



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

**Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**ENERJİ SİSTEMLERİNDE RÜZGAR HIZI MODELLEMESİ İÇİN
GELİŞTİRİLEN FİNSLER GEOMETRİSİ TABANLI YENİ BİR
YAKLAŞIM ANALİZİ VE UYGULAMASI**

**Emrah DOKUR
Doktora Tezi**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mehmet KURBAN**

**Tez İkinci Danışmanı
Yrd. Doç. Dr. Salim CEYHAN**

**BİLECİK, 2017
Ref. No.: 10151807**



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

**Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**ENERJİ SİSTEMLERİNDE RÜZGAR HIZI MODELLEMESİ İÇİN
GELİŞTİRİLEN FİNSLER GEOMETRİSİ TABANLI YENİ BİR
YAKLAŞIM ANALİZİ VE UYGULAMASI**

**Emrah DOKUR
Doktora Tezi**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mehmet KURBAN**

**Tez İkinci Danışmanı
Yrd. Doç. Dr. Salim CEYHAN**

BİLECİK, 2017



BİLECİK ŞEYH EDEBALI UNIVERSITY

**Graduate School of Sciences
Department of Energy Systems Engineering**

**ANALYSIS AND APPLICATION OF A NOVEL APPROACH
BASED ON FINSLER GEOMETRY FOR WIND SPEED
MODELLING IN ENERGY SYSTEMS**

**Emrah DOKUR
PhD Thesis**

**Thesis Advisor
Prof. Dr. Mehmet KURBAN**

**Thesis Second Advisor
Asist. Prof. Dr. Salim CEYHAN**

BİLECİK, 2017



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOKTORA
JÜRİ ONAY FORMU**

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun 24 Mayıs 2017 tarih ve 27 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 15 Haziran 2017 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Emrah DOKUR' un "Enerji Sistemlerinde Rüzgar Hızı Modellemesi İçin Geliştirilen Finsler Geometrisi Tabanlı Yeni Bir Yaklaşım Analizi Ve Uygulaması" başlıklı tez çalışması Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak oy birliği/ oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE (TEZ DANIŞMANI): Prof. Dr. Mehmet KURBAN

ÜYE : Prof. Dr. Önder GÜLER

ÜYE : Doç. Dr. Yüksel OĞUZ

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Serpil TÜRKYILMAZ

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Ümit Çiğdem TURHAL

ONAY

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../.....tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

TEŞEKKÜR

Çalışmamda yardımlarını ve hoşgörüsünü benden esirgemeyen danışman hocalarım Prof. Dr. Mehmet KURBAN, Yrd. Doç. Dr. Salim CEYHAN' a ve hayatımın her aşamasında yanımda bulunan eşim Gülay DOKUR' a ve aileme teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tez döneminde bilgi ve tecrübelerini paylaşan, Yrd. Doç. Dr. Mehmet KOÇ, Yrd. Doç. Dr. Gürhan ERTAŞGIN'a, Arş. Gör. Nesibe YALÇIN'a ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak teşekkürlerim, destekleri ve sevgileri için ebedi dostlarım Abdullah POLAT, Uğur BİÇİCİ, Ali KAAN ve Hüsamettin UYSAL'a dır.

Çalışmamın verilen bütün emeklere yaraşır olması ümidiyle...

