Maksimum Entropi dağılımında bilinen belirli sayıda moment değerleri kullanılarak dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonunu entropi maksimize edilerek elde edilmektedir.

Maksimum Entropi dağılımının sürekli ve kesikli rassal değişkenler için tanımlanabilir. Bir X rassal değişkeni $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ şeklinde durumlara sahip ve her bir durumun gerçekleşme olasılığı sırası ile $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ olduğunu kabul edelim. X değişkeninin Shannon entropisi aşağıdaki denklem 4.40 ile ifade edilebilir.

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i) \quad (4.40)$$

Shannon'un tanımına göre, entropi fonksiyonu her zaman pozitifdir ve artma eğiliminde olan konkav bir fonksiyondur. Olasılıkların yer değiştirmesi entropiyi değiştirmez. Shannon entropi fonksiyonu sıfır ile bir arasında bütün değerlerde sürekli bir fonksiyondur. Bu fonksiyon bütün olasılıkların birbirine eşit olması durumunda en büyük değerini almaktadır.

Shannon entropi ölçümünü,

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (4.41)$$

$$\sum_{i=1}^n p_i * g_j(x_i) = m_j \quad (4.42)$$

$$\sum_{i=1}^n p_n * g_m(x_n) = m_m \quad (4.43)$$

Denklem 4.41-4.43 arasında verilen kısıtlara göre maksimum yapan metoda Maksimum Entropi metodu denir. Ayrıca bu metod kullanılarak elde edilen dağılım da Maksimum Entropi dağılımı olarak isimlendirilmiştir. Denklemlerdeki m_j 'lere de moment değerleri ve g_i 'lere ise moment fonksiyonları denmektedir.

Maksimum Entropi metodunda kesikli rassal değişkenler için uygulanması sonucunda n tane bilinmeyen olasılık ve $m+1$ tane kısıt bulunmaktadır. Maksimum Entropi metodunun uygulanabilmesi için kısıt sayısının bilinmeyen olasılık sayısından küçük olması gerekmektedir. Böylece p_i olasılıklarının $n-m-1$ tanesi herhangi keyfi değer alır. Bu durumda Maksimum Entropi metodu sonsuz sayıda oluşan p_i olasılıkları içinden entropi fonksiyonunu moment kısıtlarına göre maksimum yapan olasılıkların bulunmasını sağlar. Bu olasılıklar ise Lagrange çarpanları yöntemiyle bulunur. Lagrange çarpanları yöntemi uygulandığında denklem 4.44 elde edilir [241].

$$p_i = e^{-\alpha_0 - \sum_{j=1}^m \alpha_j g_j(x_i)}, i = 1, \dots, n \quad (4.44)$$

Burada $p = (p_1, p_1, \dots, p_n)$ olasılık dağılımı $H(x)$ entropi fonksiyonunu maksimum yapan Maksimum Entropi dağılımıdır.

Bir X sürekli rassal değişkenine ait olasılık yoğunluk fonksiyonunu $f_{max}(x)$ ile ifade edilsin. Bu değişkenin Shannon entropisi aşağıdaki denklem 4.45 ile ifade edilebilir.

$$H(x) = - \int_a^b f_{max}(x) * \ln(f_{max}(x)) dx \quad (4.45)$$

Denklem 4.47 ile ifade edilen entropi ölçümü aşağıdaki denklem 4.46 ve 4.47 ile ifade edilen şartları sağlamalıdır.

$$\int_a^b f_{max}(x) dx = 1 \quad (4.46)$$

$$\int_a^b f_{max}(x) g_j(x) dx = m_j, (j = 1, 2, 3 \dots n) \quad (4.47)$$

Kısıtları altında maksimum yapan $f_{max}(x)$ dağılımına Maksimum Entropi dağılımı denir. Bu problem Lagrange çarpanları yöntemi kullanılarak çözülür. Bu problemin çözümü literatürde çeşitli kaynaklarda bulunmaktadır. Çözüm sonucu elde edilen dağılım denklem 4.48 ile ifade edilebilir.

$$f_{max}(x) = e^{-\alpha_0 - \alpha_1 g_1 - \dots - \alpha_m g_m(x)} \quad (4.48)$$

Lagrange çarpanları veri setlerinin moment değerlerine bağlıdır. Moment değerleri kullanılarak Lagrange çarpanları bulunur [189].

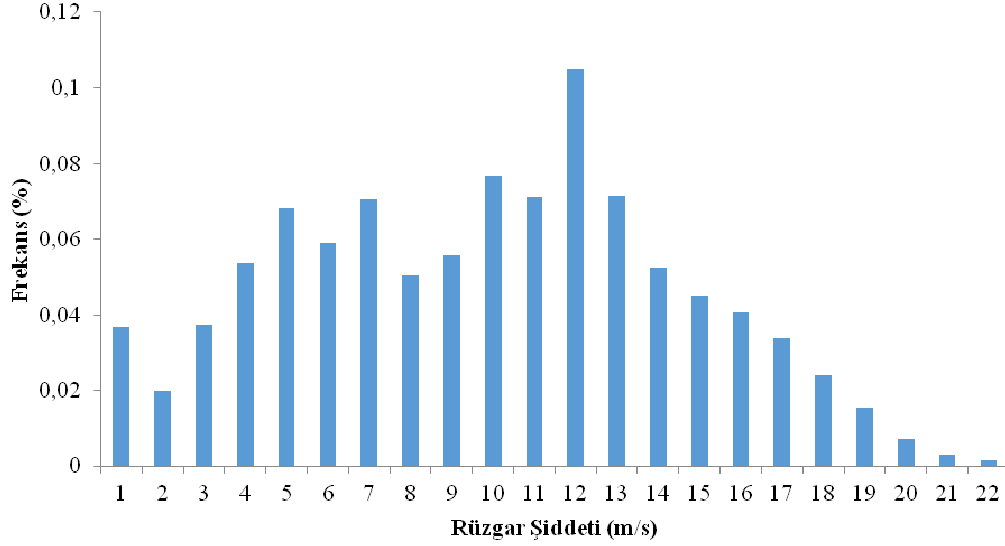
Literatürde, Maksimum Entropi dağılımlarının parametreleri tahmin etmek için farklı yöntemler geliştirilmiştir. En fazla kullanılan yöntem maksimum benzerliğe yakınsamayı garanti eden bir iteratif optimizasyon tekniği olan Expectation Maximization algoritmasıdır. Li ve Li [187]'da Maksimum Entropi dağılımının hesaplanmasında Newton metoduna dayalı algoritmaları karşılaştırmıştır. Bu tez çalışması kapsamında Maksimum Entropi dağılımlarının parametrelerini belirlemek için yazılan programın doğruluğu Liu ve Chang [195] tarafından yapılan çalışma ile karşılaştırılmış ve aynı sonuçlara ulaşıldığı belirlenmiştir.

4.5. Uygulama

Çalışmanın bu kısmında, Weibull, Weibull&Weibull ve 3 farklı moment kriterine göre Maksimum Entropi Dağılımı Muğla Datça da ölçülen rüzgar verilerine uygulanmıştır. Weibull dağılımı için parametre belirleme yöntemi olarak literatürde en fazla kullanılan en yüksek olasılık yöntemi kullanılmıştır. Weibull&Weibull dağılımı için ise parametre belirleme yöntemi olarak ise moment, grafik ve en yüksek olasılık yöntemi kullanılmıştır. Bu dağılımları kullanmanın elektrik üretim tahminlerine etkileri ise güçleri 225 kW ile 3000 kW arasında değişen, rüzgar çiftliklerinde çok sık kullanılan, 33 farklı rüzgar türbini ile belirlenmeye çalışılmıştır.

Çalışmanın bu kısmının amacı Weibull dağılımı ile literatürde sıklıkla kullanılan Weibull&Weibull karışım dağılımının ve MEP dağılımlarının rüzgar enerjisi potansiyeli belirlemesinde ve enerji üretim tahminlerinde olan etkisini göstermektir. Buna ek olarak parametre belirleme yöntemlerinin etkisini de göstermek için literatürde sıklıkla kullanılan parametre belirleme yöntemleri de karşılaştırılacaktır. Bu kapsamda için Muğla Datça bölgesine rüzgar verileri kullanılacaktır. Bölgeye ait 80 metre rüzgar şiddeti frekans dağılımı Şekil 4.5'de gösterilmektedir. Türbinlerin

göbek yüksekliği olan 80 metredeki rüzgar şiddetleri güç kanunu kullanılarak belirlenmiştir. Yükseltme katsayısı 0,2 olarak kabul edilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan dağılımların belirlenen dağılım parametreleri ile 33 farklı rüzgar türbini için hesaplanan kapasite faktörleri verilmiştir. Ardından ise farklı dağılımları kullanmanın enerji üretim tahminlerinde meydana getirdikleri hatalar gösterilmiştir.



Şekil 4.5 : 80 metredeki rüzgar şiddeti frekans dağılımı.

Muğla Datça bölgesine ait 80 m için dağılımlara ait katsayılar aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 4. 1 : Weibull ve Weibull&Weibull dağılımı parametreleri.

	k_1	c_1	k_2	c_2	p
Weibull(mlh)	1,97324	10,42250	--	--	--
MWblWbl(mom)	3,82700	5,54460	5,15241	14,08609	0,45498
MWblWbl (mlh)	1,24359	5,09952	3,08703	12,18810	0,25296
MWblWbl (grf)	1,77392	4,75747	3,33621	12,56070	0,27180

Farklı kısıtlara göre belirlemen MEP dağılımları ise aşağıdaki Çizelge 4.2’de sunulmuştur.

Çizelge 4. 2 : Maksimum entropi dağılımı parametreleri.

	a	b	c	d	e	f
MEP3	3,44658	-0,07340	-0,01073	0,00092	--	--
MEP4	3,51804	-0,13766	0,00327	-0,00016	0,00003	--
MEP5	3,53348	-0,15814	0,01006	-0,00104	0,00008	-0,000000977

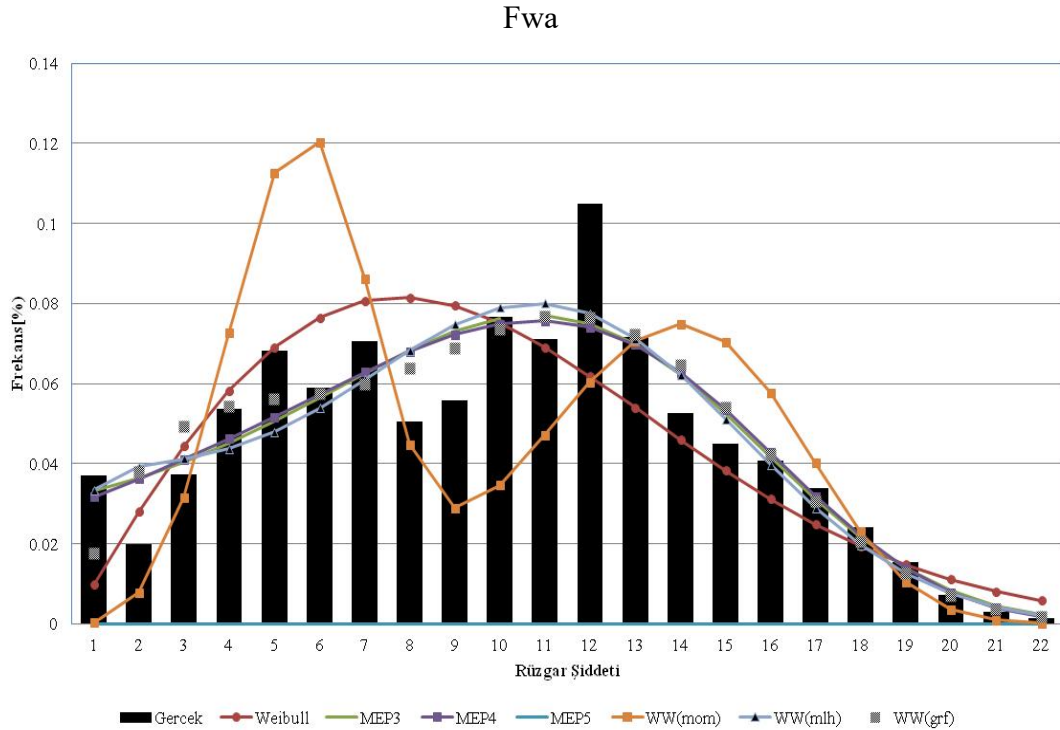
Literatürde dağılımların uygunluğunu karşılaştırmak için çeşitli testler bulunmaktadır ama yapılan çalışmalar bu testlerin farklı sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Bu

nedenle bu çalışma kapsamında dağılımların uygunluğu, enerji üretim tahminlerine göre değerlendirilmiştir. Bölgeye ait 80 m yükseklikte rüzgar şiddetlerinin momentleri Çizelge 4.3’de gösterilmektedir.

Çizelge 4. 3 : Moment değerleri.

m1	9,342
m2	109,150
m3	1429,620
m4	20190,240
m5	301401,220

Şekil 4.6 ile bu dağılımların görsel uyumunu gösterilmektedir.



Şekil 4.6 : Gerçek veri seti ve dağılımlar.

Rüzgar türbini seçiminin olası enerji üretim tahmini farkını ortaya koymak için altı farklı rüzgar türbinin üreticisine ait 33 farklı rüzgar türbini kullanılıp kapasite faktörü (CF) değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan kapasite faktörleri Çizelge 4.4’de sunulmuştur.

Enerji üretimi ve türbin güç eğrisi modellemek için Akdağ ve Güler tarafından yapılan çalışma referans olarak alınmıştır [198]. Bu çalışma sırasında kullanılan türbinlerin güç eğrileri üreticilerin katalog ve internet sitelerinden temin edilmiştir. Rüzgar türbinlerinin güç eğrilerinin farklı olması kapasite faktörünü de

etkilemektedir. Aynı üretici tarafından üretilen ve aynı güçte olan rüzgar türbinlerinde birbirine göre bazen % 10'lara varan enerji üretim farkı oluşmaktadır.

Çizelge 4.4 : Kapasite faktörü değerleri (%).

Marka	Model	Güç(kW)	W(mlh)	WW(mom)	WW(mlh)	WW(grf)	MEP3	MEP4	MEP5	Gerçek
Enercon	E44	910	42,8675	46,0642	47,1294	47,1814	47,5255	47,4313	47,4675	47,3225
	E48	810	49,8454	52,1522	54,661	54,5352	54,9235	54,7749	54,814	54,8095
	E70	2310	44,0188	47,4064	48,5745	48,6174	48,9533	48,8553	48,8935	48,7836
	E82	2050	52,8078	54,2044	57,8521	57,5817	58,0297	57,8434	57,8824	57,9079
Gamesa	G52850	850	49,5294	51,7643	54,3649	54,2088	54,6313	54,4826	54,5207	54,3884
	G58850	850	52,6843	55,0954	58,7576	58,5403	58,9238	58,8256	58,8362	58,8446
	G802000	2000	48,7258	51,1016	53,5155	53,3846	53,7943	53,651	53,6891	53,6038
	G832000	2000	49,9289	51,9981	54,8767	54,6965	55,1167	54,9578	54,9969	54,9625
GE	G872000	2000	52,7872	54,1076	57,7185	57,4241	57,9091	57,725	57,762	57,6598
	G902000	2000	53,155	55,449	59,1351	58,908	59,3038	59,2051	59,2146	59,2743
	GE1MW	1000	51,7213	53,366	56,4308	56,2103	56,6632	56,4967	56,5331	56,4362
	GE15s	1500	50,5861	52,5623	55,7689	55,5608	55,975	55,8042	55,8452	55,9085
	EN1300	1300	43,8429	46,7484	48,2073	48,1948	48,5864	48,4835	48,5182	48,2567
	N802500	2500	43,6325	46,9581	48,2127	48,2395	48,5937	48,4962	48,5337	48,3286
	N902300	2300	51,0963	52,9476	56,1279	55,9021	56,3442	56,1747	56,2138	56,1754
	N1002500	2500	51,7178	54,65	58,2131	58,0119	58,3386	58,2865	58,2875	58,4151
	S701500	1500	49,4519	51,624	54,5838	54,4087	54,8162	54,6571	54,6978	54,6819
	S771500	1500	51,7213	53,3394	56,3021	56,0921	56,5407	56,3786	56,4164	56,2853
Suzlon	S641250	1250	48,5013	50,731	53,3371	53,192	53,6104	53,4652	53,5031	53,3459
	S661250	1250	49,4003	51,5967	54,3094	54,167	54,5687	54,4196	54,4587	54,3408
	S821500	1500	53,9815	54,1571	58,9579	58,5025	59,0963	58,8852	58,9186	58,5383
	S882100	2100	51,582	53,0082	56,6394	56,3586	56,8339	56,6538	56,6919	56,5777
	E33	335	52,507	53,9678	57,3445	57,0947	57,5537	57,3786	57,4157	57,3025
Vestas	V27	225	49,3074	51,4807	54,0974	53,9408	54,3666	54,2187	54,2562	54,1245
	V39	500	46,9062	49,2367	51,7918	51,6583	52,0796	51,9416	51,9795	51,7538
	V42	600	45,6858	48,0902	50,4452	50,3366	50,755	50,6253	50,6622	50,4192
	V47	660	48,8396	50,2794	53,3186	53,0844	53,5873	53,4315	53,4639	53,1635
	V52	850	48,85	51,0614	53,5208	53,3716	53,804	53,6602	53,6967	53,548
	V63	1500	44,5165	47,4716	49,3475	49,3121	49,6833	49,5683	49,6072	49,4158
	V66	1650	42,825	45,844	47,1311	47,1382	47,5228	47,4249	47,4597	47,2219
	V80	1800	50,671	52,3122	55,6546	55,4124	55,8711	55,7006	55,7386	55,6226
	V80-2000	2000	47,3304	49,8026	51,8385	51,7374	52,1595	52,0572	52,0927	51,8858
	V903000	3000	45,6654	48,7577	50,3349	50,3164	50,6812	50,5686	50,6069	50,4649

Dağılımların enerji üretim tahminlerine olan etkisi farklı rüzgar türbinleri için hesaplanmış ve meydana getirdikleri hatalar yüzdesel olarak Çizelge 4.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.5’den de görülebileceği gibi özellikle parametreleri en yüksek olabilirlik yöntemine göre belirlenmiş olan Weibull dağılımı bazı durumlarda enerji üretim tahmininde % 12’ye varan hatalar yapmıştır. Bununla birlikte hataların hepsi pozitiftir. Enerji üretim tahmininde yapılan bu hatalar diğer bir ifade ile teorik üretimle gerçek üretim arasında oluşacak farklar yatırımcı için ciddi bir risk ve belirsizlik içermektedir. Buna ek olarak Moment yöntemi kullanılarak hesaplanan

Weibull&Weibull karışım dağılımı kullanılması sonucu enerji üretim tahmin hataları ise % 6'lara varabilmektedir.

Çizelge 4.5 : Kapasite faktörü hata değerleri (%).

Marka	Model	Güç	W(mlh)	WW(mom)	WW(mlh)	WW(grf)	MEP3	MEP4	MEP5
Enercon	E44	910	9,414	2,659	0,408	0,298	-0,429	-0,230	-0,306
	E48	810	9,057	4,848	0,271	0,500	-0,208	0,063	-0,008
	E70	2310	9,767	2,823	0,429	0,341	-0,348	-0,147	-0,225
	E82	2050	8,807	6,396	0,096	0,563	-0,210	0,111	0,044
	G52850	850	8,934	4,825	0,043	0,330	-0,447	-0,173	-0,243
Gamesa	G58850	850	10,469	6,371	0,148	0,517	-0,135	0,032	0,014
	G802000	2000	9,100	4,668	0,165	0,409	-0,355	-0,088	-0,159
	G832000	2000	9,158	5,393	0,156	0,484	-0,281	0,009	-0,063
	G872000	2000	8,451	6,161	-0,102	0,409	-0,432	-0,113	-0,177
	G902000	2000	10,324	6,454	0,235	0,618	-0,050	0,117	0,101
GE	GE1MW	1000	8,354	5,440	0,010	0,400	-0,402	-0,107	-0,172
	GE15s	1500	9,520	5,985	0,250	0,622	-0,119	0,187	0,113
	EN1300	1300	9,147	3,126	0,102	0,128	-0,683	-0,470	-0,542
Norteks	N802500	2500	9,717	2,836	0,240	0,184	-0,549	-0,347	-0,424
	N902300	2300	9,042	5,746	0,085	0,487	-0,300	0,001	-0,068
	N1002500	2500	11,465	6,445	0,346	0,690	0,131	0,220	0,218
Suzlon	S701500	1500	9,564	5,592	0,179	0,500	-0,246	0,045	-0,029
	S771500	1500	8,109	5,234	-0,030	0,343	-0,454	-0,166	-0,233
	S641250	1250	9,081	4,902	0,016	0,288	-0,496	-0,224	-0,295
	S661250	1250	9,092	5,050	0,058	0,320	-0,419	-0,145	-0,217
	S821500	1500	7,784	7,484	-0,717	0,061	-0,953	-0,593	-0,650
Vestas	S882100	2100	8,830	6,309	-0,109	0,387	-0,453	-0,135	-0,202
	E33	335	8,369	5,819	-0,073	0,363	-0,438	-0,133	-0,198
	V27	225	8,900	4,885	0,050	0,339	-0,447	-0,174	-0,243
	V39	500	9,367	4,864	-0,073	0,185	-0,630	-0,363	-0,436
	V42	600	9,388	4,619	-0,052	0,164	-0,666	-0,409	-0,482
	V47	660	8,133	5,425	-0,292	0,149	-0,797	-0,504	-0,565
	V52	850	8,773	4,644	0,051	0,329	-0,478	-0,210	-0,278
	V63	1500	9,914	3,934	0,138	0,210	-0,541	-0,309	-0,387
	V66	1650	9,311	2,918	0,192	0,177	-0,637	-0,430	-0,504
	V80	1800	8,902	5,952	-0,058	0,378	-0,447	-0,140	-0,209
	V80-2000	2000	8,780	4,015	0,091	0,286	-0,528	-0,330	-0,399
	V903000	3000	9,511	3,383	0,258	0,294	-0,429	-0,205	-0,281

Bu dağılımları kullanmanın meydana getirdiği ortalama mutlak hatalar ise Çizelge 4.5'da sunulmaktadır.

Çizelge 4.6 : Kapasite faktörü ortalama mutlak hata değerleri (%).

Wmlh	WW(mom)	WW(mlh)	WW(grf)	MEP3	MEP4	MEP5
9,167	5,01	0,167	0,357	0,428	0,210	0,257

Çizelge 4.5 ve 4.6'dan da görülebileceği gibi Weibull dağılımı kullanılması sonucu yapılan enerji üretim tahmininde en büyük hata olmaktadır. Weibull dağılımını kullanmanın ortalama mutlak hatası % 9'un üzerindedir. Buna karşılık parametreleri en yüksek olabilirlik yöntemi ile belirlenmiş olan Weibull&Weibull dağılımı kullanılması sonucu meydana gelen mutlak ortalama hata % 0,167 olmaktadır.

Maksimum Entropi dağılımları ise kendi aralarında karşılaştırıldığı zaman en iyi sonucu MEP4 vermektedir. Bu da literatürde daha önce yapılan yayınlardaki öneriler ile uyumludur.

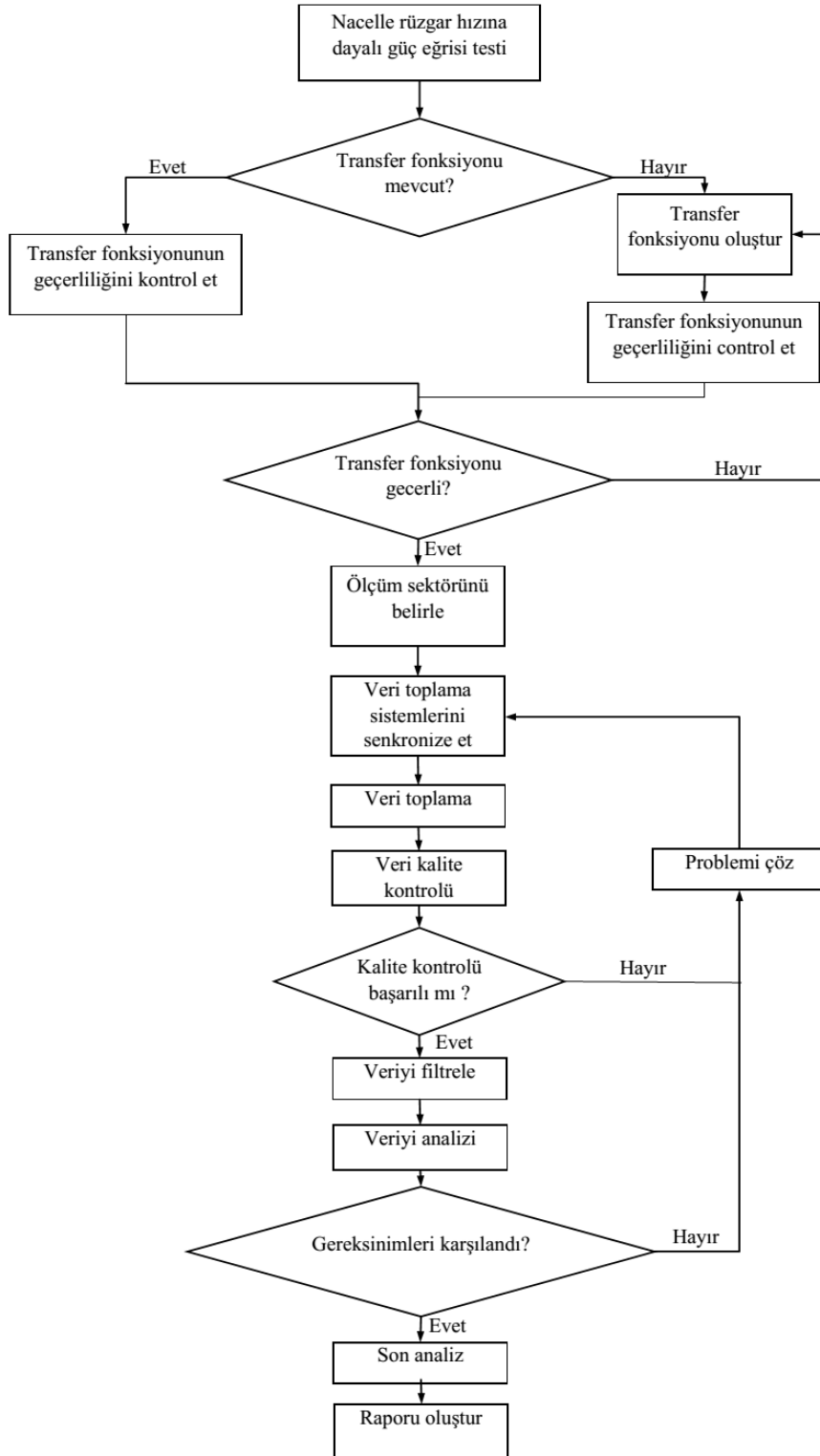
5. RÜZGAR ENERJİSİ SANTRALİ MODELLEMESİ

Bu tez kapsamında yapılan literatür araştırmasında bir rüzgar türbininin güç eğrisinin IEC standardına göre çalışma durumunda çıkartılıp bu eğri kullanılarak karışım dağılımları ile belirlenen teorik ve gerçek üretim karşılaştırılması yapılan çalışma bulunamamıştır. Buna karşılık literatür özetinde de verildiği gibi ya üretici firmanın katalog güç eğrisi kullanılarak tek bir türbin için gerçek üretimi ile teorik üretiminin karşılaştırılması yapılmış ya da rüzgar enerjisi santrali tamamen rüzgar enerjisi santralinin bütün çıktısı üzerinden belirlenen güç eğrisi ile modellenmiştir. Bu iki yaklaşım dağılım kaynaklı hataların belirlenmesini engellemektedir, diğer bir ifade ile üretim ve üretim tahmini arasında olan tahmin hatanın dağılımdan mı yoksa katalog türbin eğrisinden mi kaynaklandığı veya ne kadarının dağılım kaynaklı ne kadarının ise katalog türbin eğrisinden olduğu belirlenememektedir.