Emrah DOKUR

ÖZET

Günümüzde artan enerji ihtiyacına paralel olarak üretilen enerjinin temiz ve sürdürülebilir olma hedefi, yenilenebilir enerji sistemlerine olan yönelimi hızla artırmıştır. Bu tez çalışması, yenilebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden olan rüzgar enerji sistemleri alanındaki özgün yaklaşımlı modellemeleri ve çeşitli tahmin çalışmalarını içermektedir. Çalışmanın ilk aşamasında, zaman serisi analizleri, yapay sinir ağları (YSA) ve görgül kip ayrışımı (GKA) hibrit yapay sinir ağları kullanılarak rüzgar hızı tahminleri yapılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında, Weibull dağılımı (WD) ve Rayleigh dağılımı (RD) gibi fonksiyonların yanı sıra literatürde yeni olarak önerilen Ters Weibull dağılımı (TWD) kullanılarak aylık, mevsimsel ve yıllık farklı rüzgar hızı modellemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, Riemann geometrisi tabanlı bilgi geometrisi (Information Geometry - IGM) yöntemi geliştirilip yeni bir parametre kestirim yaklaşımı ile özgün bir yöntem oluşturulmuştur. Literatürde rüzgar hızı modellenmesinde kullanılan dağılım fonksiyonlarının parametre kestirimi konusunda ilk defa uygulanan bilgi geometrisi yönteminin var olan diğer bazı yöntemlere olan üstünlükleri tartışılmıştır. Çalışmanın son bölümünde, 2-boyutlu Finsler uzaylarının metrik fonksiyonu ve bunlara ilişkin geodezikler, rüzgar hızı modellemesi gibi bir çok uygulama alanında kullanılan iki parametrelili Weibull dağılımı için elde edilmiştir. Şekil (k) ve ölçek (c) parametrelerine sahip olan Weibull olasılık dağılım fonksiyonuna Finsler geometrisi ile yeni ve farklı bir yaklaşım getirilerek, 2-boyutlu Finsler uzayında metrik tanımlaması yapılmıştır. Bu özgün yaklaşım ile iki parametrelili yeni bir dağılım fonksiyonu geliştirilip asimetrik yapılarda daha hassas modellemelerin oluşturulabilmesi sağlanmıştır. Finsler geometri tabanlı yeni yaklaşım, rüzgar hızı modellemesinde sıklıkla kullanılan diğer yöntemler ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve enerji potansiyeli analizleri açısından değerlendirilmiştir. Tezde geliştirilen model ve yöntemlerde Bilecik, Yalova, Gökçeada, Bozcaada, Sakarya, ve Bandırma bölgelerine ait saatlik değişen 2012-2016 yılları arası rüzgar verileri kullanılmıştır. Matlab ve Mathematica yazılımları kullanılarak elde edilen tüm sonuçlar tablolar ve grafikler halinde sunulmuş ve karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar Enerjisi; Finsler Geometri; Riemann Geometri; Ters Weibull; Finsler metrik.

ABSTRACT

Today, the use of renewable energy systems are increased rapidly in parallel with the growing energy demand in order to produce clean and sustainable energy. This thesis includes novel approach models and different forecasting studies in terms of wind energy systems which is one of the most important renewable energy sources. In the first stage of the study, forecasting of wind speed is performed by time series analysis, artificial neural networks (ANN), and hybrid model which is empirical mode decomposition (EMD) neural networks. In the second stage of the study, monthly, seasonal and yearly wind speed modeling are carried out using the Weibull distribution (WD), Rayleigh distribution (RD) as well as the newly proposed inverse Weibull distribution (IWD) in the literature. In this regard, Riemann geometry based Information Geometry Method (IGM) is proposed as a novel approach for estimation of parameters. The advantages of Information Geometry Method that is a novel approach parameters estimation of the distribution function for wind speed modeling are discussed with the other methods in the literature. In the last stage of the study, two-dimensional Finsler space metric function is obtained for Weibull distribution. It is used in many applications in this area such as wind speed modeling. The metric definition for two-parameter Weibull probability density function which has shape (k) and scale (c) parameters in two-dimensional Finsler space is realized using a different approach by Finsler geometry. New probability and cumulative probability density functions based on Finsler geometry are derived for more accurate modeling. The novel approach based on Finsler geometry is analyzed comparatively with other methods, which are commonly used in the wind speed model, and evaluated in respect to energy potential analysis. The models and methods in the thesis are carried out for wind data, consisting of hourly wind speed records between 2012-2016 from Bilecik, Yalova, Gökçeada, Bozcaada, Sakarya and Bandırma stations. All the discussed tables and figures are obtained by utilizing the results comparatively in the numerical computing software tools MATLAB and Mathematica.

Key Words: Wind Energy; Finsler Geometry; Riemann Geometry; Inverse Weibull Distribution; Finsler Metric.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

JÜRİ ONAY FORMU

TEŞEKKÜR

ÖZET.....i

ABSTRACTii

İÇİNDEKİLERiii

ÇİZELGELER DİZİNİ v

ŞEKİLLER DİZİNİ vi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ix

1.GİRİŞ 1

2. ENERJİ SİSTEMLERİ 6

2.1.Yenilenebilir Enerji Sistemleri 7

2.1.1.Rüzgar enerji sistemleri 8

3. ENERJİ SİSTEMLERİNDE RÜZGAR HIZI TAHMİNİ 11

3.1. Zaman Serisi Analizi ve Uygulamaları 11

3.2. Yapay Sinir Ağları Analizleri ve Uygulamaları 19

3.2. Hibrit Yaklaşım Analizleri ve Uygulamaları 26

**4.ENERJİ SİSTEMLERİNİN PLANLANMASINDA RÜZGAR HIZI
MODELLEMESİ ve ENERJİ POTANSİYELİ ANALİZLERİ 32**

4.1.İki Parametrelili Weibull Dağılımı Tabanlı Rüzgar Hızı Analizleri ve Uygulamaları
..... 32

4.2.Ters Weibull Dağılımı ile Karşılaştırmalı Rüzgar Hızı Analizleri ve
Uygulamaları 40

4.3.Riemann Geometri Tabanlı Yeni Bir Parametre Tahmin Metodunun Geliştirilmesi
..... 47

5.FİNSLER GEOMETRİ TABANLI GELİŞTİRİLEN YENİ YAKLAŞIM 55

5.1.İki Parametrelili Eğri Ailelerine İlişkin Metrik Hesaplamaları 56

5.2. İki Parametrelili Weibull Dağılımında Yeni Yaklaşım ile Finsler Metriklerinin
Belirlenmesi ve Geodeziklerin Hesabı 60

5.2.1.Durum 1: n negatif olmayan tam sayı 60

5.2.2.Durum 2: n negatif olmayan rasyonel sayı 62

5.2.Geliştirilen Finsler Geometri Tabanlı Yaklaşım ile Karşılaştırmalı Analizler ve Uygulamalar	65
6.SONUÇLAR	76
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	88

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 3.1: Orijinal serinin durağanlık test sonuçları	13
Çizelge 3.2: Model parametreleri ve test sonuçları	15
Çizelge 3.3: SARIMA modelleri için farklı parametrelerin performans metrikleri.....	18
Çizelge 3.4: Yapay sinir ağı mimarileri	23
Çizelge 3.5: Model sonuçları.....	25
Çizelge 3.6: Performans kriterlerine göre karşılaştırmalı analiz sonuçları..	30
Çizelge 4.1: Parametre tahmin yöntemlerinin örnek Bilecik verisi için karşılaştırılması	36
Çizelge 4.2: Güç yoğunlukları ve hız değerleri	37
Çizelge 4.3: Parametre tahmin yöntemlerinin mevsimsel veriler için karşılaştırılmalı sonuçları	39
Çizelge 4.4: Bölgelere ait coğrafik bilgiler ve rüzgar hızı periyotları	43
Çizelge 4.5: 3 farklı yöntem ve 6 farklı bölge için karşılaştırmalı aylık sonuçlar	45
Çizelge 4.6: Mevsimsel analiz sonuçları	46
Çizelge 4.7: Hesaplanan rüzgar güç yoğunluğu (W/m^2) ve parametre kestirim sonuçları	53
Çizelge 4.8: Aylık analiz sonuçları ve güç yoğunluk hataları (PDE).....	54
Çizelge 5.1: Ölçülen saatlik örnek zaman serisi verisinin Bozcaada Temmuz ayı için frekans dağılım biçiminde düzenlenmesi ve Weibull $f_w(v_i)$, Rayleigh $f_r(v_i)$, ve Finsler $f_f(v_i)$ fonksiyonlarından hesaplanan olasılık yoğunluk dağılımları.....	66
Çizelge 5.2: Bozcaada aylık analiz ve hata performans sonuçları.....	67
Çizelge 5.3: Gökçeada aylık analiz ve hata performans sonuçları özellikleri.....	69
Çizelge 5.4: Bilecik aylık analiz ve hata performans sonuçları özellikleri..	71