Literatürde dağılım kaynaklı hataların belirlenmesi konusunda yapılmış en önemli çalışmalardan bir tanesi Bustamante ve diğ., tarafından yapılmıştır [242]. Çalışmada Fransa'da beş rüzgar enerjisi santralının gerçek enerji üretimi, zaman serisi teorik üretimi ve Weibull dağılımına göre belirlenen enerji üretimi ile karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte tek türbin değil santral modellenmiştir. Yapılan çalışmanın sonuçlarına göre Weibull dağılımına göre hesaplanan enerji üretimi ile rüzgar santralinin ölçülen üretimi arasında olan farkın % 3 ile % 11,3 arasında değiştiği görülmüştür.

Çalışmanın bu bölümünün devamında öncelikle gerçek bir rüzgar enerjisi santralinde olan ölçüm istasyonundan alınan veriler ile rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesi için WAsP ile bölge modellenmiştir. Ardından ise rüzgar enerjisi santralinde olan rüzgar türbinleri arasından bu çalışma kapsamında kullanılan rüzgar türbininin nasıl seçildiği açıklanmıştır. Seçilen rüzgar türbinine ait güç eğrisi IEC standartlarına göre binleme yöntemine göre belirlenmiştir. IEC standardına göre algoritma Şekil 5.1 ile sunulmuştur [243]. Daha sonra rüzgar şiddeti verilerinin dağılımlar ile analizi yapıp enerji üretimi (ortalama güç çıktısı) ve güç yoğunluğu hesaplanıp karşılaştırmalar yapılmıştır. Son olarak ise gerçek koşullarda oluşan güç

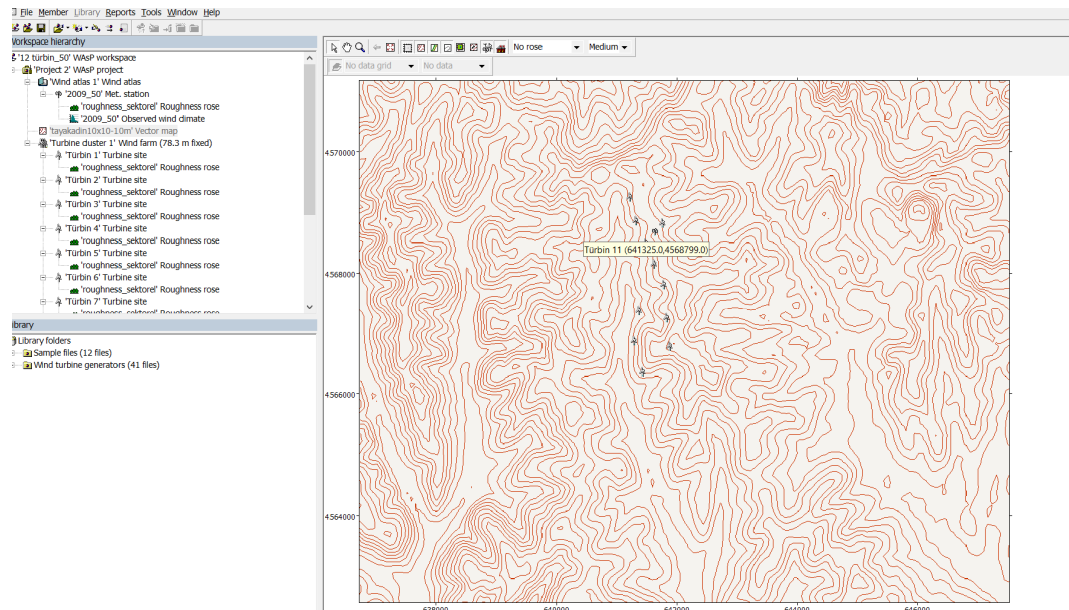
eğrisi ile WAsP programında kullanılarak rüzgar türbininin enerji üretim analizi yapılmıştır. Rüzgar türbinleri performanslarında zamanla kayıp meydana gelebilmektedir [244] bu nedenle bu çalışma kapsamında santral kurulduktan sonra ölçülen ilk tam yıl veri seti kullanılmıştır.



Şekil 5.1 : IEC standartı algoritması.

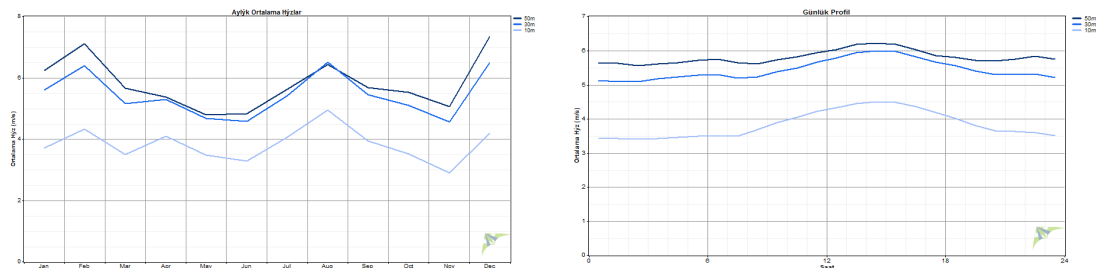
5.1. Bölgenin WAsP ile Modellenmesi

Çalışmanın bu bölümü kapsamında 12 adet 2050 kW rüzgar türbininden oluşan rüzgar enerjisi santrali WAsP programı kullanılarak modellenmiştir. Şekil 5.2 ile bölgenin haritasını ve bölgedeki rüzgar türbinlerinin dağılımını gösterilmektedir. Rüzgar enerjisi santralinde bir ölçüm direği bulunmaktadır. Ölçüm direğinde rüzgar şiddeti verisi 10 dakikalık ortalama olarak kaydedilmektedir. Bölgede kullanılan rüzgar türbinleri Enercon firmasının E82 modelidir. Santral 2008 yılının sonunda üretime geçmiştir.

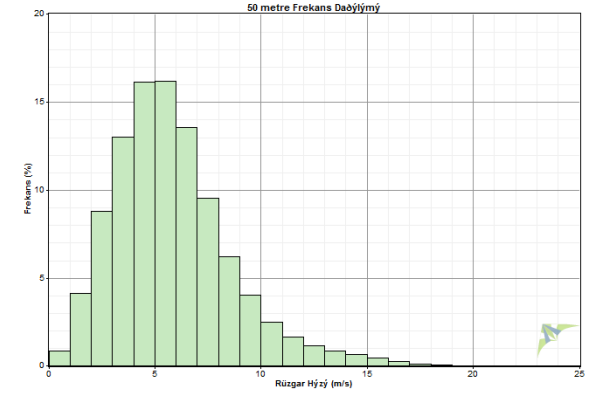
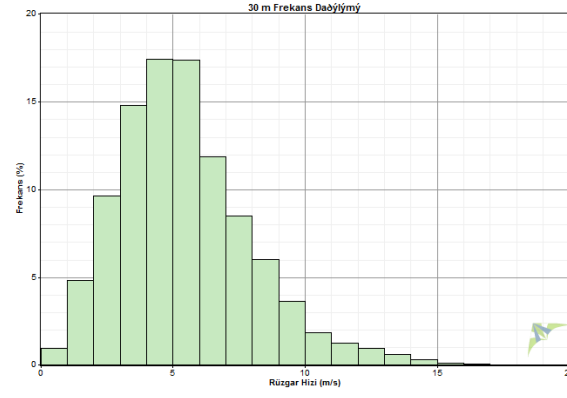
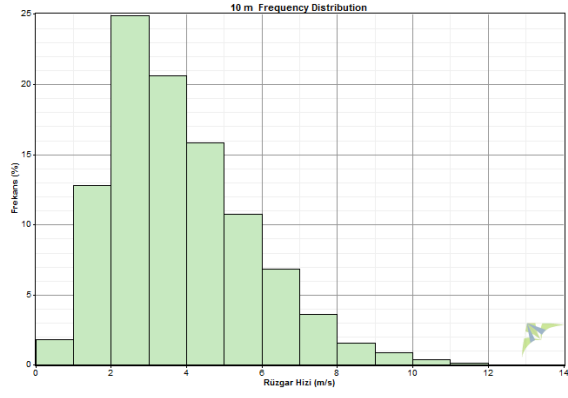


Şekil 5.2 : WAsP ile modellenen rüzgar santralinde türbin dağılımı.

Şekil 5.3'de ise aylık bazda ortalama rüzgar şiddetleri ve saatlik rüzgar şiddetleri profili gösterilmektedir. Aylık ortalama rüzgar şiddetleri 50 metre için 4,78 ile 7,33 m/s arasında değişmektedir. Ortalama güç yoğunluğu ise aynı yükseklik için aylık bazda 106 W/m^2 ile 455 W/m^2 arasında değişmektedir. Şekil 5.4 ise seçilen örnek ölçüm yükseklikleri için rüzgar şiddeti frekans dağılımını göstermektedir.

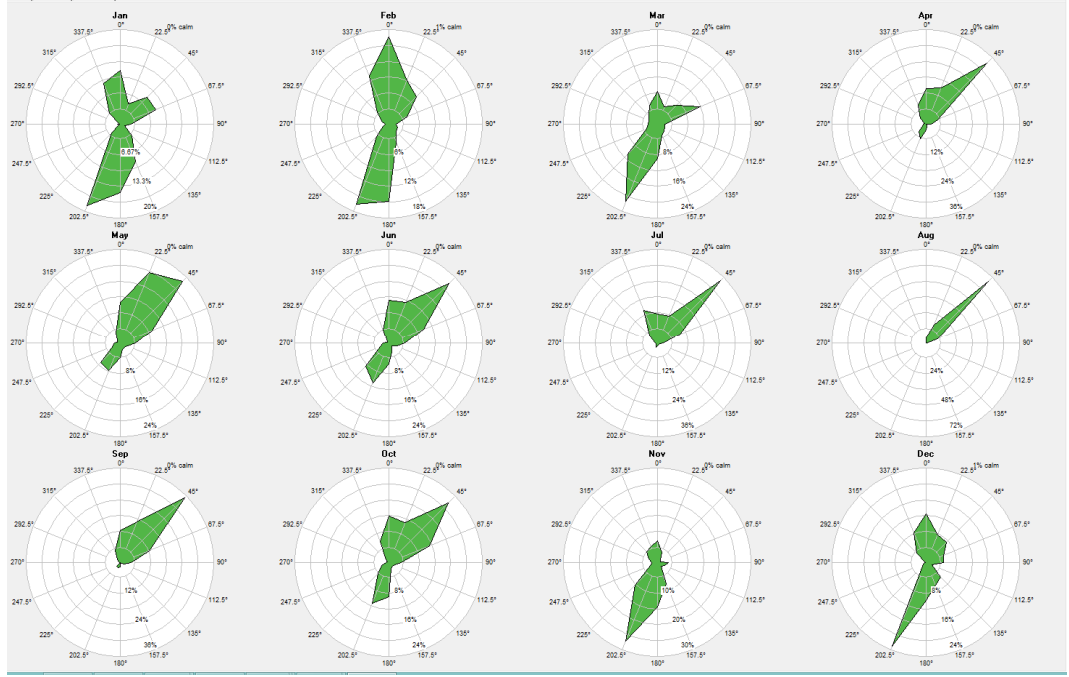


Şekil 5.3 : Aylık bazda ortalama şiddetler ve saatlik rüzgar profili.



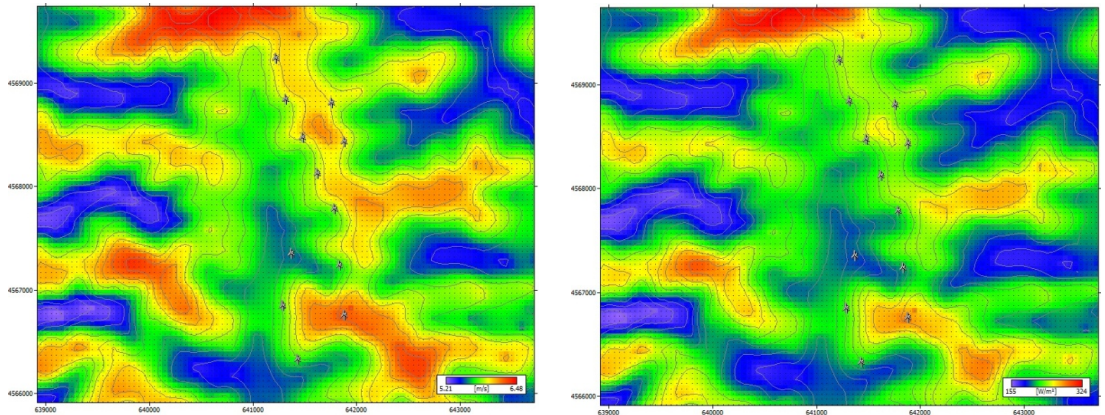
Şekil 5.4 : Seçilmiş yükseklikler için rüzgar şiddeti frekans dağılımı.

Rüzgar türbini konumlandırılmasında önemli konulardan bir tanesi olan bölgenin rüzgar gülü ise Şekil 5.5 ile aylık bazda gösterilmiştir.

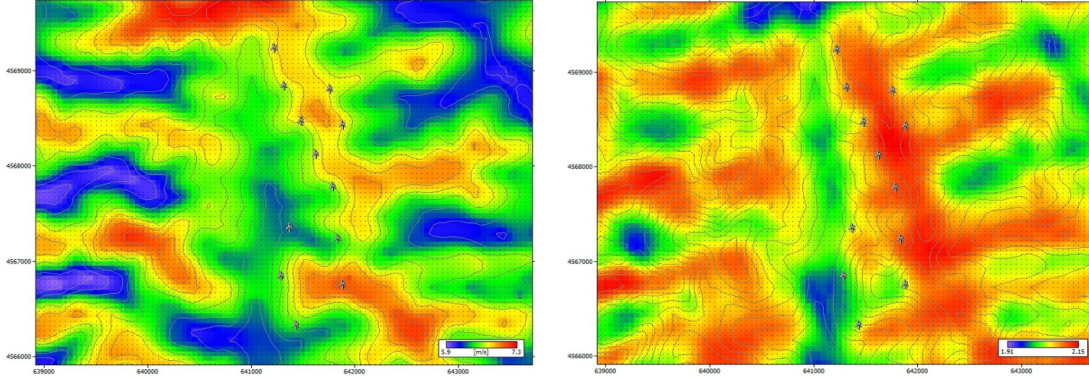


Şekil 5.5 : Aylık bazda rüzgar gülü.

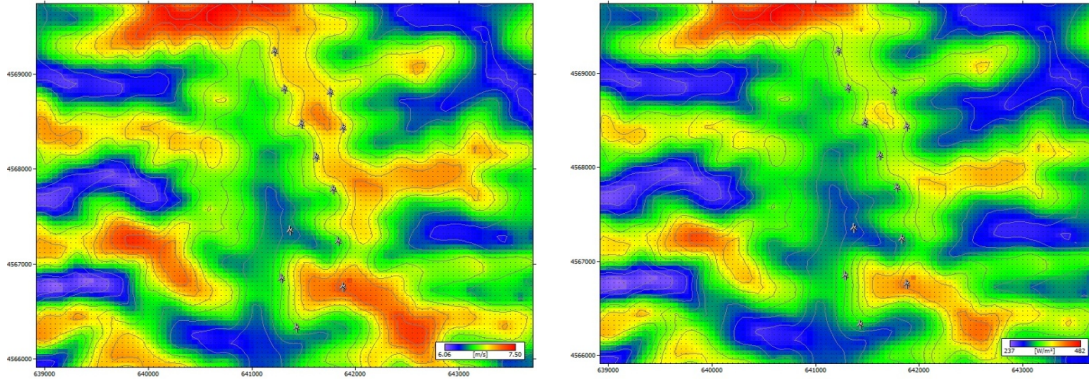
Şekil 5.6 ile 10 metredeki rüzgar verileri kullanılması sonucu santralin modellendiğinde oluşan ortalama şiddet ve güç yoğunluğu değerleri gösterilmektedir. Şekil 5.7 ile ise Weibull dağılımı şekil ve ölçek parametrelerinin 10 metre yükseklikten alınan veriler sonucu yapılan modelleme ile bölgedeki dağılımı gösterilmiştir. Şekil 5.8 ve 5.9 ise 30 metre yükseklikten alınan veriler ile bölgenin modellemesi sonucu oluşan haritaları göstermektedir. Şekil 5.10 ve 5.11 ise 50 metre yükseklikten alınan veriler ile modelleme yapılması sonucu oluşan haritaları göstermektedir.



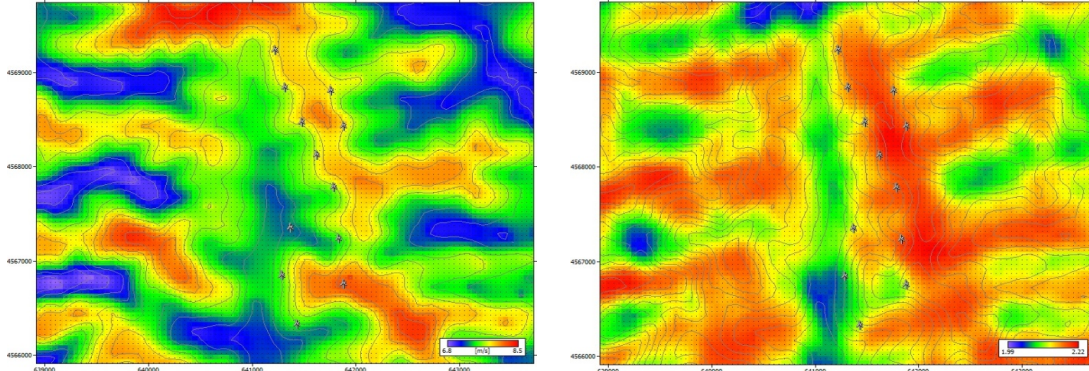
Şekil 5.6 : 10 metre verileri simülasyon sonucu (Şiddet ve Güç Yoğunluğu).



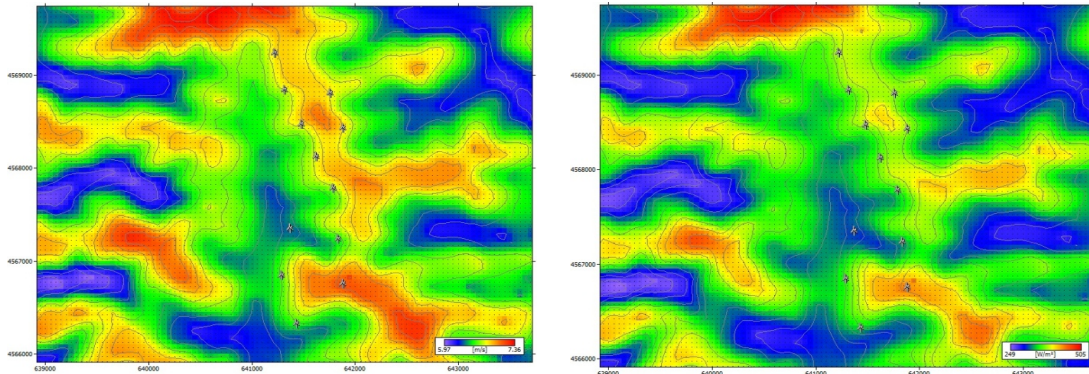
Şekil 5.7 : 10 metre verileri simülasyon sonucu (Ölçek ve Şekil Parametreleri).



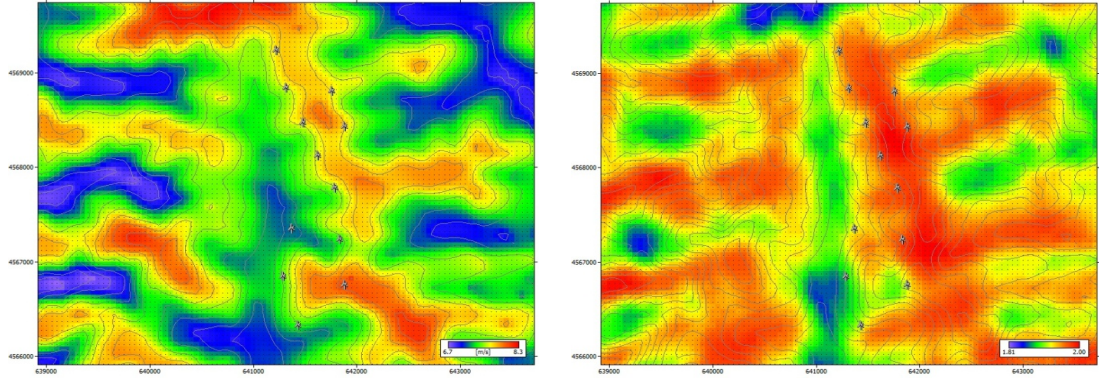
Şekil 5.8 : 30 metre verileri simülasyon sonucu (Şiddet ve Güç Yoğunluğu).



Şekil 5.9 : 30 metre verileri simülasyon sonucu (Ölçek ve Şekil Parametreleri).



Şekil 5.10 : 50 metre verileri simülasyon sonucu (Şiddet ve Güç Yoğunluğu).



Şekil 5.11 : 50 metre verileri simülasyon sonucu (Ölçek ve Şekil Parametreleri).

Rüzgar türbinlerinin konumları ve yükseklikleri Şekil 5.12 ile gösterilmiştir. Şekil 5.12’den de görülebileceği gibi türbinlerin konumlarının yükseklikleri 107 ile 149 metre arasında değişmektedir.

	Site description	X-location [m]	Y-location [m]	Elev. [m]
Ş	Türbin 1	641441.0	4566292.0	113.0
Ş	Türbin 2	641890.0	4566717.0	160.0
Ş	Türbin 3	641299.0	4566804.0	112.0
Ş	Türbin 4	641380.0	4567310.0	107.0
Ş	Türbin 5	641893.0	4568388.0	148.0
Ş	Türbin 6	641770.0	4568763.0	149.0
Ş	Türbin 7	641842.0	4567193.0	138.0
Ş	Türbin 8	641792.0	4567741.0	138.0
Ş	Türbin 9	641630.0	4568084.0	143.0
Ş	Türbin 10	641487.0	4568428.0	140.0
Ş	Türbin 11	641325.0	4568799.0	138.0
Ş	Türbin 12	641230.0	4569193.0	146.0

Şekil 5.12 : Türbinlerin konumları ve yükseklikleri.

Çizelge 5.1 ile bu çalışma kapsamında analiz edilen rüzgar enerjisi santralinde gerçekleşen enerji üretimleri ve kapasite faktörleri değerleri sunulmuştur. Çizelge 5.1’den de görülebileceği gibi türbin bazında ve rüzgar enerjisi santralinde gerçekleşen kapasite faktörleri % 14,69 ile % 28,23 arasında değişmektedir ve ortalama kapasite faktörü % 21,46’dır. Ölçülmüş kapasite faktörleri mevcut şartlar altında ölçülen değerlerdir, diğer bir ifade ile santralin ham verileridir.

Çizelge 5.1 : Türbin enerji üretimleri ve kapasite faktörleri

Türbin Numarası	Gerçek Üretim (MWh, Ham Data)	Kapasite Faktörü (%)
T1	3269	18,20
T2	5011	27,90
T3	3121	17,38
T4	2638	14,69
T5	4517	25,15
T6	4483	24,96
T7	2430	13,53
T8	3169	17,65
T9	4073	22,68
T10	4079	22,71
T11	4415	24,59
T12	5069	28,23
Toplam	46254	21,46

5.2. Rüzgar Türbini Güç Eğrisinin Çıkarılması

Rüzgar türbinlerinin enerji üretimine etki eden en önemli dört faktör rüzgar şiddeti ve dağılımı, güç yoğunluğu dağılımı, rüzgar türbininin güç eğrisi ve hava yoğunluğudur. Rüzgar türbini güç eğrisi, türbin gücüne ve tipine göre değişkenlik göstermektedir. Rüzgar türbini güç eğrisi, rüzgar şiddetlerine karşılık rüzgar türbinin çıktı gücünü gösteren eğridir. Literatürde yapılan çalışmalarda rüzgar türbini güç eğrisi çeşitli fonksiyonlarla modellenmiştir. Bu konuda Akdağ ve Güler [198] tarafından yapılan çalışmada çeşitli modelleme teknikleri karşılaştırılmıştır. Çalışmada farklı modelleme teknikleri sonucu oluşan üretim ile WAsP Turbine Editor programı enerji üretim tahmini ile karşılaştırılmıştır. Carrillo ve diğ., [200] tarafından yapılan çalışmada ise 225 kW ile 7500 kW arasında güçleri değişen yaklaşık 200 rüzgar türbini 4 farklı yöntemle modellenmiş ve modellerin doğruluğu R^2 analizi ve enerji üretim hatalarına göre karşılaştırılmıştır. Lydia ve ark [201] rüzgar türbini güç eğrisi modelleme teknikleri ile ilgili derleme bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmaya göre rüzgar türbini güç eğrileri modelleme teknikleri iki parça halinde incelemişlerdir.

Rüzgar türbini güç eğrisi modelleme teknikleri gerçekleşecek enerji üretiminin belirlenmesinde önemli faktörlerden biridir, bu nedenle güç eğrisinin gerçeğe en yakın şekilde modellenmesi gerekmektedir. Bunlara ek olarak enerji üretim tahminlerinin doğruluğu ilk yatırım maliyetleri işletim maliyetlerine göre çok yüksek olan rüzgar enerjisi santrallerinin finansmanı için de önemlidir. Üretim tahmininde meydana gelen hatalar santralin ekonomik analizinde de aynı oranda etki oluşturacaktır. Çalışmanın bu kısmında türbin eğrisi 9. dereceden bir polinom ile modellenmiştir.