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 1.1: Kurulu rüzgar kapasitesinin dünyadaki kümülatif değişimi 2001-2016	1
Şekil 1.2: Tez iş akış planı.....	4
Şekil 2.1: 1971-2014 yılları arasında dünyadaki elektrik enerjisi üretiminin kaynaklarına göre dağılımı.. ..	6
Şekil 2.2: 2040 yılına kadar öngörülen dünyadaki elektrik enerjisi üretiminde enerji kaynaklarının payı.	7
Şekil 2.3.a: Aralık 2015 verilerine göre Dünyada kurulu rüzgar gücü kapasitesine göre ilk 10'da yer alan ülkeler (tüm yıllar bazında).....	9
Şekil 2.3.b: Dünyada kurulu rüzgar gücü kapasitesine göre ilk 10'da yer alan ülkeler (Ocak-Aralık 2015 arasında kurulan).....	9
Şekil 2.4: Türkiye'de ki rüzgar enerji sistemlerinin kümülatif kurulum değerleri	9
Şekil 2.5: Türkiye'de ki rüzgar enerji sistemlerinin illere göre dağılımı ...	10
Şekil 3.1: Zaman serisi analiz çalışmalarının akış planı.....	12
Şekil 3.2: Bilecik ili aylık ortalama rüzgar hızı verilerin yıllara göre dağılımı	13
Şekil 3.3: Orijinal serinin ACF ve PACF değişimleri	14
Şekil 3.4: Orijinal seri ve modelin zamana göre değişimi	16
Şekil 3.5: Rezidülerin değişimi.....	16
Şekil 3.6: Rezidülerin ACF ve PACF değişimi	17
Şekil 3.7: Rüzgar hızı tahmin sonuçları	17
Şekil 3.8: Basit bir sinir hücresi	19
Şekil 3.9: Temel yapay sinir ağı hücresi	20
Şekil 3.10.a: Sigmoid aktivasyon fonksiyonu.....	20
Şekil 3.10.b: Hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu.....	20
Şekil 3.10.c: Doğrusal aktivasyon fonksiyon.....	20

Şekil 3.10.d:	Adım aktivasyon fonksiyonu	20
Şekil 3.11:	Bilecik ili rüzgar hızı verisinin zamana göre değişimi	22
Şekil 3.12:	Çalışmada kullanılan kaydırmalı pencereleme (sliding window) tekniği	24
Şekil 3.13:	FFNN, 2 giriş, 1 gizli katman 2 nöron ve 1 çıkış, saatlik zaman dilimi.....	24
Şekil 3.14:	JENN , 24 giriş , 2 gizli katman 2 nöron ve 12 çıkış, yarım gün kestirimi	24
Şekil 3.15:	CFNN , 14 giriş , 1 gizli katman 2 nöron ve 7 çıkış, haftalık kestirim.....	24
Şekil 3.16:	CFNN , 60 giriş , 1 gizli katman 20 nöron ve 30 çıkış, aylık kestirim.....	24
Şekil 3.17:	Rüzgar hızı tahmin sonuçlarının normalize edilmiş rüzgar hızı verisi üzerinden örnek bir zaman dilimi için gösterimi.....	24
Şekil 3.18:	Hibrit uygulamanın akış diyagramı.....	28
Şekil 3.19:	Aylık rüzgar hızı verisi.....	28
Şekil 3.20:	GKA yöntemi ile ayrıştırılmış rüzgar hızı serileri	29
Şekil 3.21:	İleri beslemeli yapay sinir ağı ve hibrit modelin karşılaştırmalı tahmin sonuçları	31
Şekil 4.1:	Örnek bir ayın olasılık yoğunluk ve kümülatif olasılık yoğunluk fonksiyonlarının değişimi.....	37
Şekil 4.2:	Mevsimsel rüzgar hızı verilerinin Bilecik ili için olasılık dağılımları	38
Şekil 4.3:	İlkbahar ayı için olasılık ve kümülatif olasılık yoğunluk dağılımları	40
Şekil 4.4:	Rüzgar hızı verilerinin analizinde kullanılan bölgeler	42
Şekil 4.5:	Ortalama rüzgar hızı değerlerinin aylık değişimleri.....	43
Şekil 4.6:	IGM akış diyagramı	52
Şekil 4.7:	IGM metoduna göre k ve c geodeziklerinin değişimi	52
Şekil 5.1:	Yeni fonksiyon ile Weibull fonksiyonun farklı n değerleri için karşılaştırılması	64

Şekil 5.2:	Bozcaada örnek aylar için dağılım fonksiyonlarının grafiksel değişimi	68
Şekil 5.3:	Gökçeada örnek aylar için dağılım fonksiyonlarının grafiksel değişimi	70
Şekil 5.4:	Modellerin enerji yoğunluğu yüzde hata değerleri	74