Güç eğrilerinin modellenmesi sırasında karşılaşılan en önemli sorunlardan bir tanesi rüzgar şiddetinin ölçüm noktası ile rüzgar türbini konumuna gelen rüzgar şiddetinin bozulmadan gelebilmesidir. Literatürde rüzgar türbini güç eğrisinin ölçülmesi için çeşitli standartlar geliştirilmiştir. Bu standartlardan bir tanesi IEC tarafından hazırlanmış ve “61400-12-1 Wind turbines–Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines” olarak isimlendirilmiştir [245]. Bu standarda göre ölçüm direği rüzgar türbinin 2-4 rotor çapı kadar uzaklıkta olmalı ve rüzgar şiddeti bozulmalarından etkilenmemelidir. Düz arazilerde, 2-4 rotor çapı

uzaklık ile rüzgar türbini konumundaki rüzgar şiddetinin belirlenmesi için gayet uygundur. Fakat, kompleks arazi yapısında uygulanabilmesi için rüzgar şiddetinde düzeltmelerin yapılması gereklidir.

IEC tarafından yapılan son standart çalışması rüzgar türbinlerinin güç eğrilerinin türbin üzerinden alınan veriler ile yapılması üzerinedir. Bu standart çalışması “61400-12-2 WIND TURBINES –Part 12-2 Power performance of electricity producing wind turbines based on nacelle anemometry” şeklinde isimlendirilmiştir [243]. Bu standarda göre belirlenen türbin eğrisi ile IEC 61400-12-1'e göre belirlenen türbin eğrileri çok az da olsa birbirlerinden farklıdır. Bu çalışmada, nacel üzerindeki üzerinde olan anemometreden alınan veriler kullanılarak rüzgar türbini güç eğrisinin ve enerji üretiminin belirlenmesi amacı ile bir yöntem geliştirilmiştir. Nacel üzerindeki anemometrenin ölçtüğü rüzgar şiddeti rüzgar türbinin rotorundan etkilenmektedir, bu nedenle bu çalışma ölçülen rüzgar şiddetinde gerekli düzeltmelerin nasıl yapılması gerektiğini de belirtmektedir. Fakat bu düzeltme işlemi belirsizliklere neden olmaktadır. Güç eğrileri belirlenirken en önemli faktör rüzgar şiddetinin doğru ölçülmesidir. Anemometrelerin kalibrasyonları yeni yapılmış dahi olsalar, rüzgar şiddetinde meydana gelen dalgalanmalar nedeni ile yaptıkları ölçümlerde hatalar olabilir. Bununla birlikte kompleks arazide ve nacel yakınında bu hatalar artabilmektedir. Güç eğrileri çıkarılırken hava yoğunluğu düzeltme işlemi “61400-12-2 WIND TURBINES –Part 12-2 Power performance of electricity producing wind turbines based on nacelle anemometry” isimli standarta göre yapılmıştır. İlgili standart 10 dakikalık hava yoğunluğu değişimlerini dikkate almaktadır. Güç eğrisini doğru bir şekilde belirleyebilmek için ölçüm direği üzerindeki anemometre ile nacel üzerindeki anemometre arasında bir transfer fonksiyonu (NTF) oluşturulur. Bu fonksiyon sayesinde nacelde ki rüzgar şiddeti serbest akım rüzgar şiddetine çevrilebilir.

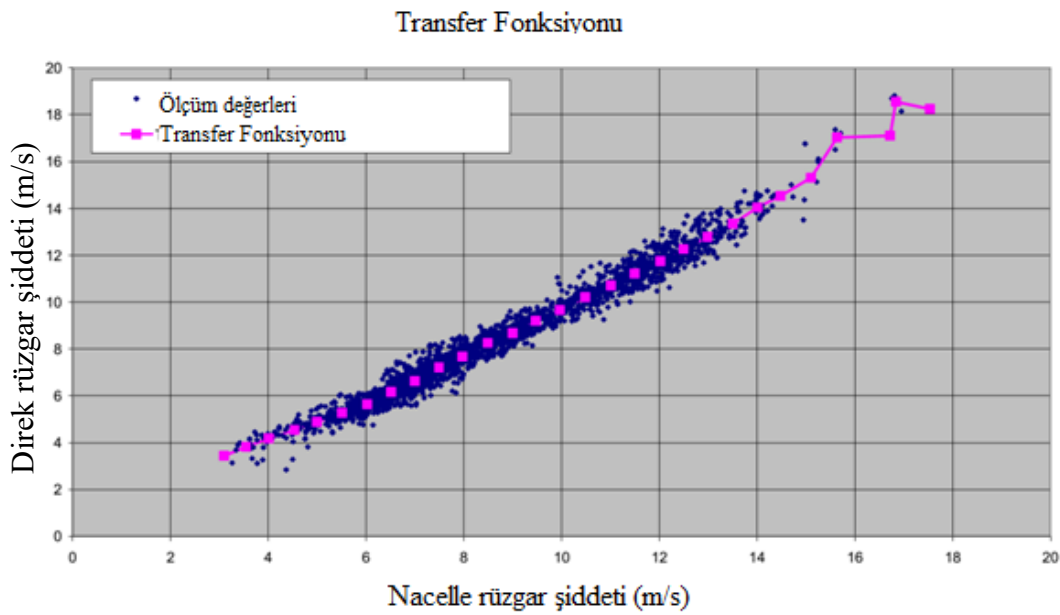
IEC standardı oluşturulmadan önce bazı çalışmalar nacelle anemometresin türbin güç eğrisi modellemesinde kullanılıp kullanılamayacağı konusunu incelemiştir [246-248]. Çalışmaların sonucuna göre nacel anemometre verilerinin türbin eğrisi modellemesinde kullanılmasının da uygulanabileceğini göstermektedir. Teknolojinin hızla gelişmesi ile artık bazı türbin üreticileri rüzgar türbini nacellinde olan anemometre yerine ya da birlikte LİDAR veya spinner anemometre sistemlerini kullanmaktadır.

IEC 61400-12-2 standardına göre güç eğrileri belirlenirken binleme yöntemi kullanılmaktadır. İlgili bindeki ortalama rüzgar şiddeti ve ortalama güç çıktısı aşağıdaki denklemler yardımı ile belirlenebilmektedir.

$$V_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} V_{n,i,j} \quad (5.1)$$

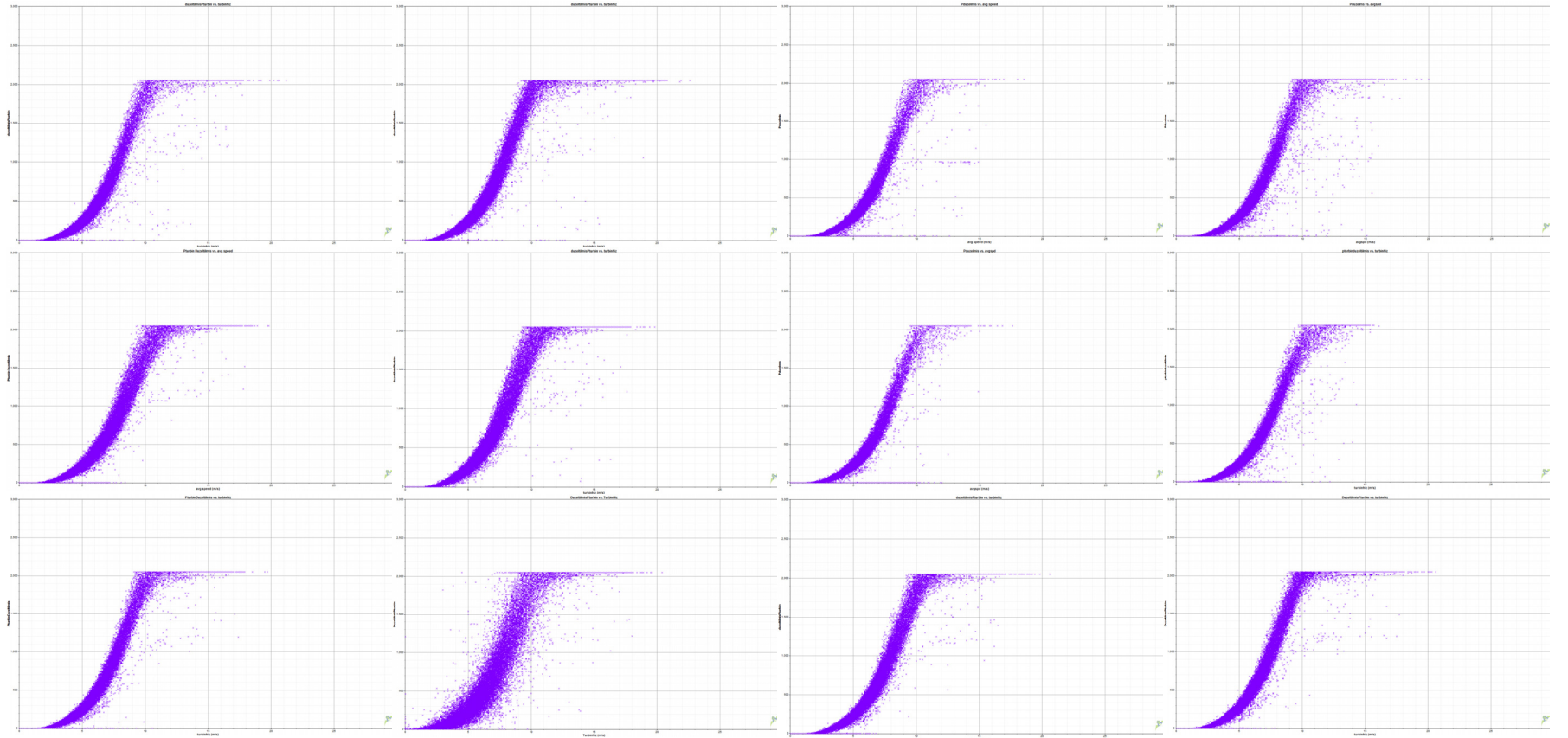
$$P_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} P_{n,i,j} \quad (5.2)$$

Ayrıca naceldeki rüzgar şiddeti ile serbest akım rüzgar şiddeti arasında NTF belirlenmelidir. Şekil 5.13 örnek transfer fonksiyonunu göstermektedir.



Şekil 5.13 : IEC standardında belirlenen örnek NTF.

Rüzgar enerjisi santralindeki türbinlerin birbirlerine ve rüzgar anemometreye uzaklıkları 233 metre ile 2334 metre arasında değişmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan türbinin uzaklığı ise 332 metredir. Türbinlerin birbirlerine olan uzaklıkları ise 233 metre ile 2909 metre arasında değişmektedir. NTF'nin belirlenmesi için öncelikle rüzgar türbinlerinin binleme metodu ile güç eğrileri nacelde olan anemometreye göre çıkarılmıştır. Nacel anemometresine göre belirlenen 12 türbine ait güç eğrileri Şekil 5.14'de gösterilmektedir.

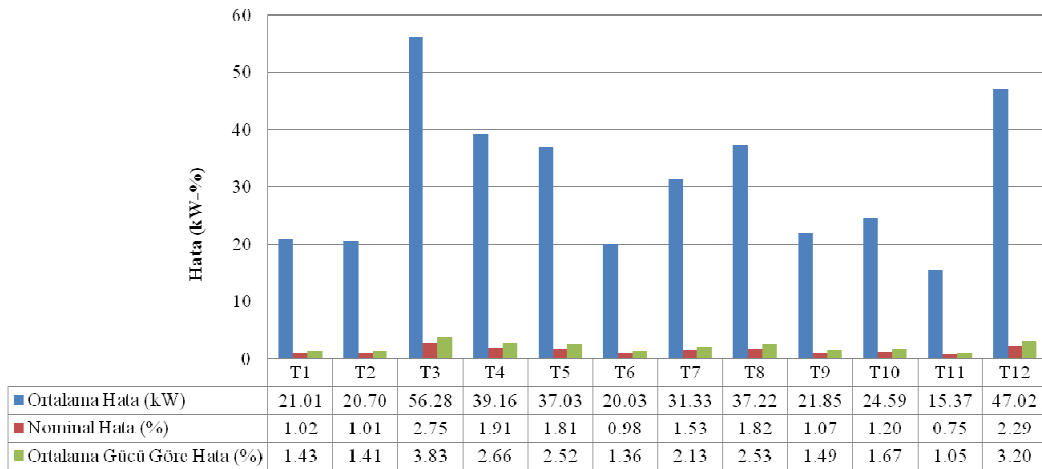


Şekil 5.14 : Nacel anemometreye göre türbin çıktıları.

Nacel anemometre ile elde edilen türbin eğrileri binleme yöntemine göre işlenmiş ve elde edilen türbin güç eğrileri ile üretici firma katalog değerleri ile karşılaştırılmış ve nacel anemometreye göre en iyi sonucu veren türbin belirlenmiştir. Nacel anemometreye göre belirlenen türbin eğrileri Çizelge 5.2'de sunulmaktadır. Nacel anemometreye göre mutlak kW cinsinden hata değerleri Çizelge 5.3'de gösterilmektedir. Çizelge 5.3 incelendiğinde en az hatanın 11. türbin yani T11'de olduğu görülmektedir. 11 numaralı türbinde ortalama mutlak hata 15 kW ve mutlak toplam hatanın nominal güce oranı ise % 0,75'dir. Yapılan diğer hata tanımı olan rüzgar türbininin çalışma aralığındaki ortalama güce göre hatası ise %1,05'dir. Bu hatalar kabul edilebilir sınırlar içerisinde yer almaktadır.

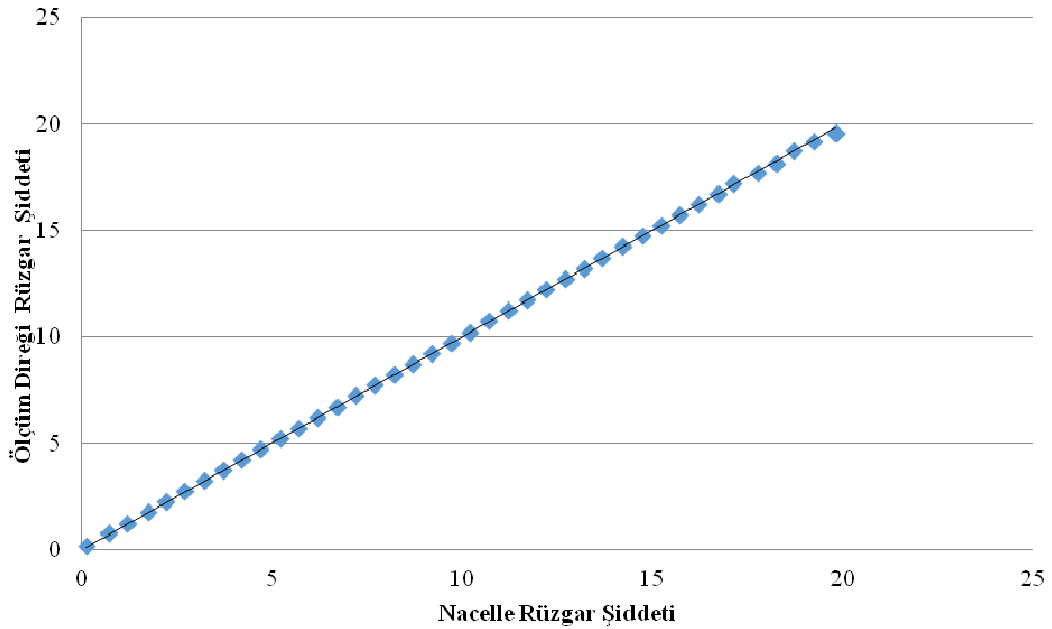
Şekil 5.15 rüzgar çiftliğiindeki diğer türbinlerin hatalarını göstermektedir. Şekil 5.15'den de görülebileceği gibi bazı türbinlerde ortalama nominal hata değeri % 4'lere yaklaşmaktadır. Rüzgar türbini güç eğrisi modellemesinde meydana gelecek hatalar rüzgar türbini enerji üretim tahminini de etkileyeceği için modelleme en iyi şekilde yapılmalıdır. Nacel anemometre kullanılarak çıkarılan 11 numaralı türbinine ait güç eğrisinin hatasının en az olması sebebi ile NTF 11 numaralı türbine göre çıkarılmıştır.

Bu türbine ait NTF Şekil 5.16'de sunulmuştur. Nacel anemometresi ile çıkarılan türbin eğrisine ait hatanın az olması NTF ile ölçüm direği arasındaki bağıntının güçlü olması gerektiğinin bir göstergesidir ve Şekil 5.16'den de görülebileceği gibi NTF'nun R^2 değeri 1'e çok yakındır.



Şekil 5.15 : Nacel anemometreye göre türbin hataları.

Şekil 5.15'de üç farklı hata tanımlanmıştır, bunlar sırası ile ortalama hata, nominal hata ve ortalama güce göre hatadır. Ortalama hata rüzgar türbininin çalışma aralığında her bir bin için olan ölçülmüş güç çıkışı ile katalog türbin eğrisi arasında olan farkın ortalamasını ifade etmektedir. Nominal hata ise ortalama hatanın rüzgar türbini nominal gücüne bölünmesi sonucu elde edilmektedir. Ortalama güce göre hata ise ortalama hatanın rüzgar türbininin çalışma aralığında hesaplanan ortalama güce oranı ile belirlenmektedir. Elde edilen rüzgar türbini güç eğrisi çalışmanın devamında rüzgar türbininin enerji üretimi WAsP simülasyon programı ile belirlenirken ve rüzgar türbini enerji üretimi hesaplanırken ayrıca rüzgar türbini ortalama güç çıkışı hesaplanırken de kullanılacaktır.



Şekil 5.16 : T11 türbinine ait NTF.

Standarta göre serbest rüzgar hızı aşağıdaki denklem 5.3 ile hesaplanmaktadır.

$$V_{serbest} = \frac{V_{met,i+1} - V_{met,i}}{V_{nacel,i+1} - V_{nacel,i}} * (V_{nacel} - V_{nacel,i} + V_{met,i}) \quad (5.3)$$

Denklem 5.3'de $V_{nacel,i+1}$ ve $V_{nacel,i}$ nacellede ölçülen bin i ve i+1'de olan ortalama rüzgar şiddetini ifade etmektedir. $V_{met,i}$, $V_{met,i+1}$ ise ölçüm istasyonunda ölçülen bin i ve i+1'de olan ortalama rüzgar şiddeti ve $V_{met,i}$ ise ölçüm istasyonunda ölçülen rüzgar şiddetidir.

Çizelge 5.2 : Nacel anemometreye göre belirlenen türbin güçleri.

Rüzgar Şiddeti (m/s)	Katalog Verisi (kW)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
1	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,4	0,0	0,0
2	3	0,6	0,6	0,9	0,7	0,5	0,6	0,5	0,5	0,7	3,9	0,6	1
3	25	19,3	19,8	23,8	21,3	18,2	19,3	16,8	19,4	20,8	27,2	19,0	25,4
4	82	73,9	77,9	85,7	77,8	71,5	77,7	69,2	75,6	80,1	86,9	75,0	94,1
5	174	163,7	175,1	185,3	173,9	158,8	172,7	158,5	165,5	176,4	179,3	162,8	201,9
6	321	304,9	324,1	342	322,9	292,9	315,8	284,7	302,7	325,8	321,5	301,5	372
7	532	514,1	544,4	571,7	543,8	476,7	519,5	485,8	511,8	547,4	534,6	506,7	612,7
8	815	819,9	847,4	892,4	866,3	743,8	808,1	786,4	802,3	852,4	825,7	800,3	949,4
9	1180	1220,5	1248,9	1279,1	1267,5	1081,4	1165,2	1163,4	1184,5	1248,9	1186,3	1173	1360,2
10	1612	1630	1661,9	1685,5	1660,2	1445,5	1560,8	1567,7	1546,7	1685,2	1550,9	1583,1	1783,7
11	1890	1898,7	1923	1897,1	1910,5	1792,5	1870,4	1797,7	1797,9	1928	1840,7	1891,3	1998
12	2000	1965,1	1986,3	1946	1980,8	1959	1986,8	1919	1919,3	1996,9	1952,9	2006,1	2020,5
13	2050	2001,1	1989,3	1941	1953	2018,8	2010,3	1970,7	1950,3	2026,9	2000,1	2012,4	2020,1
14	2050	1982,7	2015,7	1948,6	1884,2	2024,9	2015,2	2019,8	1980,6	2024,3	1996,7	2029,5	2023,6
15	2050	1996,6	2014,7	1871,4	1914,3	2033,6	2010,7	1991,9	1926,3	2018,6	2013,4	2014,8	2035,6
16	2050	2008,5	2005	1812,3	1994,4	2039,8	2012,7	2038	2038,9	2031	2035,2	2002	2013,6
17	2050	1983,1	2036,9	1986,6	2050	2022,3	2012,3	2050	2038	2031,5	2008,4	1998	2012,9
18	2050	2033,3	2040,3	1948,4		2013,2	1984,1	2050		1982,3	2001,2	2050	2000,1
19	2050	2050	2032,1	2050	2050	2050	2041,3			2050	1974	2050	2045,6
20	2050	2050	2046,4	2050		2050	2050			2050	2050	2050	2050
21	2050	2050	2049,4								2050	2050	2050
22	2050	2050	2041										
23	2050		2048										
24	2050												
25	2050												

Çizelge 5.3 : Nacel anemometreye göre belirlenen türbin hataları (kW).

Aralık	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
0-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,4	0	0
1-2	2,4	2,4	2,1	2,3	2,5	2,4	2,5	2,5	2,3	0,9	2,4	2
2-3	5,7	5,2	1,2	3,7	6,8	5,7	8,2	5,6	4,2	2,2	6	0,4
3-4	8,1	4,1	3,7	4,2	10,5	4,3	12,8	6,4	1,9	4,9	7	12,1
4-5	10,3	1,1	11,3	0,1	15,2	1,3	15,5	8,5	2,4	5,3	11,2	27,9
5-6	16,1	3,1	21	1,9	28,1	5,2	36,3	18,3	4,8	0,5	19,5	51
6-7	17,9	12,4	39,7	11,8	55,3	12,5	46,2	20,2	15,4	2,6	25,3	80,7
7-8	4,9	32,4	77,4	51,3	71,2	6,9	28,6	12,7	37,4	10,7	14,7	134,4
8-9	40,5	68,9	99,1	87,5	98,6	14,8	16,6	4,5	68,9	6,3	7	180,2
9-10	18	49,9	73,5	48,2	166,5	51,2	44,3	65,3	73,2	61,1	28,9	171,7
10-11	8,7	33	7,1	20,5	97,5	19,6	92,3	92,1	38	49,3	1,3	108
11-12	34,9	13,7	54	19,2	41	13,2	81	80,7	3,1	47,1	6,1	20,5
12-13	48,9	60,7	109	97	31,2	39,7	79,3	99,7	23,1	49,9	37,6	29,9
13-14	67,3	34,3	101,4	165,8	25,1	34,8	30,2	69,4	25,7	53,3	20,5	26,4
14-15	53,4	35,3	178,6	135,7	16,4	39,3	58,1	123,7	31,4	36,6	35,2	14,4
15-16	41,5	45	237,7	55,6	10,2	37,3	12	11,1	19	14,8	48	36,4
16-17	66,9	13,1	63,4	0	27,7	37,7	0	12	18,5	41,6	52	37,1
17-18	16,7	9,7	101,6		36,8	65,9	0		67,7	48,8	0	49,9
18-19	0	17,9	0	0	0	8,7			0	76	0	4,4
19-20	0	3,6	0		0	0			0	0	0	0
20-21	0	0,6	0							0	0	0

Çizelge 5.4 : Nacel anemometreye esme sayıları.

Aralık	345°-15°	15° - 45°	45° - 75°	75° - 105°	105° - 135°	135° - 165°	165° - 195°	195° - 225°	225° - 255°	255° - 285°	285° - 315°	315° - 345°
0-1	116	76	114	57	46	33	26	47	34	36	46	87
1-2	149	136	150	101	72	103	98	204	129	119	94	143
2-3	553	442	548	381	148	235	281	425	258	177	210	489
3-4	732	737	1211	584	255	362	567	707	316	153	235	646
4-5	1086	1169	1475	499	224	376	652	893	289	114	160	594
5-6	1359	1836	1880	320	127	294	866	1180	140	60	110	539
6-7	964	1885	1549	58	87	174	659	905	76	18	56	447
7-8	804	1517	1218	22	32	108	560	755	52	13	25	254
8-9	488	1025	675	14	11	50	395	479	34	10	33	145
9-10	342	711	397	0	5	22	278	357	22	8	22	83
10-11	222	422	185	0	0	7	177	273	6	1	6	75
11-12	115	134	90	0	0	3	171	196	1	0	6	34
12-13	67	117	63	0	0	0	104	117	1	0	4	22
13-14	66	69	16	0	0	1	78	73	0	0	10	16
14-15	45	24	8	0	0	2	49	55	0	0	10	10
15-16	13	7	0	0	0	0	41	21	2	0	8	5
16-17	7	4	1	0	0	0	12	16	1	0	2	4
17-18	4	0	0	0	0	0	5	4	0	0	0	0
19-19	0	0	0	0	0	0	5	6	0	0	0	0
19-20	0	0	0	0	0	0	4	2	0	0	0	0
20-21	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

Çizelge 5.5 : Nacel anemometre kullanılarak yönlere göre türbin gücü çıktıları.

Yönlere Göre Ortalama Türbin Gücü Çıktıları (kW)												
Aralık	345° 15°	15° 45°	45° 75°	75° 105°	105° 135°	135° 165°	165° 195°	195° 225°	225° 255°	255° 285°	285° 315°	315° 345°
0-1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1-2	0,77	0,66	0,88	0,57	0,44	0,39	0,57	0,58	0,56	0,58	0,50	0,61
2-3	18,44	20,86	22,30	20,13	22,33	16,72	19,28	16,91	17,21	18,40	19,07	16,42
3-4	70,68	73,64	80,15	78,47	75,91	76,51	79,58	72,93	75,29	75,54	74,13	66,00
4-5	165,28	164,41	170,22	163,58	163,50	162,44	166,60	153,25	147,44	154,07	166,06	154,98
5-6	306,31	304,17	312,11	285,72	304,56	292,83	313,45	287,97	256,77	269,70	304,02	282,48
6-7	520,54	511,38	518,00	448,91	520,67	509,64	511,90	479,10	436,41	424,72	466,09	489,77
7-8	844,85	805,04	812,22	734,45	749,09	825,37	799,59	748,20	700,02	711,38	716,16	766,13
8-9	1207,39	1186,21	1186,44	1164,43	1153,18	1163,40	1194,71	1086,53	1118,82	1127,40	1060,03	1175,32
9-10	1648,20	1589,96	1599,39		1328,20	1498,27	1588,01	1519,17	1342	1467,38	1432,41	1590,34
10-11	1905,02	1882,51	1898,64			1843,71	1890,14	1899,11	1778,83	1709	1707	1886,45
11-12	1977,28	2003,84	2000,00			1972,33	2024,36	2018,31	1994		1924,50	1984,59
12-13	2011,72	2041,00	1940,94				2012,25	2023,12	1979		1970,50	2020,32
13-14	2027,76	2037,33	2041,94			2050	2030,59	2035,77			1994,90	1977,06
14-15	2050	2032,25	2047,75			2050	1951,67	2030,49			1999	2020,50
15-16	2001,92	2004,43					2010,71	1996,90	1911,50		1996,38	1994
16-17	2050	2050	2050				2050	2013,06			1979,50	
17-18	2050						2050	2050				
18-19							2050	2050				
19-20							2050	2050				
20-21								2050				

5.3. Dağılımlara Göre Rüzgar Türbini Ortalama Gücü ve Güç Yoğunluğu

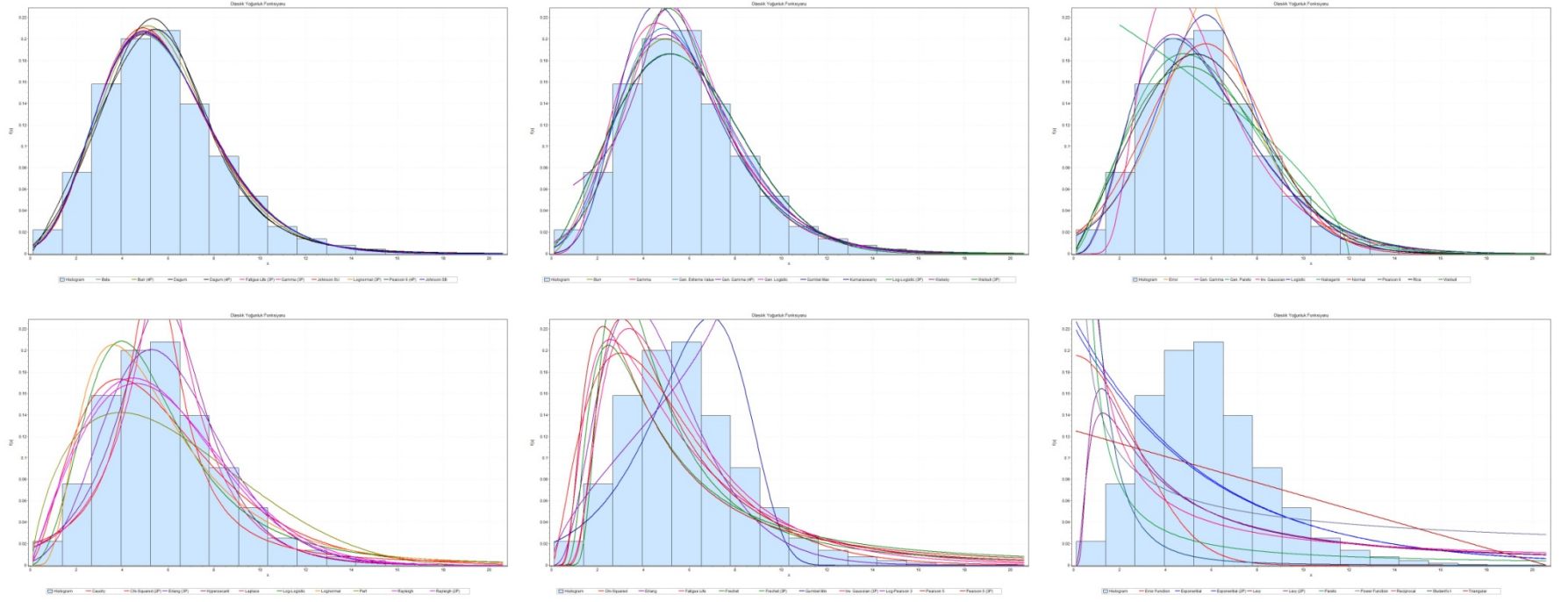
Analizi

Bu çalışmanın üçüncü ve dördüncü bölümlerinde yapılan uygulama sonuçları bütün bölgelerin rüzgar şiddeti dağılımını temsil edebilecek en uygun tek bir dağılımın olmadığını göstermiştir. Ayrıca dağılım parametre belirleme yöntemlerinin dağılımın başarısı üzerinde önemli etkisi olduğunu göstermektedir. Bu nedenle çalışmanın gerçek bir santral uygulamasında literatürde bulunan geniş bir dağılım ailesi kullanılmıştır.

Çalışmanın bu kısmında seçilmiş olan T11 rüzgar türbininin enerji üretim tahminleri Weibull dağılımı ile yapıp, dağılım parametreleri MLH yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca, 60 standart dağılımdan seçilenler için türbin ortalama güç çıktısı ve standart güç yoğunluğu hata analizi yapılmıştır. Weibull dağılımı ve kullanılan 60 standart dağılımın görsel uyumu Şekil 5.17’de sunulmaktadır.

Çalışma kapsamında kullanılan standart dağılımların üç farklı hata analizine göre başarı sıralanması ise Çizelge 5.6’da sunulmuştur. Çizelge 5.6’dan da görülebileceği gibi literatürde kullanımı çok az olan Burr (4P) dağılımı rüzgar şiddeti modellemesinde bütün hata testlerinde en iyi sonucu vermiştir. Kolmogorov Smirnov hata testine göre ikinci en iyi dağılım ise Gamma (3P) dağılımıdır, bu dağılımı ise Dagum (4P) dağılımı takip etmektedir. Anderson Darling hata analizinde en iyi ikinci sırada olan Johnson SU dağılımı ise Kolmogorov Smirnov testine göre 10. sırada yer almaktadır. Chi Squared hata testine göre ise dördüncü sırada yer almaktadır. Weibull dağılımı ise Kolmogorov Smirnov testine göre 26. sırada, Anderson Darling testine göre ise 27. sırada ve Chi Squared testine göre ise 25. sıradadır. Daha önce çeşitli bölgelerin rüzgar şiddeti verilerinin analizinde iyi sonuçlar veren Wakeby dağılımı ise Anderson Darling hata testine göre 42. sırada yer almaktadır.

Hava yoğunluğu düzeltilmesinden sonra, rüzgar türbininin teorik zaman serisi ortalama güç çıktısı 521,675 kW olarak hesaplanmıştır. Rüzgar türbininin gerçek düzeltilmiş ortalama güç çıktısı (standart hava yoğunluğunda) 521,502 kW olarak hesaplanmış ve veri setinin üçüncü momenti ise 321,285 W/m² olarak hesaplanmıştır. Yıllık enerji üretimi ise rüzgar türbini ortalama güç çıktısının yıllık toplam saat süresi ile (8760) ile çarpılması sonucu elde edilebilir.



Şekil 5.17 : Veri seti analizinde standart dağılımlar.

Çizelge 5.6 : Veri seti hata analizi sonuçları.

Dağılımlar	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-Squared	
	Hata Analizi Sonucu	Sıralama	Hata Analizi Sonucu	Sıralama	Hata Analizi Sonucu	Sıralama
Burr (4P)	0,01385	1	7,8368	1	375,96	1
Gamma (3P)	0,01742	2	19,096	9	1066,3	16
Dagum (4P)	0,01743	3	15,609	7	401,89	2
Pearson 6 (4P)	0,01756	4	17,216	8	818,74	13
Fatigue Life (3P)	0,01761	5	14,928	6	747,15	10
Lognormal (3P)	0,01773	6	12,577	3	747,15	11
Johnson SB	0,01794	7	14,411	5	747,17	12
Dagum	0,01854	8	29,595	13	610,93	8
Beta	0,01873	9	22,254	11	1050,7	15
Johnson SU	0,01971	10	11,292	2	539,67	4
Gen. Gamma (4P)	0,01994	11	21,828	10	555,51	7
Gen. Extreme Value	0,02013	12	13,795	4	548	5
Wakeby	0,02074	13	2818,6	42	N/A	
Log-Logistic (3P)	0,0217	14	23,657	12	715,85	9
Burr	0,02366	15	45,788	15	552,73	6
Gen. Logistic	0,02491	16	30,821	14	532,04	3
Weibull (3P)	0,03421	17	126,55	17	1115,8	17
Gamma	0,03551	18	100,89	16	1048,1	14
Kumaraswamy	0,0362	19	130,61	19	1613,9	22
Gumbel Max	0,03964	20	130,16	18	1210,5	18
Nakagami	0,0441	21	166,24	20	1461,8	19
Rice	0,04862	22	214	22	1691,6	23
Pearson 6	0,05144	23	217,57	23	1543,1	21
Gen. Gamma	0,0529	24	205,71	21	1506,1	20
Logistic	0,05498	25	252,23	24	2405,3	26
Weibull	0,05502	26	312,23	27	2366,1	25
Gen. Pareto	0,0567	27	8773	54	N/A	
Normal	0,05696	28	268,45	25	2560,2	28
Inv Gaussian	0,05709	29	777,82	34	3036,2	29
Error	0,05849	30	277,78	26	2527,4	27
Erlang (3P)	0,06403	31	386,53	29	1807,3	24
Hypersecant	0,06636	32	334,72	28	3147,2	30
Rayleigh	0,0686	33	513,93	30	3305,7	32
Rayleigh (2P)	0,07997	34	563,12	31	3230,2	31
Log-Logistic	0,08609	35	792,43	35	5143,6	34
Lognormal	0,09009	36	904,71	36	5636,3	36
Chi-Squared (2P)	0,09173	37	941,73	37	5272,8	35
Cauchy	0,09181	38	727,12	33	9980,8	40
Laplace	0,09332	39	605,21	32	4618,8	33
Pert	0,10822	40	1551,6	38	9726	38
Inv. Gaussian (3P)	0,11659	41	1760,7	39	6298,4	37
Gumbel Min	0,12609	42	2670,1	41	N/A	
Log-Pearson 3	0,12635	43	23685	59	N/A	
Pearson 5 (3P)	0,13309	44	2636,3	40	13305	42
Frechet	0,16802	45	3896,7	45	N/A	
Fatigue Life	0,18463	46	3157,3	43	15268	43
Frechet (3P)	0,19221	47	4606,9	47	N/A	
Chi-Squared	0,19676	48	3804,1	44	10791	41
Pearson 5	0,19904	49	4691,1	48	29398	44
Erlang	0,20063	50	4588,4	46	9758,4	39
Triangular	0,21489	51	4773,9	49	30733	45
Exponential (2P)	0,27481	52	6765,3	50	37210	46
Exponential	0,27987	53	6962,9	51	38214	47
Power Function	0,29581	54	8509,9	53	72194	49
Pareto 2	0,31081	55	8380,4	52	38825	48
Levy	0,3961	56	10588	55	85775	51
Levy (2P)	0,42342	57	11857	56	85244	50
Pareto	0,48986	58	17953	57	2,67E+05	53
Reciprocal	0,52368	59	21806	58	1,12E+05	52
Error Function	0,75162	60	1,13E+05	60	5,87E+05	54
Student's t	0,86418	61	1,29E+05	61	9,52E+05	55

Çizelge 5.6'dan da görülebileceği gibi dağılımların hata analizleri sonucu başarı sıralaması, literatür özetinde de gösterildiği gibi, testlere göre değişebilmektedir.

Diğer bir ifade ile bütün hata testlerinde dağılımların başarı sıralaması aynı olmayabilmektedir. Bu nedenle karışım dağılımlarında hata testi uygulanmayacaktır.

Standart dağılımlar kullanılması sonucu yapılan analize ek olarak 109 adet karışım dağılımının ve üç farklı MEP dağılımının kullanılarak rüzgar türbini ortalama güç çıktısı ve rüzgar enerjisi güç yoğunlukları hesaplanmış. Ardından ise teorik zaman serisi ortalama güç çıktısı ve gerçek (ölçülen) ortalama güç çıktısı verileri ile güç yoğunluğuna bağlı hata analizleri yapılmıştır. Literatürde ilk defa 96 karışım dağılımı bu tez kapsamında rüzgar enerjisi modellemesinde kullanılmıştır. Çizelge 5.7'de bu tez çalışmasında kullanılan karışım dağılımlar ve MEP dağılımlarının kısaltmaları sunulmuş. Bu çalışma kapsamında, Gamma, Weibull, LogNormal, Extreme Value, Exponential, Logistic, Normal, Inverse Gauss, Rayleigh, Gumbel, Tek Taraftan Kesilmiş Normal, Inverse Weibull, Burr, Kesilmiş (Truncated) Weibull dağılımlarının birbirleri ile olan karışımları yapılmıştır. Bununla birlikte bazı durumlarda kullanılan algoritma yakınsamamış ya da ağırlık parametresi sıfır ya da bir değerini vermiştir. Ağırlık parametresinin sıfır ya da bire eşit olması kullanılan dağılımlar için karışım dağılımının oluşmadığı anlamına gelmektedir. Literatürde de rüzgar enerjisi potansiyel analizinde ağırlık parametresinin sıfır diğer bir ifade ile bire eşit olduğu çalışmalar mevcuttur. Morgan, 178 istasyonda ölçülen rüzgar şiddeti verilerini kullanarak bu istasyonlara uygun dağılımını incelemiştir [249]. Çalışmada MWblWbl dağılımının parametrelerini hesapladığı 178 istasyonun 68 tanesinde ağırlık parametresini bir olarak bulmuştur yani karışım dağılımı oluşmamıştır [249]. Bunlara ek olarak bazı karışım dağılımların Likelihood fonksiyonu maksimize edilerek parametreleri belirlenmesine rağmen karışım dağılımının güç yoğunluğu ile ilgili üçüncü momenti olmayabilmektedir. Örneğin, Inverse Weibull dağılımında şekil parametresinin üç'den küçük olması durumunda üçüncü momenti olmamaktadır.

Çizelge 5.8'de ise bu çalışma sırasında kullanılan normal dağılımlara göre teorik zaman serisi ve rüzgar türbininin ortalama gücüne göre mutlak yüzde farkları sunmaktadır. Ortalama güç analizi sırasında Cauchy dağılımı gibi momentleri olmayan ya da bazı momentleri belirlenemeyen dağılımlar ortalama güç analizi ve güç yoğunluğu analizi sırasında dikkate alınmamıştır. Şekil 5.18 ile karışım dağılımlarının grafiklerinden örnekler sunulmaktadır.

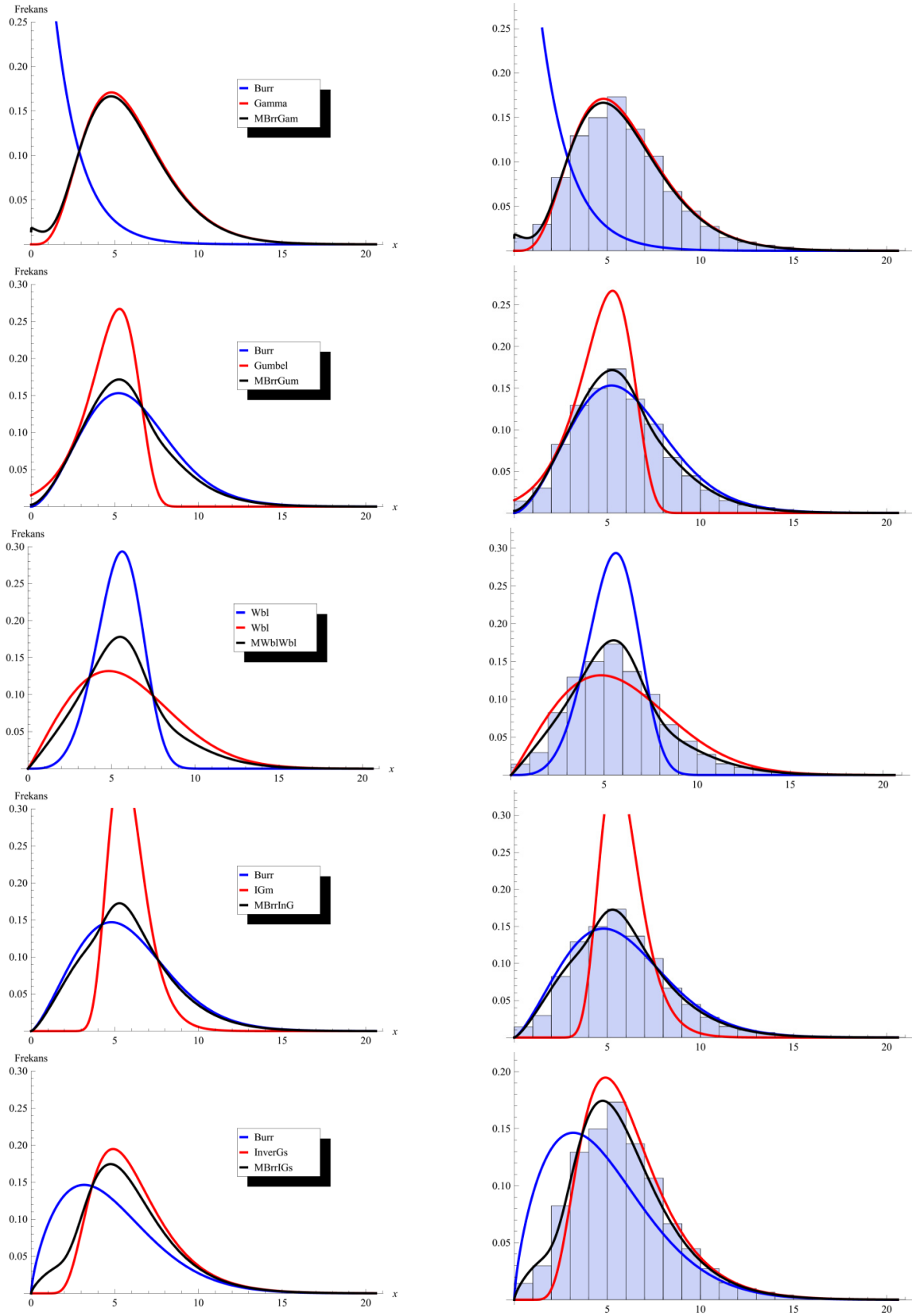
Çizelge 5.7 : Kullanılan karışım ve MEP dağılımları.

Sıra	Dağılım	Kısaltma
1	Mixture Burr 3P Dağ. Burr 3P Dağ.	MBrrBrr
2	Mixture Burr 3P Dağ. Exponential Dağ.	MExpBrr
3	Mixture Burr 3P Dağ. Gamma Dağ.	MGamBrr
4	Mixture Burr 3P Dağ. Gumbel Dağ.	MGumBrr
5	Mixture Burr 3P Dağ. HalfNormal Dağ.	MHNrBrr
6	Mixture Burr 3P Dağ. Inverse Gamma Dağ.	MIgmBrr
7	Mixture Burr 3P Dağ. Inverse Gaussian Dağ.	MIGsBrr
8	Mixture Burr 3P Dağ. LogNormal Dağ.	MLgnBrr
9	Mixture Burr 3P Dağ. Normal Dağ.	MNrmBrr
10	Mixture Burr 3P Dağ. Rayleigh Dağ.	MRylBrr
11	Mixture Burr 3P Dağ. Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağ.	MTndBrr
12	Mixture Burr 3P Dağ. Truncated Weibull Dağ.	MTrWBrr
13	Mixture Burr 3P Dağ. Weibull Dağ.	MWblBrr
14	Mixture Exponential Dağ. ExtremeValue Dağ.	MExpExV
15	Mixture Exponential Dağ. Gamma Dağ.	MExpGam
16	Mixture Inverse Gamma Dağ. Exponential Dağ.	MExplGm
17	Mixture Exponential Dağ. LogNormal Dağ.	MExpLgn
18	Mixture Exponential Dağ. Logistic Dağ.	MExpLgs
19	Mixture Exponential Dağ. Weibull Dağ.	MExpWbl
20	Mixture ExtremeValue Dağ. ExtremeValue Dağ.	MExVExV
21	Mixture ExtremeValue Dağ. Gumbel Dağ.	MExVGum
22	Mixture ExtremeValue Dağ. Normal Dağ.	MExVNrm
23	Mixture ExtremeValue Dağ. Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağ.	MExVTnd
24	Mixture Gamma Dağ. ExtremeValue Dağ.	MGamExV
25	Mixture Gamma Dağ. Gamma Dağ.	MGamGam
26	Mixture Gamma Dağ. Gumbel Dağ.	MGamGum
27	Mixture Gamma Dağ. HalfNormal Dağ.	MGamHNR
28	Mixture Gamma Dağ. Inverse Gauss Dağ.	MGamIGs
29	Mixture Gamma Dağ. Lognormal Dağ.	MGamLgn
30	Mixture Gamma Dağ. Logistic Dağ.	MGamLgs
31	Mixture Gamma Dağ. Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağ.	MGamTnd
32	Mixture Gamma Dağ. Weibull Dağ.	MGamWbl
33	Mixture HalfNormal Dağ. ExtremeValue Dağ.	MHNrExV
34	Mixture HalfNormal Dağ. Inverse Gamma Dağ.	MHNrIGm
35	Mixture HalfNormal Dağ. Gumbel Dağ.	MHNrGum
36	Mixture HalfNormal Dağ. Inverse Gauss Dağ.	MHNrIGs
37	Mixture HalfNormal Dağ. LogNormal Dağ.	MHNrLgn
38	Mixture HalfNormal Dağ. Logistic Dağ.	MHNrLgs
39	Mixture HalfNormal Dağ. Normal Dağ.	MHNrNrm
40	Mixture HalfNormal Dağ. Rayleigh Dağ.	MHNrRyl
41	Mixture Inverse Gamma Dağ. ExtremeValue Dağ.	MIgmExV
42	Mixture Inverse Gamma Dağ. Gamma Dağ.	MIgmGam
43	Mixture Inverse Gamma Dağ. Gumbel Dağ.	MIgmGum
44	Mixture Inverse Gamma Dağ. LogNormal Dağ.	MIgmLgn
45	Mixture Inverse Gamma Dağ. Normal Dağ.	MIgmNrm
46	Mixture Inverse Gamma Dağ. Rayleigh Dağ.	MIgmRyl
47	Mixture Inverse Gamma Dağ. Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağ.	MIgmTnd
48	Mixture Inverse Gamma Dağ. Weibull Dağ.	MIgmWbl
49	Mixture Inverse Gaussian Dağ. Exponential Dağ.	MIGsExp
50	Mixture Inverse Gaussian Dağ. Gumbel Dağ.	MIGsGum
51	Mixture Inverse Gaussian Dağ. Inverse Gamma Dağ.	MIGsIGm
52	Mixture Inverse Gaussian Dağ. Lognormal Dağ.	MIGsLgn
53	Mixture Inverse Gaussian Dağ. Rayleigh Dağ.	MIGsRyl
54	Mixture Inverse Gaussian Dağ. Weibull Dağ.	MIGsWbl
55	Mixture Inverse Weibull Dağ. ExtremeValue Dağ.	MInWExV
56	Mixture Inverse Weibull Dağ. Gamma Dağ.	MInWGam
57	Mixture Inverse Weibull Dağ. Normal Dağ.	MInWNrm
58	Mixture Inverse Weibull Dağ. Rayleigh Dağ.	MInWRyl
59	Mixture Inverse Weibull Dağ. Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağ.	MInWTnd
60	Mixture LogNormal Dağ. ExtremeValue Dağ.	MLgnExV
61	Mixture LogNormal Dağ. Gumbel Dağ.	MLgnGum
62	Mixture LogNormal Dağ. LogNormal Dağ.	MLgnLgn
63	Mixture LogNormal Dağ. Logistic Dağ.	MLgnLgs
64	Mixture LogNormal Dağ. Normal Dağ.	MLgnNrm
65	Mixture LogNormal Dağ. Rayleigh Dağ.	MLgnRyl
66	Mixture LogNormal Dağ. Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağ.	MLgnTnd
67	Mixture LogNormal Dağ. Weibull Dağ.	MLgnWbl
68	Mixture Logistic Dağ. ExtremeValue Dağ.	MLgsExV
69	Mixture Logistic Dağ. Inverse Gamma Dağ.	MLgsIGm
70	Mixture Logistic Dağ. Inverse Gaussian Dağ.	MLgsIGs
71	Mixture Logistic Dağ. Logistic Dağ.	MLgsLgs
72	Mixture Logistic Dağ. Normal Dağ.	MNrmLgs

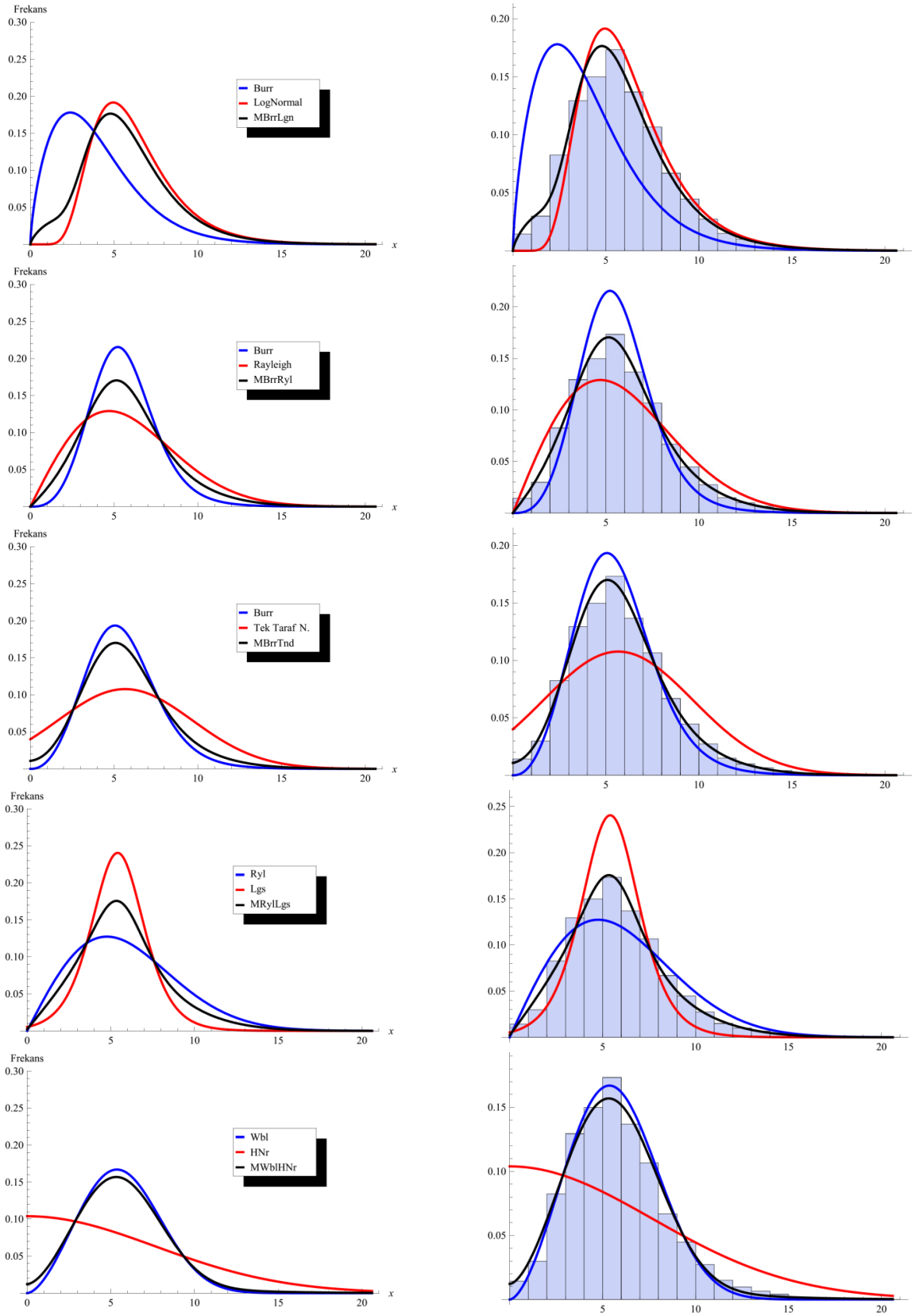
Çizelge 5.7 (devam) : Kullanılan karışım ve MEP dağılımları.