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

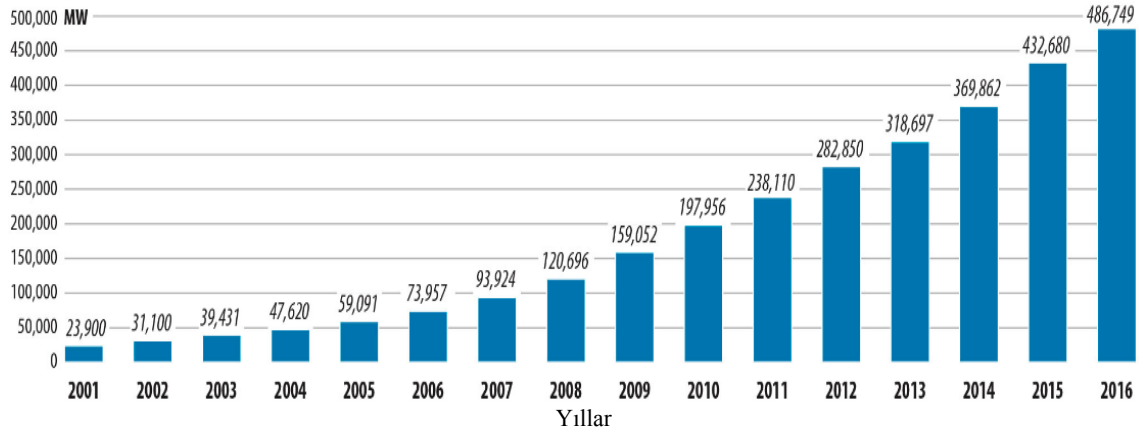
Simgeler	Açıklama
MW	:Mega watt
t	: Zaman
kW	: Kilo watt
M.Ö.	: Milattan önce
ρ	: Hava yoğunluğu
Γ	: Gamma fonksiyonu
A	: Türbin süpürme alanı
k	: Şekil parametresi
c	: Ölçek parametresi
m^2	: Metrekare
m^3	: Metreküp
E_{pf}	: Enerji örüntü faktörü
σ	: Standart sapma
P_w	: Weibull güç yoğunluğu
V_m	: Ortalama rüzgar hızı
V_{maks}	: Maksimum rüzgar hızı
V_{mod}	: En sık görülen rüzgar hızı
Θ	: Mevsimsel hareketli ortalama katsayısı
γ	: Euler gamma
f_w	: Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu
f_r	: Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu
f_f	: Finsler olasılık yoğunluk fonksiyonu
F^2	: Finsler uzayı
P_{ort}	: Ortalama rüzgar gücü

P_{Finsler}	: Finsler güç yoğunluğu
P_{ref}	: Referans güç yoğunluğu
P_r	: Rayleigh güç yoğunluğu
C_1, C_2	: Finsler parametreleri
L	: Metrik fonksiyon
G	: Spray katsayıları
A	: Rashevsky formundaki ilişkili temel fonksiyon
g_{ij}	: Temel metrik tensörü
x, y, p, q	: Yerel koordinatlar
ε	: Hata değeri
S	: Olasılık dağılım ailesinin istatistiksel manifoldları
ℓ	: Log-likelihood fonksiyonu
Γ_{jk}^i	: Christoffel sembolleri
$E_{x/\zeta}$	: Beklenen değer
$G(k, c)$	: Fisher bilgi matrisi
%	: Yüzde
Φ	: Mevsimsel otoregresif süreç katsayısı
θ	: Hareketli ortalamalar katsayısı
$f(v)$	: Olasılık yoğunluk fonksiyonu
$F(v)$	: Kümülatif olasılık yoğunluk fonksiyonu
$R(n)$	: Artık sinyal
b	: Aktivasyon fonksiyonunun eşik değeri
y	: Gerçek değer
$\hat{y}$	: Tahmin değeri

Kısaltmalar	Açıklama
SARIMA	:Mevsimsel bütünleştirilmiş otoregresif hareketli ortalama
JENN	: Jordan elman yapay sinir ağı
FFNN	: İleri beslemeli yapay sinir ağı
CFNN	: Kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağı
ADF	: Augmented dickey–fuller
PP	: Phillips-perron
KPSS	: Kwiatkowski-phillips-schmidt-shin
ACF	:Otokorelasyon fonksiyonu
PACF	: Kısmi otokorelasyon fonksiyonu
RMSE	: Hataların karesinin ortalamasının kare kökü
MSE	: Hataların karesinin ortalaması
MAE	:Hataların mutlak değerinin ortalaması
SSE	: Hataların karesinin toplamı
MAPE	: Hataların mutlak değerinin ortalama yüzdesi
YSA	: Yapay sinir ağları
GKA	: Görgül kip ayrışımı
ÖKF	: Öz kip fonksiyonları
GM	: Grafik metodu
EYO	: En yüksek olabilirlik metodu
MJ	: Justus metodu
ML	: Lysen metodu
TWD	: Ters weibull dağılımı
RD	: Rayleigh dağılımı
IGM	:Bilgi geometrisi metodu
PDM	: Güç yoğunluğu metodu
PDE	: Güç yoğunluğu hatası
WD	: Weibull dağılımı