73	Mixture Logistic Dağ. Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağ.	MLgsTnd
74	Mixture Nakagami Dağ. Nakagami Dağ.	MNakNak
75	Mixture Normal Dağ. Gamma Dağ.	MNrmGam
76	Mixture Normal Dağ. Inverse Gaussian Dağ.	MNrmIGs
77	Mixture Normal Dağ. Normal Dağ.	MNrmNrm
78	Mixture Rayleigh Dağ. Weibull Dağ.	MRylWbl
79	Mixture Rayleigh Dağ. Exponential Dağ.	MRylExp
80	Mixture Rayleigh Dağ. ExtremeValue Dağ.	MRylExV
81	Mixture Rayleigh Dağ. Gamma Dağ.	MRylGam
82	Mixture Rayleigh Dağ. Gumbel Dağ.	MRylGum
83	Mixture Rayleigh Dağ. Logistic Dağ.	MRylLgs
84	Mixture Rayleigh Dağ. Normal Dağ.	MRylNrm
85	Mixture Rayleigh Dağ. Rayleigh Dağ.	MRylRyl
86	Mixture (LES)Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağ. Tek Trftn Kes. Normal Dağ.	MTndTnd
87	Mixture (MLH)Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağ. Tek Trftn Kes. Normal Dağ.	MTndTnd
88	Mixture Truncated Weibull Dağ. ExtremeValue Dağ.	MExVTrW
89	Mixture Truncated Weibull Dağ. Gamma Dağ.	MTrWGam
90	Mixture Truncated Weibull Dağ. Gumbel Dağ.	MGumTrW
91	Mixture Truncated Weibull Dağ. Inverse Gamma Dağ.	MIGmTrW
92	Mixture Truncated Weibull Dağ. Inverse Gaussian Dağ.	MIGsTrW
93	Mixture Truncated Weibull Dağ. Inverse Weibull Dağ.	MInWTrW
94	Mixture Truncated Weibull Dağ. Lognormal Dağ.	MLgnTrW
95	Mixture Truncated Weibull Dağ. Logistic Dağ.	MLgsTrW
96	Mixture Truncated Weibull Dağ. Normal Dağ.	MNrmTrW
97	Mixture Truncated Weibull Dağ. Rayleigh Dağ.	MRylTrW
98	Mixture Truncated Weibull Dağ. Truncated Weibull Dağ.	MTrWTrW
99	Mixture Truncated Weibull Dağ. Weibull Dağ.	MWblTrW
100	Mixture Weibull Dağ. ExtremeValue Dağ.	MWblExV
101	Mixture Weibull Dağ. Gumbel Dağ.	MWblGum
102	Mixture Weibull Dağ. HalfNormal Dağ.	MWblHNr
103	Mixture Weibull Dağ. Inverse Weibull Dağ.	MWblInW
104	Mixture Weibull Dağ. Logistic Dağ.	MWblLgs
105	Mixture Weibull Dağ. Normal Dağ.	MWblNrm
106	Mixture Weibull Dağ. Tek Taraftan Kesilmiş Normal Dağ.	MWblTnd
107	Mixture (LES)Weibul Dağ. Weibull Dağ.	MWblWbl
108	Mixture (Mom)Weibul Dağ. Weibull Dağ.	MWblWbl
109	Mixture Weibull Dağ. Weibull Dağ.	MWblWbl
110	MEP3	MEP3
111	MEP4	MEP4
112	MEP5	MEP5

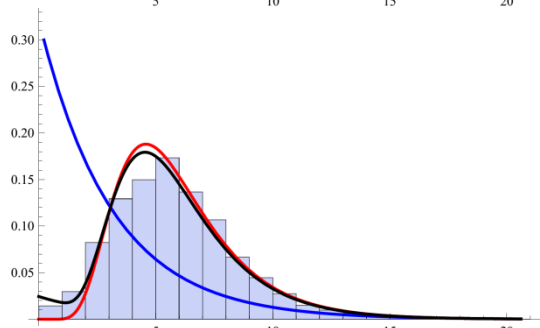
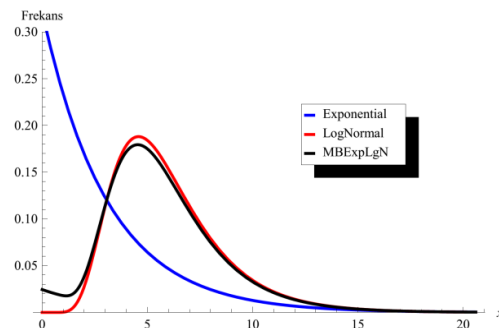
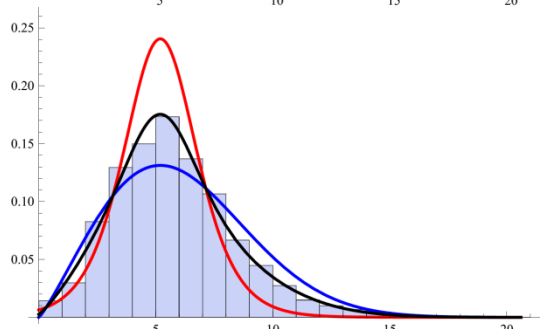
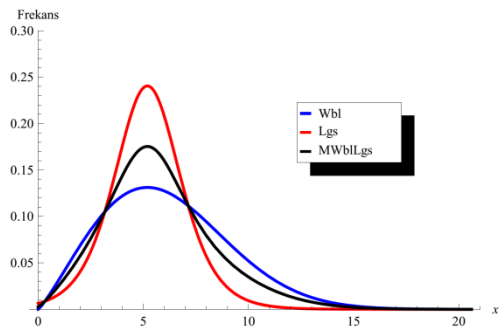
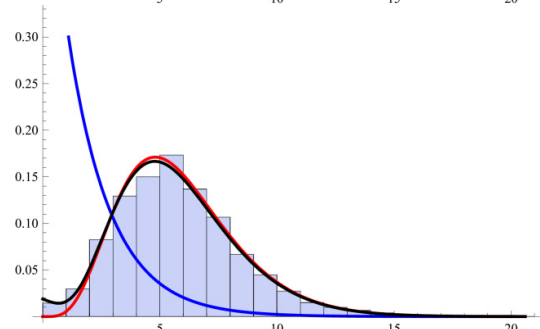
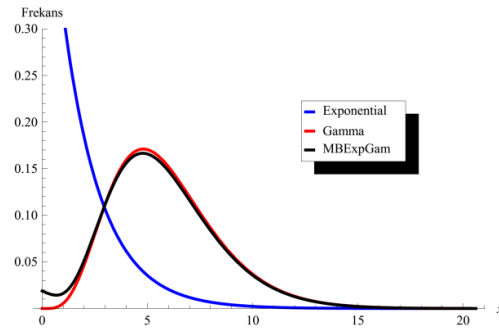
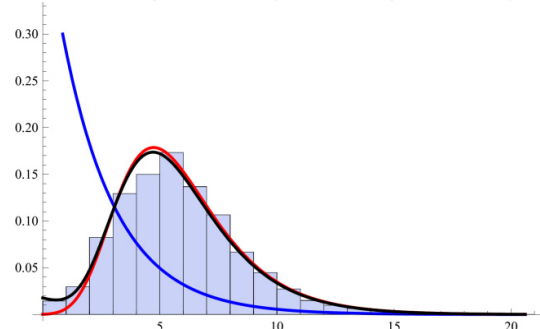
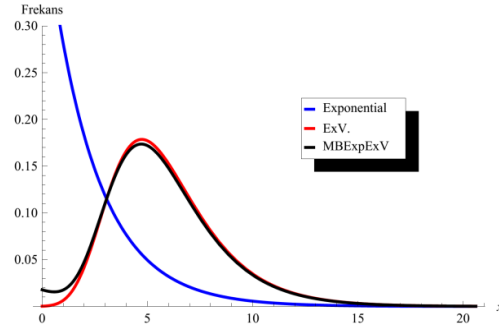
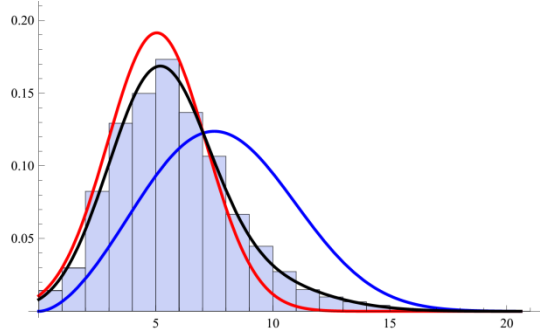
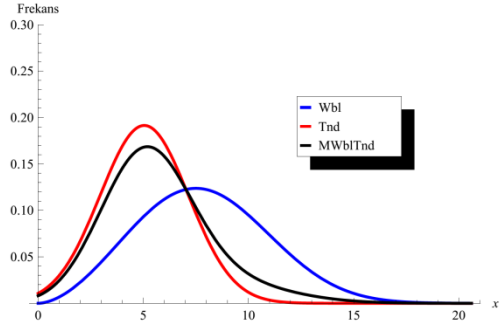
Şekil 5.18 ile karışım dağılımlarının grafiklerinden örnekler sunulmaktadır. Örnekleri verilen dağılımların olasılık yoğunluk fonksiyonlarının toplanması sonucu oluşan karışım dağılımları bazı durumlarda birbirlerine çok benzemektedirler. Karışım dağılımlarını olasılık yoğunluk fonksiyonlarının birbirlerine benzemelerinden dolayı bu dağılımların kullanılması sonucu hesaplanan rüzgar türbini ortalama güç çıktısı da birbirine yakın olmaktadır. Bazı karışım dağılımlarında ise ağırlık katsayı değeri 0,99 değerine diğer ya da 0,01 değerine çok yaklaşmaktadır. Bu durumda karışım dağılımında kullanılan ikinci dağılımın karışım dağılımı frekans dağılımı şekli üzerinde önemli etkisi olmamaktadır. Bazı durumlarda ise karışım dağılımını oluşturan dağılımlardan bir tanesi çok dar olmaktadır.



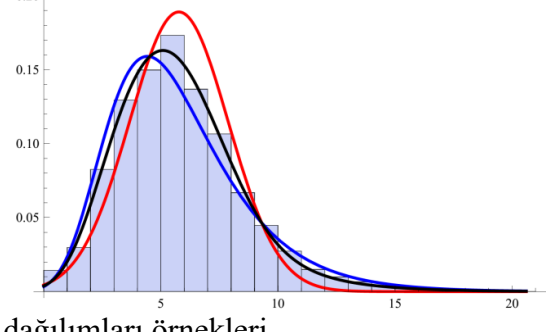
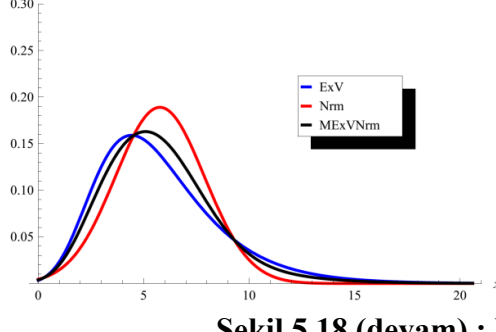
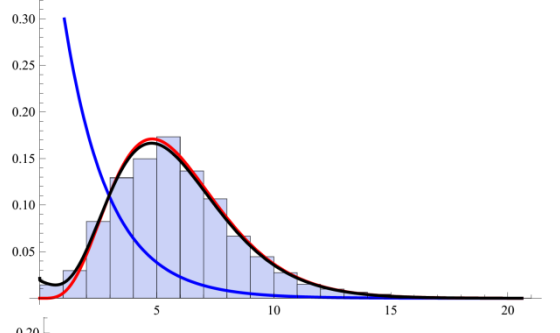
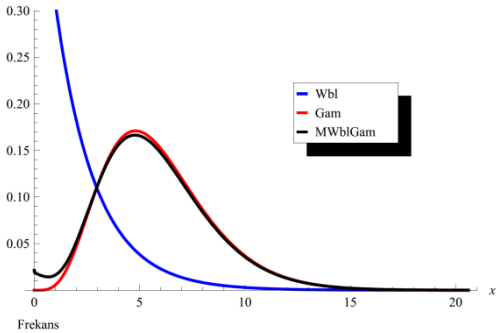
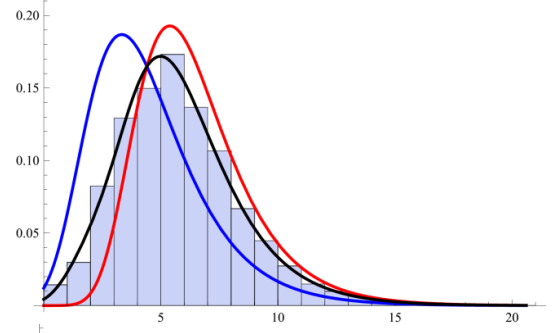
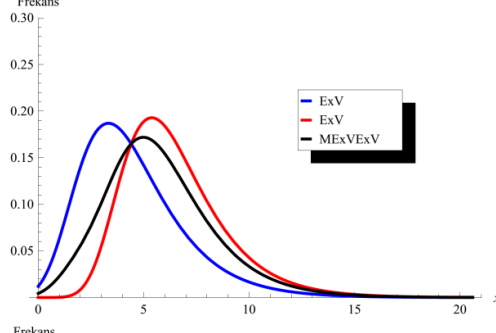
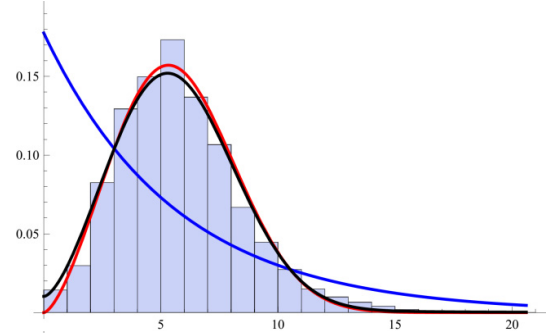
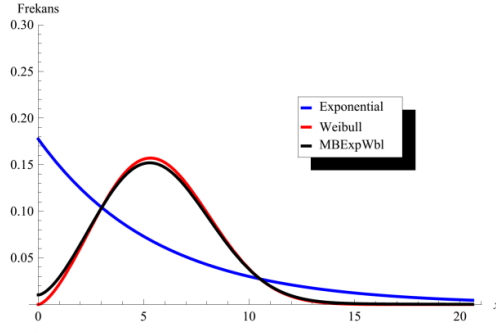
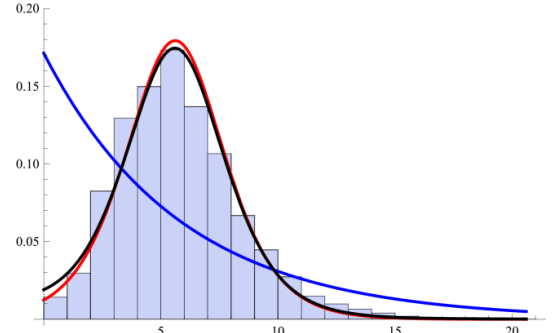
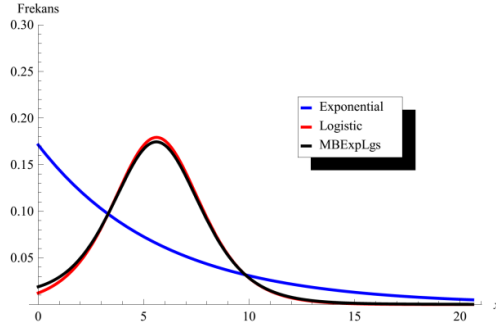
Şekil 5.18 : Karışım dağılımları örnekleri.



Şekil 5.18 (devam) : Karışım dağılımları örnekleri.



Şekil 5.18 (devam) : Karışım dağılımları örnekleri.



Şekil 5.18 (devam) : Karışım dağılımları örnekleri.

Çizelge 5.8 : Standart dağılımlar kullanılması sonucu ortalama güç hata analizi.

Dağılım	Hesaplanan Ortalama Güç (kW)	Mutlak Zaman Serisi Ortalama Güç Farkı (%)	Mutlak Gerçek Üretim Ortalama Güç Farkı (%)
Beta Dağılımı	532,172	2,012	2,046
Burr (4P) Dağılımı	521,194	0,092	0,059
Burr Dağılımı	527,813	1,177	1,210
Chi-Squared Dağılımı	427,126	18,124	18,097
Chi-Squared (2P) Dağılımı	574,782	10,180	10,217
Dagum (4P) Dağılımı	516,699	0,954	0,921
Dagum Dağılımı	517,031	0,890	0,857
Erlang (3P) Dağılımı	591,813	13,445	13,482
Erlang Dağılımı	339,572	34,907	34,886
Error Function	24,1428	95,372	95,371
Exponential Dağılımı	540,569	3,622	3,656
Exponential (2P) Dağılımı	539,961	3,505	3,540
Frechet Dağılımı	480,718	7,851	7,820
Gamma (3P) Dağılımı	529,614	1,522	1,556
Gamma Dağılımı	520,039	0,314	0,281
Gen. Gamma (4P) Dağılımı	527,581	1,132	1,166
Gen. Logistic Dağılımı	512,441	1,770	1,737
Gumbel Max Dağılımı	508,811	2,466	2,434
Gumbel Min Dağılımı	551,676	5,751	5,786
Hypersecant Dağılımı	351,731	32,577	32,554
Inv. Gaussian Dağılımı	501,477	3,872	3,840
Inv. Gaussian (3P) Dağılımı	521,490	0,035	0,002
Johnson SB Dağılımı;	527,826	1,179	1,213
Johnson SU Dağılımı	525,194	0,675	0,708
Kumaraswamy Dağılımı	547,622	4,974	5,009
Laplace Dağılımı	514,426	1,390	1,357
Logistic Dağılımı	533,851	2,334	2,368
LogLogistic (3P) Dağılımı	516,200	1,050	1,017
LogNormal Dağılımı	552,998	6,004	6,039
LogNormal (3P) Dağılımı	526,884	0,999	1,032
Nakagami Dağılımı	536,363	2,816	2,850
Normal Dağılım	549,387	5,312	5,347
Pareto 2 Dağılımı	484,948	7,040	7,009
Pearson 6 Dağılımı	485,996	6,839	6,808
Pearson 6 (4P) Dağılımı	528,766	1,359	1,393
Power Function	1093,05	109,527	109,597
Rayleigh Dağılımı	564,696	8,247	8,283
Rayleigh (2P) Dağılımı	532,862	2,144	2,178
Reciprocal Dağılımı	465,698	10,730	10,701
Triangular Dağılımı	821,657	57,504	57,556
Truncated Extreme Value	535,352	2,622	2,656
Truncated Gumbel Dağılımı	579,574	11,099	11,136
Truncated Logistic Dağılımı	516,104	1,068	1,035
Truncated Normal Dağılımı	548,641	5,169	5,204
Truncated Pearson Type III	534,639	2,485	2,519
Weibull	578,604	10,913	10,950
Weibull (3P)	544,659	4,406	4,440

Çizelge 5.9'da ise dağılımlar ile hesaplanan standart güç yoğunluğu ile gerçek güç yoğunluğu arasında olan mutlak fark yüzde olarak sunulmaktadır.

Çizelge 5.9 : Standart dağılımlar kullanılması sonucu güç yoğunluğu hata analizi.

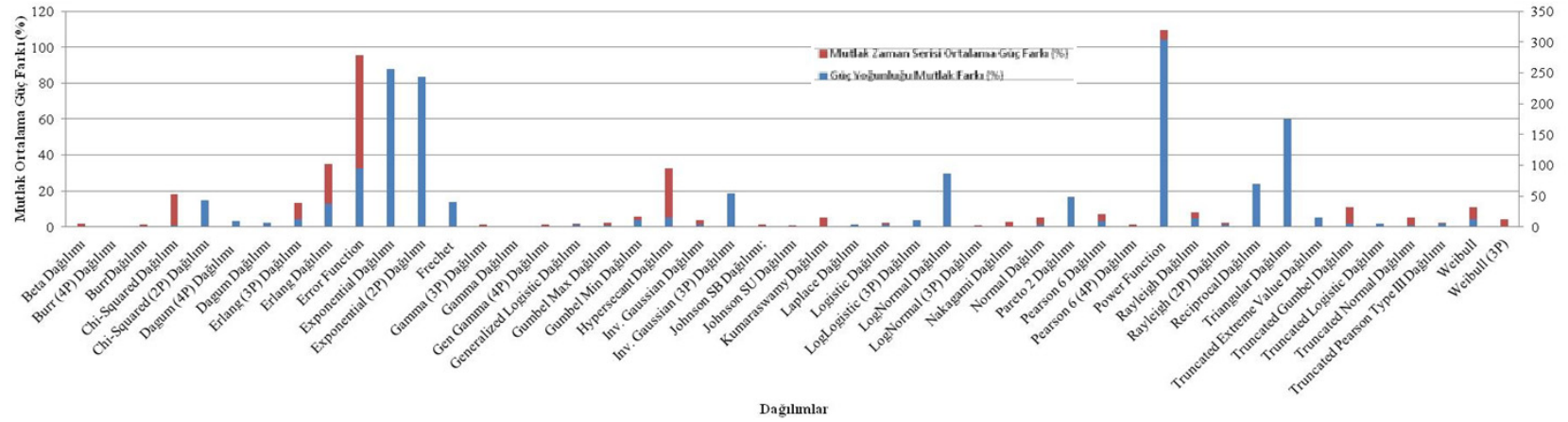
Dağılım	Hesaplanan Güç Yoğunluğu (W/m ²)	Güç Yoğunluğu Mutlak Farkı (%)
Beta Dağılımı	196,642	0,074
Burr (4P) Dağılımı	199,332	1,293
Burr Dağılımı	196,611	0,089
Chi-Squared Dağılımı	192,938	1,956
Chi-Squared (2P) Dağılımı	282,069	43,337
Dagum (4P) Dağılımı	215,959	9,742
Dagum Dağılımı	210,548	6,993
Erlang (3P) Dağılımı	221,425	12,520
Erlang Dağılımı	123,174	37,407
Error Function	8,730	95,564
Exponential Dağılımı	699,775	255,600
Exponential (2P) Dağılımı	675,704	243,368
Frechet Dağılımı	274,679	39,582
Gamma (3P) Dağılımı	194,652	1,085
Gamma Dağılımı	198,803	1,025
Generalized Gamma (4P) Dağılımı	193,997	1,418
Generalized Logistic Dağılımı	205,136	4,243
Gumbel Max Dağılımı	201,329	2,308
Gumbel Min Dağılımı	176,395	10,362
Hypersecant Dağılımı	226,055	14,873
Inv. Gaussian Dağılımı	203,776	3,552
Inv. Gaussian (3P) Dağılımı	304,920	54,949
Johnson SB Dağılımı;	195,613	0,597
Johnson SU Dağılımı	196,772	0,008
Kumaraswamy Dağılımı	195,867	0,468
Laplace Dağılımı	189,380	3,764
Logistic Dağılımı	188,860	4,028
LogLogistic (3P) Dağılımı	218,408	10,987
LogNormal Dağılımı	366,041	86,009
LogNormal (3P) Dağılımı	195,663	0,571
Nakagami Dağılımı	198,192	0,714
Normal Dağılım	188,897	4,009
Pareto 2 Dağılımı	291,465	48,112
Pearson 6 Dağılımı	215,760	9,641
Pearson 6 (4P) Dağılımı	195,033	0,891
Power Function	794,686	303,831
Rayleigh Dağılımı	222,746	13,191
Rayleigh (2P) Dağılımı	205,194	4,272
Reciprocal Dağılımı	334,990	70,230
Triangular Dağılımı	540,660	174,744
Truncated Extreme Value Dağılımı	225,105	14,390
Truncated Gumbel Dağılımı	206,196	4,781
Truncated Logistic Dağılımı	187,088	4,929
Truncated Normal Dağılımı	191,202	2,838
Truncated Pearson Type III Dağılımı	187,258	4,842
Weibull	220,058	11,825
Weibull (3P)	194,738	1,041

Çizelge 5.8 ile Çizelge 5.9 birlikte değerlendirildiğinde, standart dağılımlar kullanılması sonucu oluşan güç yoğunluğu hatalarının % 300'lere kadar çıktığı buna

karşılık bu hataların türbin ortalama güç hatasında ise etkilerinin azaldığı belirlenmiştir. Örneğin, Exponential dağılımının güç yoğunluğu hata oranı % 255'ler seviyesinde iken ortalama güce göre hatası % 3,6 seviyesindedir. Aşağıdaki Şekil 5.19 ile güç yoğunluğu hatalarının ortalama güç çıkısına etkisi gösterilmektedir.

Şekil 5.18'den de görülebileceği gibi güç yoğunluğunda meydana gelen tahmin hataları ortalama güç çıkışında azalma trendi göstermektedir. Bunun ana nedeni rüzgar türbininin eğrisinde türbinin nominal noktasından sonra sabit güç çıktısı vermesine rağmen güç yoğunluğunun rüzgar şiddeti küpü ile artmasıdır.

Çizelge 5.10 ve 5.11'de ise karışım dağılımlarına göre ortalama güç çıkışı ile güç yoğunluğu hatalarını sunmaktadır.



Şekil 5.19 : Standart dağılımların güç yoğunluğu ortalama güç hataları.

Çizelge 5.10 : Karışım dağılımların ortalama güç hata analizi sonuçları.

Dağılım	Hesaplanan Ortalama	Mutlak Zaman Serisi	Mutlak Gerçek Üretim
	Güç (kW)	Ortalama Güç Farkı (%)	Ortalama Güç Farkı (%)
MBrrBrr	522,287	0,11731	0,15055
MExpBrr	521,845	0,03259	0,06579
MGamBrr	525,041	0,64523	0,67864
MGumBrr	523,239	0,29980	0,33310
MHNrBrr	522,087	0,07898	0,11220
MIGmBrr	523,271	0,30594	0,33923
MIGsBrr	520,804	0,16696	0,13383
MLgnBrr	518,872	0,53731	0,50429
MNrmBrr	521,776	0,01936	0,05256
MRylBrr	521,823	0,02837	0,06157
MTndBrr	521,144	0,10179	0,06863
MTrWBrr	523,774	0,40236	0,43568
MWblBrr	522,282	0,11636	0,14959
MExpExV	522,885	0,23195	0,26521
MExpGam	525,066	0,65002	0,68343
MExpIGm	515,626	1,15953	1,12673
MExpLgn	519,112	0,49130	0,45827
MExpLgs	501,183	3,92812	3,89623
MExpWbl	530,451	1,68227	1,71602
MExVExV	521,395	0,05367	0,02050
MExVGum	520,39	0,24632	0,21321
MExVNrm	519,977	0,32549	0,29241
MExVTnd	521,775	0,01917	0,05237
MGamExV	531,572	1,89716	1,93098
MGamGam	525,059	0,64868	0,68209
MGamGum	517,808	0,74127	0,70832
MGamHNr	522,885	0,69449	0,72792
MGamIGs	518,834	0,54459	0,51158
MGamLgn	519,028	0,50740	0,47438
MGamLgs	518,751	0,56050	0,52750
MGamTnd	524,56	0,55303	0,58640
MGamWbl	525,068	0,65040	0,68381
MHNrExV	522,354	0,13016	0,16339
MHNrIGm	513,949	1,48100	1,44830
MHNrGum	488,191	6,41856	6,38749
MHNrIGs	525,802	0,79111	0,82456
MHNrLgn	518,761	0,55859	0,52558
MHNrLgs	498,47	4,44817	4,41646
MHNrNrm	507,313	2,75306	2,72078
MHNrRyl	533,078	2,18584	2,21976
MIGmExV	520,932	0,14243	0,10928
MIGmGam	517,831	0,73686	0,70391
MIGmGum	516,831	1,72617	1,69355
MIGmLgn	516,473	0,99717	0,96431
MIGmNrm	519,878	0,34447	0,31139
MIGmRyl	522,992	0,25246	0,28573
MIGmTnd	523,73	0,39392	0,42725
MIGmWbl	523,441	0,33852	0,37183
MIGsExp	519,112	0,49130	0,45827
MIGsGum	511,703	1,91153	1,87898
MIGsIGm	513,67	1,53448	1,50180
MIGsLgn	517,754	0,75162	0,71867
MIGsRyl	523,564	0,36210	0,39542
MIGsWbl	520,903	0,14798	0,11484
MInWGum	522,833	0,22198	0,25524
MInWNrm	519,958	0,32913	0,29605
MInWRyl	531,004	1,78828	1,82206
MInWTnd	520,974	0,13437	0,10123
MLgnExV	521,606	0,01323	0,01996
MLgnGum	513,694	1,52988	1,49719
MLgnLgn	519,393	0,43744	0,40439
MLgnLgs	516,303	1,02976	0,99691
MLgnNrm	518,404	0,62702	0,59403
MLgnRyl	523,583	0,36574	0,39906
MLgnTnd	522,459	0,15029	0,18353
MLgnWbl	520,215	0,27987	0,24677
MLgsExV	518,992	0,51430	0,48128
MLgsIGm	514,67	1,34279	1,31004
MLgsIGs	515,583	1,16778	1,13497

Çizelge 5.10 (devam) :Karışım dağılımların ortalama güç hata analizi sonuçları.

MLgsLgs	522,264	0,11291	0,14614
MNrmLgs	521,313	0,06939	0,03622
MLgsTnd	528,147	1,24062	1,27422
MNakNak	519,848	0,35022	0,31714
MNrmGam	522,671	0,19092	0,22418
MNrmIGs	517,828	0,73743	0,70448
MNrmNrm	521,317	0,06863	0,03546
MRylWbl	518,511	0,60651	0,57352
MRylExp	533,077	2,18565	2,21957
MRylExV	523,206	0,29348	0,32677
MRylGam	524,307	0,50453	0,53789
MRylGum	519,306	0,45411	0,42107
MRylLgs	517,932	0,71750	0,68454
MRylNrm	516,725	0,94887	0,91599
MRylRyl	532,872	2,14636	2,18026
MTndTnd(LES)	512,376	1,78253	1,74993
MTndTnd(MLH)	521,336	0,06498	0,03181
MExVWbl	520,242	0,27469	0,24159
MTrWGum	524,999	0,63718	0,67058
MGumTrW	529,43	1,48656	1,52024
MIGmTrW	523,492	0,34830	0,38161
MIGsTrW	542,843	4,05770	4,09224
MInWTrW	527,065	1,03321	1,06675
MLgnTrW	520,324	0,25897	0,22587
MLgsTrW	541,47	3,79451	3,82896
MNrmTrW	523,187	0,28984	0,32312
MRylTrW	518,511	0,60651	0,57352
MTrWTrW	517,589	0,78325	0,75031
MWblTrW	517,589	0,78325	0,75031
MWblExV	520,242	0,27469	0,24159
MWblGum	529,417	1,48407	1,51775
MWblHNr	520,978	0,13361	0,10046
MWblInW	523,798	0,40696	0,44029
MWblLgs	523,599	0,36881	0,40213
MWblNrm	523,187	0,28984	0,32312
MWblTnd	521,361	0,06019	0,02702
MWblWbl(LES)	530,173	1,62898	1,66272
MWblWbl(MOM)	519,528	0,41156	0,37850
MWblWbl(MLH)	517,39	0,82139	0,78847
MEP3	502,129	3,74678	3,71483
MEP4	524,307	0,50453	0,53789
MEP5	521,259	0,07974	0,04658

Karışım dağılımların ortalama türbin gücü tahmin hataları incelendiği zaman tahmin hatalarında ciddi derecede iyileşmeler elde edildiği belirlenmiştir. Örneğin normal dağılım kullanılması sonucu % 5,31 olan mutlak güç tahmin hatası Mixture Normal Normal dağılımda % 0,07 seviyesine inmektedir. Benzer şekilde MLH yöntemi ile parametreleri belirlenen Weibull dağılımı kullanılması sonucu oluşan ortalama güç tahmin hatası % 10,95 iken Weibull&Weibull karışım dağılımında bu oran % 0,4 olmuştur. Bunun ana nedeni parametre belirlemesi sırasında kullanılan likelihood değerinin en kötü durumda normal dağılımı ya da Weibull dağılımını vermesidir. Diğer durumlarda ise bir karışım dağılım ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 5.11 : Karışım dağılımların güç yoğunluğu analizi sonuçları.

Dağılım	Hesaplanan Güç Yoğunluğu (W/m ²)	Güç Yoğunluğu Mutlak Farkı (%)
MBrrBrr	198,29565	0,76661
MExpBrr	198,571275	0,90667
MGamBrr	197,3377	0,27981
MGumBrr	197,1006625	0,15936
MHNrBrr	198,4150875	0,82730
MIGmBrr	196,954275	0,08497
MIGsBrr	201,295675	2,29111
MLgnBrr	205,6707625	4,51437
MNrmBrr	196,7821625	0,00249
MRylBrr	196,9438625	0,07968
MTndBrr	197,1937625	0,20667
MTrWBrr	197,5582	0,39186
MWblBrr	198,2981	0,76785
MExpExV	208,9549875	6,18330
MExpGam	197,2697125	0,24527
MExpLgm	260,1452875	32,19634
MExpLgn	217,0044625	10,27374
MExpLgs	197,6960125	0,46190
MExpWbl	210,6209875	7,02990
MExVExV	201,768525	2,53140
MExVGum	212,641625	8,05671
MExVNrm	204,60685	3,97373
MExVTnd	203,6489	3,48694
MGamExV	201,16215	2,22326
MGamGam	197,289925	0,25554
MGamGum	200,5490375	1,91170
MGamHNr	196,5053125	0,14318
MGamIGs	207,0488875	5,21468
MGamLgn	211,04055	7,24310
MGamLgs	198,5088	0,87492
MGamTnd	196,995925	0,10614
MGamWbl	197,26665	0,24371
MHNrExV	207,011525	5,19570
MHNrLgm	234,3137125	19,06967
MHNrGum	218,3948375	10,98028
MHNrIGs	211,5973125	7,52603
MHNrLgn	211,1256875	7,28637
MHNrLgs	195,2937875	0,75883
MHNrNrm	203,3726625	3,34656
MHNrRyl	205,8790125	4,62020
MIGmExV	203,8136625	3,57066
MIGmGam	214,917675	9,21332
MIGmGum	268,665775	36,52614
MIGmLgn	303,441075	54,19767
MIGmNrm	228,0772375	15,90052
MIGmRyl	200,8099625	2,04429
MIGmTnd	211,1636625	7,30566
MIGmWbl	200,3659	1,81863
MIGsExp	217,0044625	10,27374
MIGsGum	210,706125	7,07316
MIGsLgm	298,0639375	51,46521
MIGsLgn	249,5429125	26,80860
MIGsRyl	198,0647375	0,64927
MIGsWbl	201,1823625	2,23353
MLgnExV	199,9585875	1,61165
MInWGam	221,9350875	12,77931
MInWNrm	204,240575	3,78760
MInWRyl	205,073575	4,21090
MInWTnd	201,0182125	2,15012
MLgnGum	215,9913875	9,75894
MLgnLgn	250,802825	27,44884
MLgnLgs	201,74035	2,51708
MLgnNrm	205,578275	4,46737
MLgnRyl	198,4836875	0,86216
MLgnTnd	201,4898375	2,38978
MLgnWbl	203,588875	3,45643
MLgsExV	204,7287375	4,03567
MLgsLgm	211,8190375	7,63870
MLgsLgs	199,8765125	1,56995
MLgsLgs	191,902375	2,48222

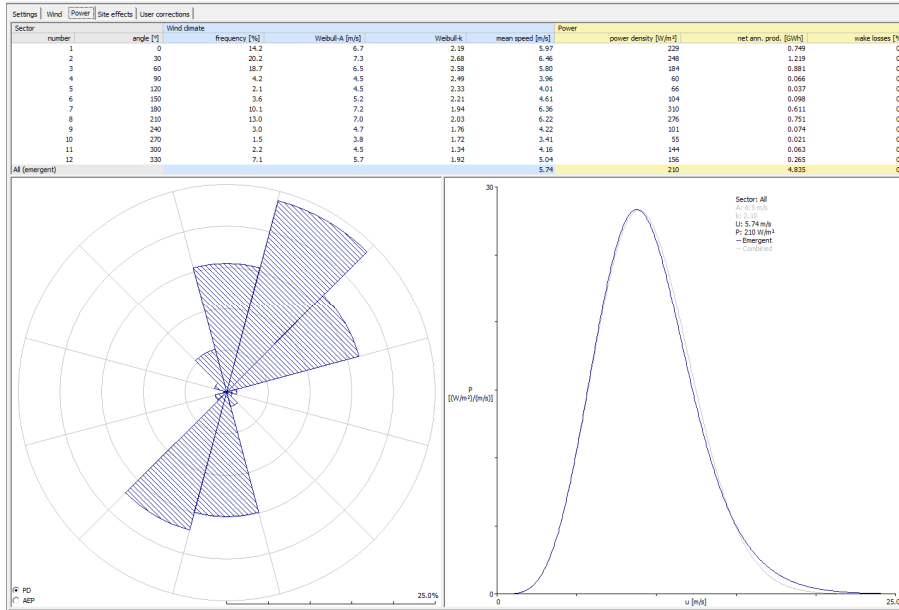
Çizelge 5.11 (devam) : Karışım dağılımların güç yoğunluğu analizi sonuçları.

MNrmLgs	195,415675	0,69689
MLgsTnd	195,1406625	0,83664
MNakNak	198,4628625	0,85158
MNrmGam	196,079625	0,35949
MNrmIGs	203,0315	3,17320
MNrmNrm	196,0245	0,38751
MRylWbl	198,0867875	0,66047
MRylExp	205,8790125	4,62020
MRylExV	198,4432625	0,84162
MRylGam	196,4624375	0,16496
MRylGum	192,9822125	1,93349
MRylLgs	197,863225	0,54687
MRylNrm	198,389975	0,81454
MRylRyl	205,44965	4,40201
MTndTnd(LES)	192,309075	2,27555
MTndTnd(MLH)	196,5298125	0,13073
MExVWbl	207,2406	5,31211
MTrWGum	197,3958875	0,30938
MGumTrW	195,974275	0,41303
MIGmTrW	200,3873375	1,82953
MIGsTrW	212,377025	7,92225
MInWTrW	214,3407	8,92012
MLgnTrW	203,6617625	3,49347
MLgsTrW	195,2435625	0,78435
MNrmTrW	195,996325	0,40182
MRylTrW	198,0867875	0,66047
MTrWTrW	199,50595	1,38164
MWblTrW	199,50595	1,38164
MWblExV	207,2406	5,31211
MWblGum	195,9565125	0,42206
MWblHNr	201,0684375	2,17564
MWblInW	197,4755125	0,34985
MWblLgs	196,339325	0,22752
MWblNrm	195,9785625	0,41085
MWblTnd	196,6743625	0,05727
MWblWbl(LES)	199,89795	1,58084
MWblWbl(MOM)	196,782775	0,00218
MWblWbl(MLH)	198,7703375	1,00783
MEP3	196,7870625	0,00000
MEP4	196,7870625	0,00000
MEP5	196,7870625	0,00000

5.4. WAsP ile Enerji Üretim Hesabı Yapılması

Rüzgar enerjisi potansiyel analizinde en çok kullanılan paket programlardan bir tanesi de WAsP programıdır. Program Danimarka Teknik Üniversitesi Riso laboratuvarlarında geliştirilmiş ve birçok rüzgar enerjisi santrali modellemesinde kullanılmıştır. Literatürde olan çeşitli çalışmalarda WAsP ile yapılan rüzgar çiftliği enerji analizlerinde gerek potansiyel belirlemede gerekse de enerji üretim tahminlerinde hataların olabileceği bazı durumlarda ise bu hataların çok büyük oranlara çıkabileceği örnek çalışmalar ile gösterilmiştir. Enerji üretim tahminlerinde ya da enerji potansiyeli tahminlerinde olan bu hataların temel iki nedeni vardır, bir tanesi kullanıcı kaynaklı modelleme hataları diğeri ise program kaynaklı hatalardır. Bu çalışmada kullanıcı kaynaklı hata oluşturulmaması için tek bir türbinin (T11) enerji üretimi belirlenecektir. Enerji üretimi belirlenirken ölçüm noktası türbinin

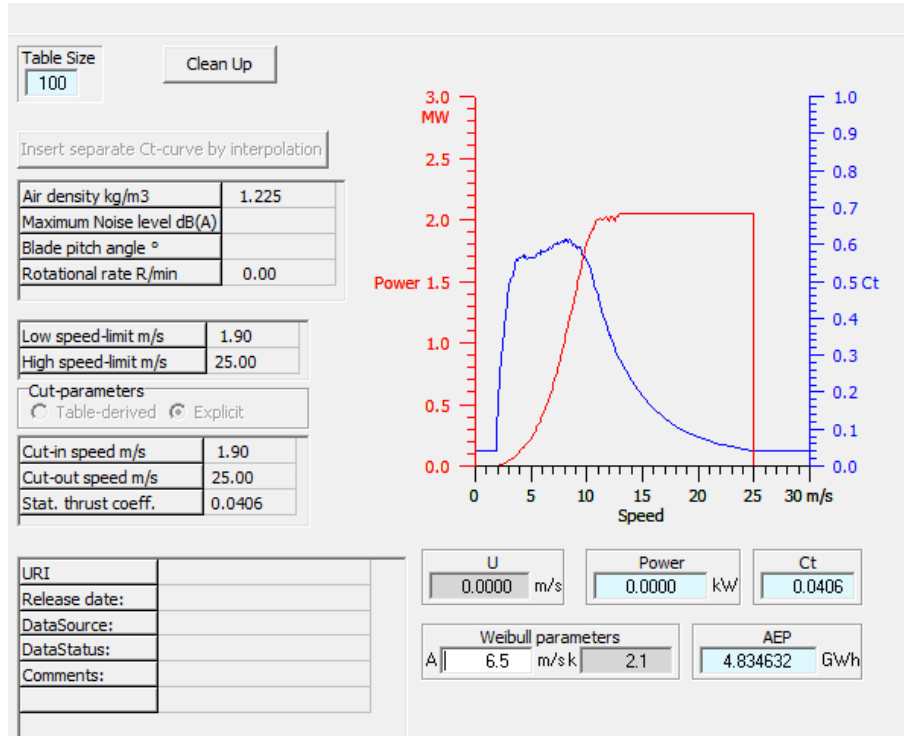
konumlandırıldığı nokta olacak. Buna ek olarak WAsP programında kullanılan rüzgar şiddeti verileri bir önceki bölümde standart dağılımlar ve karışım dağılımları kullanılarak yapılan analizde kullanılan veriler olacaktır. Rüzgar türbini güç eğrisi olarak ise T11 türbinine ait ölçülmüş türbin gücü çıktılarından binleme yöntemi ile elde edilen rüzgar türbini güç eğrisi kullanılacaktır. Böylelikle rüzgar türbininin katalog güç eğrisi değerleri ile oluşabilecek hatalar ortadan kaldırılacaktır. Çalışmanın bu kısmında ise WAsP simülasyon programı ile bölge modellenmiş ve gerçek üretim veri setine göre elde edilen türbin eğrisi ile enerji üretimi simülasyonu tekrar yapılmıştır. Şekil 5.20'de gösterilen WAsP simülasyonu sonuçlarından da görülebileceği gibi, WAsP ile analiz sonuçların ile güç yoğunluğu 210 W/m^2 ve üretim ise 4835 GWh olarak diğer bir ifade ile rüzgar türbininin ortalama güç çıkışı 552,05 kW olmaktadır. Buna karşılık WAsP modellemesi sonucunda % 5,94 rüzgar türbini ortalama güç çıkışı tahmin hatası ve % 6,71 güç yoğunluğu tahmin hatası oluşmaktadır. Şekil 5.20 ile WAsP modellemesi sonucu oluşan enerji üretimi ve yönlere göre dağılım parametreleri ile frekans dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 5.20 : WAsP sonuçları.

Diğer bir rüzgar türbini enerji üretim analizi ise WAsP programının bir parçası olan WAsP Turbine Editor ile yapılacaktır. Bu yazılım Weibull parametreleri ve türbin güç eğrisi ile rüzgar türbini enerji üretimini hesaplamaktadır. Hava yoğunluğu olarak standart hava yoğunluğu alınmış ve standart hava yoğunluğuna göre olan enerji üretimi ile karşılaştırılmıştır. WAsP Turbine Editor ile rüzgar türbini enerji üretimi 4834,6 GWh olarak hesaplanmıştır. WAsP ile belirlenen enerji üretimi ile aynı

değerlere ulaşılmıştır. Ortalama türbin çıktı gücü ise 551,9 kW olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.21 ile WAsP Turbine Editor programı sonuçlarını gösterilmektedir.



Şekil 5.21 : WAsP turbine editor programı sonuçları.

Rüzgar türbininin ölçülen enerji üretimi ile WAsP sonuçlarına göre belirlenen enerji üretim tahmininde fark olmasının iki nedeni vardır. Bunlardan bir tanesi WAsP programının Weibull dağılımına göre enerji üretimi hesaplaması yapmasıdır. İkincisi ise WAsP programının enerji üretim analizi sırasında kullandığı güç eğrisi modelinden kaynaklanmaktadır. WAsP iki nokta arasında lineer bir artış olan türbin modeli eğrisini kullanmaktadır, buna karşılık gerçek türbin eğrisinde bu hatalara neden olmaktadır.

6. SONUÇLAR

Rüzgar türbinlerinin enerji üretiminin ve rüzgar enerjisi potansiyelinin en az hata ile belirlenmesi rüzgar enerjisi yatırımcıları için hayati önemli konulardan bir tanesidir. Rüzgar türbinlerinin enerji üretimine etki eden birçok faktör olmasına rağmen enerji üretimini en çok etkileyen faktörler; rüzgar şiddeti, rüzgar şiddeti dağılımı, güç yoğunluğu, güç yoğunluğu dağılımı, rüzgar türbini güç eğrisi ve hava yoğunluğudur. Rüzgar enerjisi potansiyel belirleme çalışmasında en önemli aşamalardan bir tanesi rüzgar şiddeti verilerinin en uygun dağılım ile modellenmesidir. Rüzgar şiddeti frekans dağılımı bazı bölgelerde birden çok tepeli olabilmesi nedeniyle literatürde sıklıkla kullanılan standart dağılımlara uymayabilmektedir. Bu nedenle rüzgar şiddeti dağılımı çok tepeli olan bölgelerde standart dağılımların rüzgar şiddeti dağılımı modellemesinde yeterince iyi sonuç vermediği literatürde yapılan çalışmalarda ortaya konmuştur.

Rüzgar enerjisi potansiyeli belirleme çalışmalarında Weibull dağılımı birçok rüzgar enerjisi analizi programında gömülü olarak kullanılan bir dağılımdır. Bu çalışmada öncelikle Weibull dağılımı parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler analiz edilmiştir. Ardında ise moment kriterlerine göre yeni parametre belirleme yöntemleri geliştirilmiştir. Geliştirilen parametre belirleme yöntemleri Novel Energy Pattern Factor Metodu (NEPFM) ve Alternatif Moment Metodu (AMM) olarak isimlendirilmiştir. Daha sonra ise önerilen NEPFM ve AMM parametre belirleme yöntemlerinin başarısı gerek üretilen verilerin gerekse de ülkemizde ölçülen rüzgar şiddeti verilerin yardımı ile test edilmiştir. Bu çalışma kapsamında önerilen parametre belirleme yöntemlerin mevcut parametre belirleme yöntemlerine göre alternatif olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. Buna ek olarak önerilen yöntemlerin enerji üretim tahminlerinde ve güç yoğunluğu belirlenmesinde klasik yöntemlere göre olan başarısı ortaya konmuştur.

Bu tez çalışması kapsamında standart dağılımların rüzgar enerjisi modellemesinde olan başarısının incelenmesi için analizler yapılmıştır. Bu kapsamda ülkemizde 13 ölçüm istasyonda ölçülen rüzgar şiddeti veri setlerinin modellenmesinde 60 standart

dağılım kullanılmış. Bu dağılımlar arasında Wakeby, Johnson SB, Dagum, Dagum (4P), Kumaraswamy, Pearson 6, Burr, Erlang ve Nakagami dağılımları gibi son birkaç yıl içinde rüzgar şiddeti frekans dağılımı modellemesinde başarılı oldukları çeşitli çalışmalarda gösterilen dağılımlar da vardır. Yapılan literatür analizine göre bu çalışmada kullanılan Generalized Pareto, Generalized Extreme Value, Generalized Gamma ve Frechet (3P) dağılımları rüzgar enerjisi potansiyel analizinde ilk defa kullanılmıştır. Yapılan çalışmada bütün bölgelerde ölçülen rüzgar şiddeti verilerini modelleyecek en iyi tek bir standart dağılımın olup olmadığı incelenmiştir. Ülkemizde ölçülen rüzgar şiddeti verileri ile yapılan analiz sonuçlarına göre rüzgar şiddeti ölçüm noktası bazında bazı dağılımlar bu çalışma kapsamında kullanılan üç hata testine göre en iyi sonucu verse de bütün hata kriterlerine göre bütün bölgelerde en iyi sonucu veren tek bir standart dağılım olmadığı belirlenmiştir. Hatta, hata analizlerine göre en iyi dağılımın da ölçüm noktası bazında değişebileceği gösterilmiştir. Bununla birlikte kullanılan hata analizi dağılımın başarı sıralamasında önemli etkisi olduğu belirlenmiştir. Literatür özetinde de verilen çalışmalar ile bu çalışma kapsamında bulunan bu sonuç birbirleri ile uyumludur. Buna karşılık rüzgar enerjisi alanında kullanılması daha önce yapılan birkaç çalışma ile sınırlı olan Wakeby (Belen, Biga, Datça, Gökçeada, Karaman, Konya ve Raman) dağılımı yedi bölgede K-S hata analizine göre en iyi sonucu vererek en iyi dağılım olmuştur. Bunu ise Generalized Pareto (Ankara), Log- Pearson 3 (Ayvalık), Nakagami (Gebze), Johnson SB (Kırklareli), Generalized Gamma (4P) (Kocadağ) ve Beta (Sinop) dağılımları takip etmiştir. A-D hata analizine göre ise en iyi dağılım Wakeby dağılımdır ve dört bölgede (Ankara, Datça, Gebze ve Konya) en iyi sonucu vermiştir. Bunu Johnson SB dağılımı (Biga, Kırklareli ve Sinop), Gen. Gamma (4P) (Karaman ve Kocadağ), Gen. Extreme Value (Raman), Kumaraswamy (Gökçeada) ve Log-Pearson 3 (Gökçeada) takip etmiştir. C-S hata analizine göre ise Wakeby (Datça ve Konya), Dagum (4P) (Belen ve Ankara) ve Gen. Extreme Value dağılımları (Raman ve Gebze) bölgelerinde en iyi sonucu vermiştir. Gen. Gamma (4P) (Karaman), Burr (Biga), Johnson SB (Kırklareli), Pert (Gökçeada) ve Weibull (3P) (Kocadağ) dağılımları takip etmiştir.

İstatistik biliminde dağılım teorisi alanında meydana gelen ilerlemeler rüzgar şiddeti verilerinin modellenmesinde kullanılabilecek MEP dağılımları gibi farklı dağılımları da ortaya çıkarmıştır. Son dönemde özellikle karışım dağılımları ile elde edilen farklı

dağılımlar rüzgar şiddeti verilerinin analizinde kullanılmaya başlamıştır. Rüzgar enerjisi modellemesinde tek bir standart dağılımın bütün bölgelerde en iyi sonuçları vermemesi üzerine literatürde daha önce kullanılmış olan farklı parametre belirleme yöntemleri dikkate alınarak parametreleri belirlenen MWblWbl karışım dağılımı ve üç farklı MEP dağılımı modelleri enerji üretim tahmininde olan başarısı Muğla Datça'da ölçülen veri seti üzerinde farklı rüzgar türbinleri dikkate alınarak incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre parametre belirleme yöntemleri dağılımın başarısı üzerinde önemli derecede etkili olduğu gösterilmiştir. Rüzgar türbini enerji üretim tahmininde gerek karışım dağılımlarının gerekse de MEP dağılımlarının yapılan uygulama çalışması sonuçlarına göre Weibull dağılımından daha az hata yaptığı belirlenmiştir. Farklı üreticilerin rüzgar türbinleri kullanılarak yapılan uygulamada mutlak ortalama enerji üretim tahmin hataları Weibull dağılımı için % 9,167, moment yöntemine göre parametreleri belirlenmiş MWblWbl için % 5,01, en yüksek olasılık yöntemine göre parametreleri belirlenmiş MWblWbl için % 0,167, en küçük kareler yöntemine göre belirlenmiş MWblWbl için % 0,357, MEP3 için % 0,428, MEP4 için % 0,210 ve MEP5 için ise % 0,257 olarak hesaplanmıştır. MEP dağılımları ve karışım dağılımlarının esnek yapıları onların birçok şekle girebilmelerine olanak tanımaktadır, böylelikle farklı bölgelerde ölçülmüş değişik histograma sahip rüzgar şiddeti verilerini modellemede standart dağılımlara göre daha başarılı olabilmektedirler. Rüzgar enerjisi potansiyel analizinin ve enerji üretim tahmininin daha iyi yapılabilmesi için rüzgar şiddeti verileri kullanılarak yapılan modelleme çalışmasında gerek ilk defa bu tez çalışmasında önerilen gerekse de literatürde bulunan karışım dağılımlarının büyük ölçüde standart olasılık dağılımlarına göre daha başarılı olduğu belirlenmiştir.

Yapılan teorik analizin devamında ise ülkemizde kurulu olan bir rüzgar enerjisi santralinde alınan rüzgar şiddeti verileri kullanılarak 47 standart dağılım, 109 karışım dağılımı ve üç MEP dağılımı ile belirlenen teorik rüzgar türbini ortalama güç çıktısı ve güç yoğunluğu değerleri ölçülen rüzgar türbininin ortalama güç çıktısı ve güç yoğunluğu ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın bu kısmında kullanılan 13 karışım dağılımı (MGamGam, MGamWbl, MGamExV, MGamNrm, MWblWbl, MWblExV, MWblNrm, MExVExV, MExVNrm, MNrmNrm, MLgNLgN, MTndWbl, MTndTnd dağılımları) hariç geri kalan 96 dağılım ilk defa rüzgar enerjisi potansiyel analizinde kullanılmıştır. Tez çalışmasında kapsamında gerçek bir santralde rüzgar türbinlerine

ait güç eğrileri "IEC WIND TURBINES – Part 12-2: Power performance of electricity producing wind turbines based on nacelle anemometry" standardına göre çıkartılmıştır. Ardından ise enerji üretimi 96'sı ilk defa bu çalışmada kullanılan dağılımlar ile modellenmiştir ve rüzgar türbini ortalama güç çıktısı hesaplanmıştır. Yapılan analizler sonucunda karışım dağılımları ile modelleme yapmanın enerji üretim ve güç yoğunluğu tahminlerinde yapılan hataları azalttığı gösterilmiştir. Örneğin normal dağılım kullanılması sonucu % 5,31 olan mutlak güç tahmin hatası Normal Normal karışım dağılımında % 0,07 seviyesine inmektedir. Benzer şekilde MLH yöntemi ile parametreleri belirlenen Weibull dağılımı kullanılması sonucu oluşan rüzgar türbini ortalama güç tahmin hatası % 10,95 iken MWblWbl karışım dağılımında bu oran % 0,4 olmuştur. Bunun ana nedeni en yüksek olabilirlik yöntemi ile dağılım parametreleri belirlenmesi sırasında kullanılan Likelihood değerinin en kötü durumda standart dağılımı vermesidir. Yani ağırlık parametresinin sıfır ya da bire eşit olmasıdır. Diğer durumlarda ise bir karışım dağılımı ortaya çıkmaktadır. Yapılan çalışmada karışım dağılımlarının şekillerinden bazıları örnekler ile sunulmuştur. Bu şekillerden de görülebileceği gibi bazı durumlarda karışım dağılımların şekilleri birbirlerini çok benzemektedirler. Bunun sonucu olarak da ortalama rüzgar türbini gücü çıktısında ve güç yoğunluğu belirlemede birbirlerine yakın sonuçlar vermektedirler. Çalışma kapsamında kullanılan üç MEP dağılımına göre hatalar ise % 3,75 (MEP3), % 0,5 (MEP4) ve % 0,08 (MEP5) olarak hesaplanmıştır. Buna ek olarak güç yoğunluğunda olan tahmin hatalarının enerji üretiminde olan tahmin hatalarından genelde daha düşük olduğu hatta güç yoğunluğunun belirlenmesinde yüksek hatası olan çeşitli dağılımların ortalama rüzgar türbini gücünü belirlemede çok daha az hata yaptıkları belirlenmiştir. Bu durumunun iki ana nedeni vardır. Bu nedenlerden birincisi rüzgar türbini güç tahmininde oluşan pozitif ve negatif farkların birbirini yok etmesidir. İkincisi nedeni ise rüzgar türbininin eğrisinden kaynaklanmaktadır, rüzgar türbini nominal hızdan sonra sabit güç çıktısı vermekte ve belirli rüzgar şiddetleri arasında çalışmaktadır.

Rüzgar türbininin WAsP ile yapılan enerji analizi sonucunda ise türbin ortalama güç çıktısı tahmin hatasının % 5,94 olduğu belirlenmiştir. Simülasyon sonuçlarının ölçülen gerçek değerlerden farklı olmasının iki ana nedeni vardır. Bu nedenlerden bir tanesi enerji üretim analizinde kullanılan Weibull dağılımı ile rüzgar akış modellemesinde olan hatadır. İkincisi ise rüzgar türbini güç eğrisi modellemesinde

kullanılan yöntemden kaynaklanmaktadır. Bu tez kapsamında gerçek santral verileri kullanılarak yapılan analiz tek tepeli bir rüzgar şiddeti veri setinin dağılımının analizidir. Standart olasılık dağılımlar, frekans dağılımının tek tepeli olması durumlarda çok tepeli duruma göre daha başarılı dağılımlardır. Karışım dağılımı modelleri ve MEP dağılımı modelleri ise gerek frekans dağılımının tek tepeli olması gerekse de çok tepeli olması durumunda bile rüzgar şiddeti modellenmesinde başarılı olabilmektedir. Rüzgar enerjisi potansiyel analiz programlarında daha doğru enerji üretim tahmini yapılabilmesi ve bölge rüzgar karakteristiğinin daha az hata ile belirlenebilmesi için sadece Weibull dağılımına göre değil karışım dağılımları ve MEP dağılımlarına göre de rüzgar karakteristiği analizi yapılması gereklidir.

KAYNAKLAR

- [1] Sohtaoğlu, H., Diz, İ., & Erbaş, M. F. (2006). Kaynaklarının Arz ve Talebe Yönelik Küresel Eğilimlerinin Tarihsel Süreçte Karşılaştırmalı Analizi. *Türkiye 10. Enerji Kongresi*, (s.9-22). İstanbul, Türkiye. 27-30 Kasım 2006.
- [2] **Türkiye enerji Görünümü.** (2017). Erişim: 04 Aralık 2017, http://www.mmo.org.tr/sites/default/files/TURKIYE%20ENERJİ%20GÖRÜNÜMÜ_EYLÜL%202017%20%281%29.pdf
- [3] **Ekonomi Sunumu.** (2017). Erişim: 30 Temmuz 2017, <https://m.hazine.gov.tr/ekonomi-sunumu>
- [4] **BP Statistical Review of World Energy June 2015.** (2015). Erişim: 04 Ocak 2017, <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>
- [5] Shafiee, S., & Topal, E. (2009). When will fossil fuel reserves be diminished?, *Energy Policy*, 37(1), 181-189.
- [6] **World Energy Outlook 2017.** (2017). Erişim: 12 Şubat 2018, https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO_2017_Executive_Summary_English_version.pdf
- [7] **Key World Energy Statistics 2017.** (2017). Erişim: 03 Temmuz 2017, <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf>
- [8] **Access to electricity.** (2017). Erişim: 18 Şubat 2018, <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS>
- [9] **İstanbul Teknik Üniversitesi.** (2007). *Türkiye’de Enerji ve Geleceği, İTÜ Görüşü Raporu*. İstanbul. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [10] **PVPS.** (2007). *Snapshot of Global Photovoltaic Markets Report*. International Energy Agency.
- [11] **Energy statistics.** (2016). Erişim: 10 Ekim 2016, <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database10>
- [12] **Wind in power 2015 European statistics.** (2016). Erişim: 12 Ocak 2016, <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/EWEA-Annual-Statistics-2015.pdf>
- [13] **Yenilenebilir enerji kaynakları.** (2018). Erişim: 18 Şubat 2018, http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/9514e888b8f2aca_ek.pdf

- [14] **Jacobson, M. Z., & Delucchi, M. A.** (2011). Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. *Energy Policy*, 39(3), 1154-1169.
- [15] **Archer, C. L., & Jacobson, M. Z.** (2005). Evaluation of global wind power. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D12).
- [16] **Lu, X., McElroy, M. B., & Kiviluoma, J.** (2009). Global potential for wind-generated electricity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(27), 10933-10938.
- [17] **Dupont, E., Koppelaar, R., & Jeanmart, H.** (2018). Global available wind energy with physical and energy return on investment constraints. *Applied Energy*, 209, 322-338.
- [18] **Capps, S. B., & Zender, C. S.** (2010). Estimated global ocean wind power potential from QuikSCAT observations, accounting for turbine characteristics and siting. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D9).
- [19] **Zhou, Y., Luckow, P., Smith, S. J., & Clarke, L.** (2012). Evaluation of global onshore wind energy potential and generation costs. *Environmental Science & Technology*, 46(14), 7857-7864.
- [20] **Hoogwijk, M., de Vries, B., & Turkenburg, W.** (2004). Assessment of the global and regional geographical, technical and economic potential of onshore wind energy. *Energy Economics*, 26(5), 889-919.
- [21] **Global wind statistics 2016.** (2017). Erişim: 17 Eylöl 2017, http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2016_EN_WEB.pdf
- [22] **Indian wind energy a brief outlook.** (2017). Erişim: 18 şubat 2018, http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_IWEO_2016_LR.pdf
- [23] **Wind in power.** (2017). Erişim: 02 Aralık 2017, <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2016.pdf>
- [24] **Global Wind Report 2016 – Annual market update.** (2017). Erişim: 02 Aralık 2017, <http://gwec.net/publications/global-wind-report-2/global-wind-report-2016/>
- [25] **Giant turbine breaks offshore power record.** (2017). Erişim: 02 Haziran 2017, <https://www.theengineer.co.uk/giant-turbine-breaks-offshore-power-record/>
- [26] **MHI Vestas upgrades V164 to 9MW.** (2017). Erişim: 08 Haziran 2017, <https://www.windpoweroffshore.com/article/1422223/mhi-vestas-upgrades-v164-9mw>
- [28] **Boccard, N.** (2009). Capacity factor of wind power realized values vs. estimates. *energy policy*, 37(7), 2679-2688.

- [29] **Panorama de l'électricité renouvelable 2014.** (2015). Erişim: 23 Ocak 2017, http://www.rte-france.com/sites/default/files/panorama_des_energies_renouvelables_2014.pdf
- [30] **Akdağ, S. A., & Güler, Ö.** (2007). Dünyada Uygulanan Destek Modellerine Bağlı Olarak Rüzgar Enerjisi ile Sektörünün Gelişimi ve Ülkemizdeki Mevcut Durumun Değerlendirilmesi. *VI. Enerji Sempozyumu*, (s.207-221) Ankara, 22-24 Ekim 2007
- [31] **van Wijk, A. J. M., & Coelingh, J. P.** (1993). Wind power potential in the OECD Countries. Department of Science, Technology and Society, Utrecht University.
- [32] **Malkoç, Y.** (2007). Numerik Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası. *VI. 26. Enerji Verimliliği Haftası Konferansı*, Ankara, 11-14 Nisan 2007
- [33] **Hepbasli, A., & Ozgener, O.** (2004). A review on the development of wind energy in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(3), 257-276.
- [34] **Teiaş.** (2015). *Türkiye elektrik enerjisi 5 yıllık üretim kapasite projeksiyonu (2016-2020)* Ankara. www.epdk.org.tr/TR/Dokuman/7732
- [35] **Akdağ, S. A., & Güler, Ö.** (2010). Evaluation of wind energy investment interest and electricity generation cost analysis for Turkey. *Applied Energy*, 87(8), 2574-2580.
- [36] **Türeb.** (2016). <http://www.tureb.com.tr>
- [37] **Şenkal, A., Çetin, N. S., & Edaş, G.** (2009). Türkiye’de Kurulu Olan Büyük Güçlü Rüzgar Santrallerinin Kapasite Faktörlerine Genel Bir Bakış. *Ege Bölgesi Enerji Forumu*, Denizli, 12-13 Ekim 2009
- [38] **Şenkal, A.** (2010). *Türkiye’de kurulu olan büyük güçlü rüzgar santrallerinin genel değerlendirilmesi* (Yükseklisans tezi). Ege Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, İzmir.
- [39] **Bayrak, Y.** (2012). *Türkiye elektrik sisteminde rüzgar santralleri 2010 yılı üretim analizi*. Ankara: Teiaş.
- [40] **Cavallo, A. J.** (1995). High-capacity factor wind energy systems. *Journal of Solar Energy Engineering*, 117(2), 137-143.
- [41] **May, G. J., Davidson, A., & Monahov, B.** (2018). Lead batteries for utility energy storage: A review. *Journal of Energy Storage*, 15, 145-157.
- [42] **Smallbone, A., Jülch, V., Wardle, R., & Roskilly, A. P.** (2017). Levelised Cost of Storage for Pumped Heat Energy Storage in comparison with other energy storage technologies. *Energy Conversion and Management*, 152, 221-228.
- [43] **Barbour, E., Parra, D., Awwad, Z., & González, M. C.** (2018). Community energy storage: A smart choice for the smart grid?. *Applied Energy*, 212, 489-497.
- [44] **Steinmann, W. D.** (2017). Thermo-mechanical concepts for bulk energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 205-219.

- [45] **Alham, M. H., Elshahed, M., Ibrahim, D. K., & El Zahab, E. E. D. A.** (2017). Optimal operation of power system incorporating wind energy with demand side management. *Ain Shams Engineering Journal*, 8(1), 1-7.
- [46] **Martinez-Anido, C. B., Brinkman, G., & Hodge, B. M.** (2016). The impact of wind power on electricity prices. *Renewable Energy*, 94, 474-487.
- [47] **Saleh, A. E., Moustafa, M. S., Abo-Al-Ez, K. M., & Abdullah, A. A.** (2016). A hybrid neuro-fuzzy power prediction system for wind energy generation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 74, 384-395.
- [48] **Damousis, I. G., Alexiadis, M. C., Theocharis, J. B., & Dokopoulos, P. S.** (2004). A fuzzy model for wind speed prediction and power generation in wind parks using spatial correlation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(2), 352-361.
- [49] **Khosravi, A., Nahavandi, S., & Creighton, D.** (2013). Prediction intervals for short-term wind farm power generation forecasts. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4(3), 602-610.
- [50] **Mabel, M. C., & Fernandez, E.** (2008). Analysis of wind power generation and prediction using ANN: A case study. *Renewable Energy*, 33(5), 986-992.
- [51] **Jursa, R., & Rohrig, K.** (2008). Short-term wind power forecasting using evolutionary algorithms for the automated specification of artificial intelligence models. *International Journal of Forecasting*, 24(4), 694-709.
- [52] **Jung, C., Schindler, D., Laible, J., & Buchholz, A.** (2017). Introducing a system of wind speed distributions for modeling properties of wind speed regimes around the world. *Energy Conversion and Management*, 144, 181-192.
- [53] **Bagiorgas, H. S., Assimakopoulos, M. N., Theoharopoulos, D., Matthopoulos, D., & Mihalakakou, G. K.** (2007). Electricity generation using wind energy conversion systems in the area of Western Greece. *Energy Conversion and Management*, 48(5), 1640-1655.
- [54] **Olaofe, Z. O.** (2017). Assessment of the Offshore Wind Speed Distributions at Selected Stations in the South-West Coast, Nigeria. *International Journal of Renewable Energy Research*, 7(2), 565-577.
- [55] **Aries, N., Boudia, S. M., & Ounis, H.** (2018). Deep assessment of wind speed distribution models: A case study of four sites in Algeria. *Energy Conversion and Management*, 155, 78-90.
- [56] **Ramírez, P., & Carta, J. A.** (2006). The use of wind probability distributions derived from the maximum entropy principle in the analysis of wind energy. A case study. *Energy Conversion and Management*, 47(15-16), 2564-2577.

- [57] **Akdağ, S. A., & Dinler, A.** (2009). A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications. *Energy Conversion and Management*, 50(7), 1761-1766.
- [58] **Azad, A. K.** (2012). Statistical Weibull's Distribution Analysis for Wind Power of The Two Dimensional Ridge Areas. *International Journal of Advanced Renewable Energy Research*, 1(1), 8-13.
- [59] **Chaurasiya, P. K., Ahmed, S., & Warudkar, V.** (2018). Comparative analysis of Weibull parameters for wind data measured from met-mast and remote sensing techniques. *Renewable Energy*, 115, 1153-1165.
- [60] **Faghani, G. R., Ashrafi, Z. N., & Sedaghat, A.** (2018). Extrapolating wind data at high altitudes with high precision methods for accurate evaluation of wind power density, case study: Center of Iran. *Energy Conversion and Management*, 157, 317-338.
- [61] **Kantar, Y. M., Kurban, M., & Hocaoglu, F. O.** (2011). Comparison of six different parameter estimation methods in wind power applications. *Scientific Research and Essays*, 6(32), 6594-6604.
- [62] **Saxena, B. K., & Rao, K. V. S.** (2015). Comparison of Weibull parameters computation methods and analytical estimation of wind turbine capacity factor using polynomial power curve model: case study of a wind farm. *Renewables: Wind, Water, and Solar*, 2(1), 3.
- [63] **Carrillo, C., Cidrás, J., Díaz-Dorado, E., & Obando-Montaño, A. F.** (2014). An approach to determine the Weibull parameters for wind energy analysis: The case of Galicia (Spain). *Energies*, 7(4), 2676-2700.
- [64] **Ramos-Robles, C. A., & Irizarry-Rivera, A. A.** (2005). Economical effects of the Weibull parameter estimation on wind energy projects. *Power Symposium, Proceedings of the 37th Annual North American* (pp. 597-602) .
- [65] **Jourdier, B., & Drobinski, P.** (2017). Errors in wind resource and energy yield assessments based on the Weibull distribution. In *Annales Geophysicae* (Vol. 35, No. 3, p. 691).
- [66] **Putnam, P. C.** (1948). *Power from the Wind*. Van Nostrand Company.
- [67] **Johnson, G. L.** (1978). Economic design of wind electric systems. *IEEE transactions on Power Apparatus and Systems*, (2), 554-562.
- [68] **Justus, C. G., Hargraves, W. R., & Yalcin, A.** (1976). Nationwide assessment of potential output from wind-powered generators. *Journal of Applied Meteorology*, 15(7), 673-678.
- [69] **Justus, C. G., Hargraves, W. R., Mikhail, A., & Graber, D.** (1978). Methods for estimating wind speed frequency distributions. *Journal of Applied Meteorology*, 17(3), 350-353.
- [70] **Hennessey Jr, J. P.** (1977). Some aspects of wind power statistics. *Journal of Applied Meteorology*, 16(2), 119-128.

- [71] **Tuller, S. E., & Brett, A. C.** (1984). The characteristics of wind velocity that favor the fitting of a Weibull distribution in wind speed analysis. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(1), 124-134.
- [72] **Barros, V. R., & Estevan, E. A.** (1983). On the evaluation of wind power from short wind records. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22(6), 1116-1123.
- [73] **Dixon, J. C., & Swift, R. H.** (1984). The directional variation of wind probability and Weibull speed parameters. *Atmospheric Environment (1967)*, 18(10), 2041-2047.
- [74] **Ramachandra, T. V., Subramanian, D. K., & Joshi, N. V.** (1997). Wind energy potential assessment in Uttara Kannada district of Karnataka, India. *Renewable Energy*, 10(4), 585-611.
- [75] **Chang, T. J., Wu, Y. T., Hsu, H. Y., Chu, C. R., & Liao, C. M.** (2003). Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan. *Renewable Energy*, 28(6), 851-871.
- [76] **Celik, A. N.** (2003). Energy output estimation for small-scale wind power generators using Weibull-representative wind data. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91(5), 693-707.
- [77] **Celik, A. N.** (2003). Weibull representative compressed wind speed data for energy and performance calculations of wind energy systems. *Energy Conversion and Management*, 44(19), 3057-3072.]
- [78] **Bagiorgas, H. S., Mihalakakou, G., & Matthopoulos, D.** (2008). A statistical analysis of wind speed distributions in the area of Western Greece. *International Journal of Green Energy*, 5(1-2), 120-137.
- [79] **Cellura, M. A. U. R. I. Z. I. O., Cirrincione, G., Marvuglia, A., & Miraoui, A.** (2008). Wind speed spatial estimation for energy planning in Sicily: Introduction and statistical analysis. *Renewable Energy*, 33(6), 1237-1250.
- [80] **Jiang, Q., Doyle, J. D., Haack, T., Dvorak, M. J., Archer, C. L., & Jacobson, M. Z.** (2008). Exploring wind energy potential off the California coast. *Geophysical Research Letters*, 35(20).
- [81] **Stewart, D. A., & Essenwanger, O. M.** (1978). Frequency distribution of wind speed near the surface. *Journal of Applied Meteorology*, 17(11), 1633-1642.
- [82] **Pavia, E. G., & O'Brien, J. J.** (1986). Weibull statistics of wind speed over the ocean. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25(10), 1324-1332.
- [83] **Troen, I., & Petersen, E. L.** (1989). *Wwind atlas for Denmark*. Risø National Laboratory.
- [84] **Ettoumi, F. Y., Adane, A. E. H., Benzaoui, M. L., & Bouzergui, N.** (2008). Comparative simulation of wind park design and siting in Algeria. *Renewable Energy*, 33(10), 2333-2338.

- [85] **Haghparsast-Kashani, A., & Bahri, A.** (2009). Compilation of wind energy assessment software and wind energy assessment in the northwest of Iran. *International Journal of Global Energy Issues*, 32(3), 241-259.
- [86] **Fyrippis, I., Axaopoulos, P. J., & Panayiotou, G.** (2010). Wind energy potential assessment in Naxos Island, Greece. *Applied Energy*, 87(2), 577-586.
- [87] **Dahmouni, A. W., Salah, M. B., Askri, F., Kerkeni, C., & Nasrallah, S. B.** (2011). Assessment of wind energy potential and optimal electricity generation in Borj-Cedria, Tunisia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 815-820.
- [88] **Alamdari, P., Nematollahi, O., & Mirhosseini, M.** (2012). Assessment of wind energy in Iran: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 836-860.
- [89] **Fueyo, N., Sanz, Y., Rodrigues, M., Montañés, C., & Dopazo, C.** (2010). High resolution modelling of the on-shore technical wind energy potential in Spain. *Wind Energy*, 13(8), 717-726.
- [90] **Diaf, S., & Notton, G.** (2013). Evaluation of electricity generation and energy cost of wind energy conversion systems in southern Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 379-390.
- [91] **Oney, S., Yarman, T., & Tekes, B.** (1979). Wind energy utilization possibilities in Turkey. *Proceedings of the Second Miami International Conference*, (pp. 1635-1656) Miami, 10-13 Aralık
- [92] **Taşdemiroğlu, E.** (1987). Wind energy assessment in Turkey. *Energy*, 12(1), 1-9.
- [93] **Külünk, H.** (1993). Wind energy potential in Turkey. *Applied Energy*, 45(3), 181-190.
- [94] **Tolun, S., Erim, ZM., Aslan, Z., Yükselen, A., Menteş, S., Beşerik, G.** (1994). *Çanakkale civarında rüzgar potansiyelinin belirlenmesi ve yöreye uygun küçük güçlü bir rüzgar türbini dizaynı* (Rapor No: DPT: 30/90K121100). İstanbul: Devlet Planlama Teşkilatı.
- [95] **Tolun, S., Menteş, S., Aslan, Z., & Yükselen, M. A.** (1995). The wind energy potential of Gökçeada in the northern Aegean Sea. *Renewable Energy*, 6(7), 679-685.
- [96] **Türkiye rüzgar atlası nın hazırlanması projesi.** (2007). Erişim: 12 Temmuz 2017, https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/ba596643cbbbc20_ek.pdf
- [97] **Türksoy, F.** (1995). Investigation of wind power potential at Bozcaada, Turkey. *Renewable Energy*, 6(8), 917-923.
- [98] **Incecik, S., & Erdoğan, F.** (1995). An investigation of the wind power potential on the western coast of Anatolia. *Renewable Energy*, 6(7), 863-865.

- [99] **Topçu, S., Menteş, Ş. S., Yurdanur, S. Ü., & Aslan, Z.** (2001). Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin belirlenmesinde Yer Seçiminin Önemi: Sinop Örneği. *TMMOB Makine Mühendisleri Odası, II. Çevre ve Enerji Kongresi, İstanbul*, 145-154.
- [100] **Dündar, C., & Inan, D.** (1996). Investigation of wind energy application possibilities for a specific island (Bozcaada) in Turkey. *Renewable Energy*, 9(1-4), 822-826.
- [101] **Durak, M., & Şen, Z.** (2002). Wind power potential in Turkey and Akhisar case study. *Renewable Energy*, 25(3), 463-472.
- [102] **Karsli, V. M., & Geçit, C.** (2003). An investigation on wind power potential of Nurdağı-Gaziantep, Turkey. *Renewable Energy*, 28(5), 823-830.
- [103] **Ozerdem, B., & Turkeli, M.** (2003). An investigation of wind characteristics on the campus of Izmir Institute of Technology, Turkey. *Renewable Energy*, 28(7), 1013-1027.
- [104] **Hocaoğlu, F. O., & Kurban, M.** (2009). Regional wind energy resource assessment. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 5(1), 41-49.
- [105] **Özgür, M.A** (2006). *Kütahya rüzgar karakteristiğinin istatistiksel analizi ve elektrik üretimine uygulanabilirliği* (Doktora tezi). Kütahya Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Kütahya.
- [106] **Usta, İ., & Kantar, Y. M.** (2016). Farklı olasılık yoğunluk fonksiyonları kullanarak rüzgar gücü potansiyelinin tahmini. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 18(3), 362-380.
- [107] **Oral, F.** (2010). *Sakarya-Esentepe yöresi rüzgar enerjisi potansiyelinin yeni bir yaklaşımla belirlenmesi* (Doktora tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Sakarya.
- [108] **Gölçek, M., Erdem, H. H., & Bayülken, A.** (2007). A techno-economical evaluation for installation of suitable wind energy plants in Western Marmara, Turkey. *Energy Exploration & Exploitation*, 25(6), 407-427.
- [109] **Akdağ, S. A., & Güler, Ö.** (2010). Wind characteristics analyses and determination of appropriate wind turbine for Amasra—Black Sea region, Turkey. *International Journal of Green Energy*, 7(4), 422-433.
- [110] **Bilir, L., Imir, M., Devrim, Y., & Albostan, A.** (2015). An investigation on wind energy potential and small scale wind turbine performance at İncek region—Ankara, Turkey. *Energy Conversion and Management*, 103, 910-923.
- [111] **Ramos-Robles, C. A., & Irizarry-Rivera, A. A.** (2005). Economical effects of the Weibull parameter estimation on wind energy projects. *Power Symposium, Proceedings of the 37th Annual North American* (pp. 597-602).

- [112] **Okeniyi, J. O., Moses, I. F., & Okeniyi, E. T.** (2015). Wind characteristics and energy potential assessment in Akure, South West Nigeria: econometrics and policy implications. *International Journal of Ambient Energy*, 36(6), 282-300.
- [113] **Takle, E. S., & Brown, J. M.** (1978). Note on the use of Weibull statistics to characterize wind-speed data. *Journal of Applied Meteorology*, 17(4), 556-559.
- [114] **Stevens, M. J. M., & Smulders, P. T.** (1979). The estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy utilization purposes. *Wind engineering*, 132-145.
- [115] **Conradsen, K., Nielsen, L. B., & Prahm, L. P.** (1984). Review of Weibull statistics for estimation of wind speed distributions. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(8), 1173-1183.
- [116] **Seguro, J. V., & Lambert, T. W.** (2000). Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85(1), 75-84.
- [117] **Al-Fawzan, M. A.** (2000). Methods for estimating the parameters of the Weibull distribution. *King Abdulaziz City for Science and Technology, Saudi Arabia*.
- [118] **Dorvlo, A. S.** (2002). Estimating wind speed distribution. *Energy Conversion and Management*, 43(17), 2311-2318.
- [119] **Pryor, S. C., Nielsen, M., Barthelmie, R. J., & Mann, J.** (2004). Can satellite sampling of offshore wind speeds realistically represent wind speed distributions? Part II: Quantifying uncertainties associated with distribution fitting methods. *Journal of Applied Meteorology*, 43(5), 739-750.
- [120] **Genc, A., Erisoglu, M., Pekgor, A., Oturanc, G., Hepbasli, A., & Ulgen, K.** (2005). Estimation of wind power potential using Weibull distribution. *Energy Sources*, 27(9), 809-822.
- [121] **Lei, Y.** (2008). Evaluation of three methods for estimating the Weibull distribution parameters of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*). *Journal of Forest Science*, 54(12), 566-571.
- [122] **Ozgur, M. A., Arslan, O., Kose, R., & Peker, K. O.** (2009). Statistical evaluation of wind characteristics in Kutahya, Turkey. *Energy Sources, Part A*, 31(16), 1450-1463.
- [123] **Jowder, F. A.** (2009). Wind power analysis and site matching of wind turbine generators in Kingdom of Bahrain. *Applied Energy*, 86(4), 538-545.
- [124] **Chang, T. P.** (2011). Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application. *Applied Energy*, 88(1), 272-282.
- [125] **Bilgili, M., & Şahin, B.** (2010). Statistical analysis of wind energy density in the western region of Turkey. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 32(13), 1224-1235.

- [126] **Ouammi, A., Sacile, R., Zejli, D., Mimet, A., & Benchrifa, R.** (2010). Sustainability of a wind power plant: Application to different Moroccan sites. *Energy*, 35(10), 4226-4236.
- [127] **Bagiorgas, H. S., Giouli, M., Rehman, S., & Al-Hadhrami, L. M.** (2011). Weibull parameters estimation using four different methods and most energy-carrying wind speed analysis. *International Journal of Green Energy*, 8(5), 529-554.
- [128] **Odo, F. C., & Akubue, G. U.** (2012). Comparative Assessment of Three Models for Estimating Weibull Parameters for Wind Energy Applications in a Nigerian Location. *International Journal of Energy Science*, 2(1).
- [129] **Maatallah, T., El Alimi, S., Dahmouni, A. W., & Nasrallah, S. B.** (2013). Wind power assessment and evaluation of electricity generation in the Gulf of Tunis, Tunisia. *Sustainable Cities and Society*, 6, 1-10.
- [130] **Bagiorgas, H. S., Mihalakakou, G., Rehman, S., & Al-Hadhrami, L. M.** (2012). Offshore wind speed and wind power characteristics for ten locations in Aegean and Ionian Seas. *Journal of Earth System Science*, 121(4), 975-987.
- [131] **Saleh, H., Aly, A. A. E. A., & Abdel-Hady, S.** (2012). 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.
- [132] **El Alimi, S., Maatallah, T., Dahmouni, A. W., & Nasrallah, S. B.** (2012). Modeling and investigation of the wind resource in the gulf of Tunis, Tunisia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5466-5478.
- [133] **Chu, Y. K., & Ke, J. C.** (2012). Computation approaches for parameter estimation of Weibull distribution. *Mathematical and Computational Applications*, 17(1), 39-47.
- [134] **Rocha, P. A. C., de Sousa, R. C., de Andrade, C. F., & da Silva, M. E. V.** (2012). Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil. *Applied Energy*, 89(1), 395-400.
- [135] **Mohammadi, K., & Mostafaeipour, A.** (2013). Using different methods for comprehensive study of wind turbine utilization in Zarrineh, Iran. *Energy Conversion and Management*, 65, 463-470.
- [136] **Bulut, Y. M. & Açıkalp, E.** (2013). Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Hesaplanmasında Parametre Tahmin Yöntemlerinin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 1(2), 49-54.
- [137] **Khahro, S. F., Tabbassum, K., Soomro, A. M., Dong, L., & Liao, X.** (2014). Evaluation of wind power production prospective and Weibull parameter estimation methods for Babaurband, Sindh Pakistan. *Energy Conversion and Management*, 78, 956-967.

- [138] **Azad, A. K., Rasul, M. G., & Yusaf, T.** (2014). Statistical diagnosis of the Best Weibull methods for wind power assessment for agricultural applications. *Energies*, 7(5), 3056-3085.
- [139] **Carrillo, C., Cidrás, J., Díaz-Dorado, E., & Obando-Montaño, A. F.** (2014). An approach to determine the Weibull parameters for wind energy analysis: The case of Galicia (Spain). *Energies*, 7(4), 2676-2700.
- [140] **de Andrade, C. F., Neto, H. F. M., Rocha, P. A. C., & da Silva, M. E. V.** (2014). An efficiency comparison of numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy applications: A new approach applied to the northeast region of Brazil. *Energy Conversion and Management*, 86, 801-808.
- [141] **Arslan, T., Bulut, Y. M., & Yavuz, A. A.** (2014). Comparative study of numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 820-825.
- [142] **Indhumathy, D., Seshaiyah, C. V., & Sukkiramathi, K.** (2014). Estimation of Weibull Parameters for Wind speed calculation at Kanyakumari in India. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(1), 8340-8345.
- [143] **Kaoga, D. K., Raidandi, D., Djongyang, N., & Doka, S. Y.** (2014). Comparison of five numerical methods for estimating Weibull parameters for wind energy applications in the district of Kousseri, Cameroon. *Asian Journal of Natural & Applied Sciences Vol, 3*, 1.
- [144] **Akdağ, S. A., & Güler, Ö.** (2015). A novel energy pattern factor method for wind speed distribution parameter estimation. *Energy Conversion and Management*, 106, 1124-1133.
- [145] **Werapun, W., Tirawanichakul, Y., & Waewsak, J.** (2015). Comparative study of five methods to estimate Weibull parameters for wind speed on Phangan Island, Thailand. *Energy Procedia*, 79, 976-981.
- [146] **Kidmo, D. K., Danwe, R., Doka, S. Y., & Djongyang, N.** (2015). Statistical analysis of wind speed distribution based on six Weibull Methods for wind power evaluation in Garoua, Cameroon. *Revue des Energies Renouvelables*, 18(1), 105-125.
- [147] **Mohammadi, K., Alavi, O., Mostafaeipour, A., Goudarzi, N., & Jalilvand, M.** (2016). Assessing different parameters estimation methods of Weibull distribution to compute wind power density. *Energy Conversion and Management*, 108, 322-335.
- [148] **Solyali, D., Altunç, M., Tolun, S., & Aslan, Z.** (2016). Wind resource assessment of Northern Cyprus. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 180-187.
- [149] **Shoaib, M., Siddiqui, I., Amir, Y. M., & Rehman, S. U.** (2017). Evaluation of wind power potential in Baburband (Pakistan) using Weibull distribution function. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1343-1351.

- [150] **Katinas, V., Marčiukaitis, M., Gecevičius, G., & Markevičius, A.** (2017). Statistical analysis of wind characteristics based on Weibull methods for estimation of power generation in Lithuania. *Renewable Energy*, 113, 190-201.
- [151] **Chaurasiya, P. K., Ahmed, S., & Warudkar, V.** (2018). Comparative analysis of Weibull parameters for wind data measured from met-mast and remote sensing techniques. *Renewable Energy*, 115, 1153-1165.
- [152] **Aukitino, T., Khan, M. G. M., & Ahmed, M. R.** (2017). Wind energy resource assessment for Kiribati with a comparison of different methods of determining Weibull parameters. *Energy Conversion and Management*, 151, 641-660.
- [153] **Christofferson, R. D., & Gillette, D. A.** (1987). A simple estimator of the shape factor of the two-parameter Weibull distribution. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26(2), 323-325.
- [154] **Ashrafi, Z. N., Ghasemian, M., Shahrestani, M. I., Khodabandeh, E., & Sedaghat, A.** (2018). Evaluation of hydrogen production from harvesting wind energy at high altitudes in Iran by three extrapolating Weibull methods. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- [155] **Kang, D., Ko, K., & Huh, J.** (2018). Comparative Study of Different Methods for Estimating Weibull Parameters: A Case Study on Jeju Island, South Korea. *Energies*, 11(2), 356.
- [156] **Kurban, M., Kantar, Y. M., & Hocaoglu, F. O.** (2006). Rüzgar enerjisi potansiyelinin araştırılmasında weibull ve rayleigh dağılımının kullanılması. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(1), 14-21.
- [157] **Brano, V. L., Orioli, A., Ciulla, G., & Culotta, S.** (2011). Quality of wind speed fitting distributions for the urban area of Palermo, Italy. *Renewable Energy*, 36(3), 1026-1039.
- [158] **Usta, I., & Kantar, Y. M.** (2012). Analysis of some flexible families of distributions for estimation of wind speed distributions. *Applied Energy*, 89(1), 355-367.
- [159] **Soukissian, T. H., & Karathanasi, F. E.** (2017). On the selection of bivariate parametric models for wind data. *Applied Energy*, 188, 280-304.
- [160] **Soukissian, T.** (2013). Use of multi-parameter distributions for offshore wind speed modeling: the Johnson SB distribution. *Applied Energy*, 111, 982-1000.
- [161] **Usta, I., & Kantar, Y. M.** (2012). Analysis of the Burr type XII distribution for estimation of wind speed distributions. In *International Science, Social Science, Engineering and Energy Conference* (pp. 302-308).
- [162] **Wu, J., Wang, J., & Chi, D.** (2013). Wind energy potential assessment for the site of Inner Mongolia in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 215-228.
- [163] **Safari, B.** (2011). Modeling wind speed and wind power distributions in Rwanda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 925-935.

- [164] **Ayodele, T. R., Jimoh, A. A., Munda, J. L., & Agee, J. T.** (2012). Wind distribution and capacity factor estimation for wind turbines in the coastal region of South Africa. *Energy Conversion and Management*, 64, 614-625.
- [165] **Qin, Z., Li, W., & Xiong, X.** (2011). Estimating wind speed probability distribution using kernel density method. *Electric Power Systems Research*, 81(12), 2139-2146. 166
- [166] **Van der Auwera, L., De Meyer, F., & Malet, L. M.** (1980). The use of the Weibull three-parameter model for estimating mean wind power densities. *Journal of Applied Meteorology*, 19(7), 819-825.
- [167] **Garcia, A., Torres, J. L., Prieto, E., & De Francisco, A.** (1998). Fitting wind speed distributions: a case study. *Solar Energy*, 62(2), 139-144.
- [168] **Tar, K.** (2008). Some statistical characteristics of monthly average wind speed at various heights. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(6), 1712-1724. 169
- [169] **Carta, J. A., Ramirez, P., & Velazquez, S.** (2009). 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.
- [170] **Masseran, N., Razali, A. M., & Ibrahim, K.** (2012). An analysis of wind power density derived from several wind speed density functions: The regional assessment on wind power in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6476-6487.
- [171] **Jaramillo, O. A., & Borja, M. A.** (2004). Wind speed analysis in La Ventosa, Mexico: a bimodal probability distribution case. *Renewable Energy*, 29(10), 1613-1630.
- [172] **Jaramillo, O. A., & Borja, M. A.** (2004). Bimodal versus Weibull wind speed distributions: an analysis of wind energy potential in La Venta, Mexico. *Wind Engineering*, 28(2), 225-234.
- [173] **Chang, T. P.** (2011). Estimation of wind energy potential using different probability density functions. *Applied Energy*, 88(5), 1848-1856.
- [174] **Morgan, E. C., Lackner, M., Vogel, R. M., & Baise, L. G.** (2011). Probability distributions for offshore wind speeds. *Energy Conversion and Management*, 52(1), 15-26.
- [175] **Qin, X., Zhang, J. S., & Yan, X. D.** (2012). Two improved mixture Weibull models for the analysis of wind speed data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(7), 1321-1332.
- [176] **Celik, A. N., Makkawi, A., & Muneer, T.** (2010). Critical evaluation of wind speed frequency distribution functions. *Journal of renewable and sustainable energy*, 2(1), 013102.
- [177] **Jeromel, M., Vlado Malačič, V., & Rakovec, J.** (2009). Weibull distribution of bora and sirocco winds in the northern Adriatic Sea. *Geofizika*, 26(1), 85-100.

- [178] Akdağ, S. A., Bagiorgas, H. S., & Mihalakakou, G. (2010). Use of two-component Weibull mixtures in the analysis of wind speed in the Eastern Mediterranean. *Applied Energy*, 87(8), 2566-2573.
- [179] Carta, J. A., & Ramírez, P. (2007). Use of finite mixture distribution models in the analysis of wind energy in the Canarian Archipelago. *Energy Conversion and Management*, 48(1), 281-291.
- [180] Carta, J. A., & Ramirez, P. (2007). Analysis of two-component mixture Weibull statistics for estimation of wind speed distributions. *Renewable Energy*, 32(3), 518-531.181 Carta
- [181] Carta, J. A., Ramírez, P., & Velázquez, S. (2008). Influence of the level of fit of a density probability function to wind-speed data on the WECS mean power output estimation. *Energy Conversion and Management*, 49(10), 2647-2655.
- [182] Vicente, R. T. (2008). Influence of the fitted probability distribution type on the annual mean power generated by wind turbines: A case study at the Canary Islands. *Energy Conversion and Management*, 49(8), 2047-2054.
- [183] Kollu, R., Rayapudi, S. R., Narasimham, S. V. L., & Pakkurthi, K. M. (2012). Mixture probability distribution functions to model wind speed distributions. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 3(1), 27.
- [184] Rajapaksha, K. W. G. D. H., & Perera, K. (2016). Wind speed analysis and energy calculation based on mixture distributions in Narakkalliya, Sri Lanka. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*, 44(4).
- [185] Akpınar, S., & Akpınar, E. K. (2009). Estimation of wind energy potential using finite mixture distribution models. *Energy Conversion and Management*, 50(4), 877-884.
- [186] Kantar, Y.M. (2006). *Entropi optimizasyon metodlarıyla rassal değişkenlerin dağılımlarının incelenmesi* (Doktora tezi). Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Eskişehir.
- [187] Li, M., & Li, X. (2006). A second-order Newton-Raphson method for improved numerical stability in the determination of droplet size distributions in sprays. *Atomization and Sprays*, 16(1).
- [188] Li, M., & Li, X. (2005). MEP-type distribution function: a better alternative to Weibull function for wind speed distributions. *Renewable Energy*, 30(8), 1221-1240.
- [189] Li, M., & Li, X. (2005). Investigation of wind characteristics and assessment of wind energy potential for Waterloo region, Canada. *Energy Conversion and Management*, 46(18-19), 3014-3033.
- [190] Li, M., & Li, X. (2004). On the probabilistic distribution of wind speeds: theoretical development and comparison with data. *International Journal of Exergy*, 1(2), 237-255.

- [191] **Zhang, H., Yu, Y. J., & Liu, Z. Y.** (2014). Study on the Maximum Entropy Principle applied to the annual wind speed probability distribution: A case study for observations of intertidal zone anemometer towers of Rudong in East China Sea. *Applied Energy*, 114, 931-938.
- [192] **Akpinar, S., & Akpinar, E. K.** (2007). Wind energy analysis based on maximum entropy principle (MEP)-type distribution function. *Energy Conversion and Management*, 48(4), 1140-1149.
- [193] **Shamilov, A., Kantar, Y. M., & Usta, I.** (2008). Use of MinMaxEnt distributions defined on basis of MaxEnt method in wind power study. *Energy Conversion and Management*, 49(4), 660-677.
- [194] **Kantar, Y. M., & Usta, I.** (2008). Analysis of wind speed distributions: Wind distribution function derived from minimum cross entropy principles as better alternative to Weibull function. *Energy Conversion and Management*, 49(5), 962-973.
- [195] **Liu, F. J., & Chang, T. P.** (2011). Validity analysis of maximum entropy distribution based on different moment constraints for wind energy assessment. *Energy*, 36(3), 1820-1826.
- [196] **Amar, F. B., & Elamouri, M.** (2012). A New theoretical model for modeling the wind speed frequency distribution. *International Journal of Renewable Energy Research*, 1(4), 306-313.
- [197] **Chellali, F., Khellaf, A., Belouchrani, A., & Khanniche, R.** (2012). 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.
- [198] **Akdağ, S. A., & Güler, Ö.** (2011). A comparison of wind turbine power curve models. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 33(24), 2257-2263.199
- [199] **Thapar, V., Agnihotri, G., & Sethi, V. K.** (2011). Critical analysis of methods for mathematical modelling of wind turbines. *Renewable Energy*, 36(11), 3166-3177.
- [200] **Carrillo, C., Montaña, A. O., Cidrás, J., & Díaz-Dorado, E.** (2013). Review of power curve modelling for wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 572-581.
- [201] **Lydia, M., Kumar, S. S., Selvakumar, A. I., & Kumar, G. E. P.** (2014). A comprehensive review on wind turbine power curve modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 452-460.
- [202] **Ditkovich, Y., & Kuperman, A.** (2014). Comparison of three methods for wind turbine capacity factor estimation. *The Scientific World Journal*, 2014.
- [203] **Chang, T. P., Liu, F. J., Ko, H. H., Cheng, S. P., Sun, L. C., & Kuo, S. C.** (2014). Comparative analysis on power curve models of wind turbine generator in estimating capacity factor. *Energy*, 73, 88-95.

- [204] **Astaneî, D., Nemes, C., Munteanu, F., & Ciobanu, A.** (2016). Annual energy production estimation based on wind speed distribution. In *Electrical and Power Engineering, 2016 International Conference and Exposition on* (pp. 862-867).
- [205] **Chang, T. P., Liu, F. J., Ko, H. H., Cheng, S. P., Sun, L. C., & Kuo, S. C.** (2014). Comparative analysis on power curve models of wind turbine generator in estimating capacity factor. *Energy*, 73, 88-95.
- [206] **Eminoglu, U., & Ayasun, S.** (2014). Modeling and design optimization of variable-speed wind turbine systems. *Energies*, 7(1), 402-419.
- [207] **Sohoni, V., Gupta, S. C., & Nema, R. K.** (2016). A critical review on wind turbine power curve modelling techniques and their applications in wind based energy systems. *Journal of Energy*, 2016.
- [208] **Hau, E.** (2006). *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Heidelberg: Springer.
- [209] **Oh, H., & Kim, B.** (2015). Comparison and verification of the deviation between guaranteed and measured wind turbine power performance in complex terrain. *Energy*, 85, 23-29.
- [210] **Tindal, A., Harman, K., Johnson, C., Schwarz, A., Garrad, A., & Hassan, G.** (2007, September). Validation of GH energy and uncertainty predictions by comparison to actual production. In *AWEA Wind Resource and Project Energy Assessment Workshop, Portland*.
- [211] **Kaldellis, J. K., Vlachou, D. S., & Paliatsos, A. G.** (2003). Twelve years energy production assessment of Greek state wind parks. *Wind Engineering*, 27(3), 215-226.
- [212] **Güler, Ö., Güzel, S., Akdağ, S.A** (2014) Comparison of Wind Energy Software Packages, 7th International Conference on Sustainable Energy & Environment Prote, Dubai, UAE, 23.11.2014 - 25.11.2014
- [213] **Nilsson, K.** (2010). Estimation of wind energy production in relation to orographic complexity-A reliability study of two conventional computer software.
- [214] **Chakravarthy, M., & Henni, A.** (2014). Simulation of a wind farm in swift current region in Southern Saskatchewan (Canada). *International Journal of Sustainable Energy*, 33(1), 96-102.
- [215] **Llombart, A., Talayero, A., Mallet, A., & Telmo, E.** (2006). Performance analysis of wind resource assessment programs in complex terrain. In *Int'l Conference on Renewable Energies and Power Quality*.
- [216] **Acker, T., & Chime, A. H.** (2011). Wind modeling using WindPro and WAsP software. *Norther Arizon University, USA*, 1560000(8.8).
- [217] **Continium**, Erişim: 17 Eylül 2017, www.cancalia.com
- [218] **Dragoi, I.** (2013). Comparison of optimization for non linear and linear wind resource grids.
- [219] **Bilgili, M., & Sahin, B.** (2009). Investigation of wind energy density in the southern and southwestern region of Turkey. *Journal of Energy Engineering*, 135(1), 12-20.

- [220] http://www.emd.dk/files/windpro/documentation/Case%20report02a%20-%20Torrild-WindSIM_Denmark.pdf
- [221] **Wallbank, T.** (2008). WindSim validation study. *CFD validation in Complex terrain*.
- [222] **Lopez, H. V.** (2014). *The Illusion of Power Curves* (Master's thesis, Delft University of Technology-Department of Wind Energy).
- [223] **Rinne, H.** (2008). *The Weibull distribution: a handbook*. CRC Press.
- [224] **Weibull, W.** (1951). A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of Applied Mechanics*, 18(3), 293-297.
- [225] **McCool, J. I.** (2012). *Using the Weibull distribution: reliability, modeling, and inference* (Vol. 950). John Wiley & Sons.
- [226] **Dodson, B.** (2006). *The Weibull analysis handbook*. ASQ Quality Press.
- [227] **Akdağ, S.A.** (2007). *Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Ve Ekonomik Analizinde Weibull Dağılımının Kullanımı* (Yükseklisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [228] **Süzek, F.** (2008). *Türkiye rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesi* (Yükseklisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [229] **Akdağ, S. A., & Güler, Ö.** (2018). Alternative Moment Method for wind energy potential and turbine energy output estimation. *Renewable Energy*, 120, 69-77.
- [230] **Pearson, K.** (1894). Contributions to the mathematical theory of evolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. A*, 185, 71-110.
- [231] **McLachlan, G. & Peel, D.** (2004). *Finite Mixture Models*. San Francisco, CA.: Willey.
- [232] **Erol, H.** (1995). *Sonlu karma dağılım modelleri* (Yükseklisans tezi). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [233] **Teicher, H.** (1963). Identifiability of finite mixtures. *The annals of Mathematical Statistics*, 1265-1269.
- [234] **Atienza, N., Garcia-Heras, J., & Munoz-Pichardo, J. M.** (2006). A new condition for identifiability of finite mixture distributions. *Metrika*, 63(2), 215-221.
- [235] **Mixtools.** Erişim: 17 Eylül 2017, <https://cran.r-project.org/web/packages/mixtools/vignettes/mixtools.pdf>
- [236] **Mixdist,** Erişim: 17 Eylül 2017, <https://www.rdocumentation.org/packages/mixdist/versions/0.5-4>
- [237] **Rebmix,** Erişim: 17 Eylül 2017, <https://pdfs.semanticscholar.org/da06/cd710d15a909675cd4581cb49a1be0acda3a.pdf>
- [238] **Mclust,** Erişim: 17 Eylül 2017, <https://cran.r-project.org/web/packages/mclust/vignettes/mclust.html>

- [239] **Shannon, C. E. (1948).** Mathematical theory of communication. The Bell System Technical Journal , 27, 379-423.
- [240] **Jaynes, E. T. (1957).** Information theory and statistical mechanics. *Physical Review*, 106(4), 620.
- [241] **Usta, İ. (2006).** MaxEnt ve MinxEnt Optimizasyon Prensiplerine Bağlı Nümerik İncelemeler ve İstatistiksel Uygulamalar. *Yükseklisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.*
- [242] **Garcia-Bustamante, E., Gonzalez-Rouco, J. F., Jiménez, P. A., Navarro, J., & Montávez, J. P. (2009).** A comparison of methodologies for monthly wind energy estimation. *Wind Energy*, 12(7), 640-659.
- [243] **International Electrotechnical Commission. (2013).** *Power performance of electricity producing wind turbines based on nacelle anemometry.* IEC 61400-12-2 CD Part 12-2
- [244] **Staffell, I., & Green, R. (2014).** How does wind farm performance decline with age?. *Renewable Energy*, 66, 775-786.
- [245] **International Electrotechnical Commission. (2008).** *Power performance measurements of electricity producing wind turbines.* IEC 61400-12-1
- [246] **Klug, H, (2001).** Wind speed measurements and power performance verification. *Rüzgar Enerjisi Sempozyumu, İzmir*, 55-59.
- [247] **Smith, B., Link, H., Randall, G., & McCoy, T. (2002).** Applicability of nacelle anemometer measurements for use in turbine power performance tests. *Proceedings of the American Wind Energy Association (AWEA) WINDPOWER 2002.*
- [248] **Antoniou, I., & Pedersen, T. F. (1997).** *Nacelle Anemometry on a 1MW Wind Turbine: Comparing the power performance results by use of the nacelle or mast anemometer.*
- [249] **Morgan, E. C., Lackner, M., Vogel, R. M., & Baise, L. G. (2011).** Probability distributions for offshore wind speeds. *Energy Conversion and Management*, 52(1), 15-26.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Seyit Ahmet AKDAĞ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : İ.T.Ü, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği
- **Yükseklisans** : İ.T.Ü, Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı, Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Akdağ, S. A.,** Bagiorgas, H. S., & Mihalakakou, G. (2010). Use of two-component Weibull mixtures in the analysis of wind speed in the Eastern Mediterranean. *Applied Energy*, 87(8), 2566-2573.
- **Akdağ, S. A.,** & Güler, Ö. (2011). A comparison of wind turbine power curve models. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 33(24), 2257-2263.199
- Güler, Ö., Güzel, S., & **Akdağ, S.A** (2014) Comparison of Wind Energy Software Packages, 7th International Conference on Sustainable Energy & Environment Prote, Dubai, UAE, 23.11.2014 - 25
- **Akdağ, S. A.,** & Güler, Ö. (2015). A novel energy pattern factor method for wind speed distribution parameter estimation. *Energy Conversion and Management*, 106, 1124-1133.
- **Akdağ, S. A.,** & Güler, Ö. (2018). Alternative Moment Method for wind energy potential and turbine energy output estimation. *Renewable Energy*, 120, 69-77.