1.GİRİŞ

Enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılan fosil yakıtların zararlı etkileri sebebiyle, dünyada yeni enerji kaynakları arayışına gidilmekte ve bu kapsamda yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi hızla artış göstermektedir. Dünya enerji kaynaklarının yaklaşık %80'ini teşkil eden petrol, kömür, doğalgaz vb. kaynakların ciddi bir azalma göstermesi yenilenebilir enerji kaynakları ile enerji üretim yöntemlerine yönelimi artırmaktadır (IEA Key World Energy Statistics, 2016). Günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları arasında en yaygın olarak kullanılan enerji dönüşüm sistemlerinden biri de rüzgar enerji sistemleridir. 2001 yılından günümüze kadar kurulan rüzgar enerjisi dönüştürme sistemlerine ait kurulu güç değerlerinin kümülatif değişimi Şekil 1.1'de gösterilmektedir (GWEC, 2016).



Şekil 1.1. Kurulu rüzgar kapasitesinin dünyada ki kümülatif değişimi 2001-2016 (GWEC, 2016).

Günümüz dünyasında 2016 yılı sonu itibariyle 486.749 MW'lara ulaşan kurulu rüzgar gücü kapasitesinin üstünlüklerinin yanı sıra en büyük avantajları arasında süreksizliği, kararsızlığı ve asimetrik bir yapıda var olması sayılabilir. Zamanla değişen yük talebi sebebiyle, elektrik enerjisi üreten rüzgar enerjisi güç sistemlerinin tasarımı, işletilmesi ve analizi oldukça önem arz etmektedir. Bu kapsamda rüzgar enerjisi sistemlerinde, rüzgar hızı tahmini ve modellemesi başlıklarında iki önemli kavram karşımıza çıkmaktadır. Rüzgar enerjisi dönüştürme sistemlerinin ilk kurulum maliyetinin yüksek olması sebebiyle bir bölgeye rüzgar enerjisi dönüştürme sistemi kurulmadan önce o bölgenin rüzgar hızı karakteristiğinin modellenmesi ve belirlenmesi gerekmektedir. Aynı zamanda tesis edilmiş olan rüzgar enerjisi dönüştürme sisteminde

ise yük talebini karşılamak amacıyla kısa, orta ve uzun dönemlerde şebekeye aktarabileceği güç miktarı, kararsız bir yapıya sahip olan rüzgar hızının hassas bir şekilde tahmin edilebilmesine bağlıdır. Rüzgar hızının modellenmesi ve tahmin konuları üzerine literatürde bir çok farklı yaklaşım geliştirilmiştir.

Literatürde rüzgar hızı tahmini üzerine yapılan çalışmalarda, ilk yaklaşımlar zaman serisi analizleri üzerine olmakta iken, daha sonraki yıllarda hızla akıllı sezgisel yaklaşımlar kullanılmış ve hemen sonrasında akıllı sezgisel yaklaşımlar ile diğer farklı ayrıştırma yöntemleri birlikte kullanılarak daha hassas doğruluklarda hibrit modeller tahmin metotları için geliştirilmiştir.

Cadenas ve Rivera kısa dönem rüzgar hızı tahmin analizlerini Meksika'da yer alan La Venta, Oaxaca bölgesinden alınan saatlik rüzgar hızı verileri ile yapay sinir ağları kullanarak gerçekleştirmişlerdir (Cadenas ve Rivera, 2009). Bu çalışmalarında 2 ve 3 katmanlı 3, 4, 6 ve 7 nöron sayısına sahip farklı yapay sinir ağı modelleri oluşturularak kısa dönemli tahminler yapılmıştır. Ocak ayına ait saatlik alınan 744 verinin 550 verisi eğitim, geri kalanı ise test verisi olarak seçilmiştir. Yapılan karşılaştırmalı analizlerde 2 katmanlı 3 nöronlu modelin diğer modellere göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Catalão ve arkadaşları, rüzgar gücü tahminini Portekiz verileri kullanarak kısa dönemli olarak gerçekleştirmişlerdir (Catalão vd., 2009). Önerilen yapay sinir ağı modeli sonuçlarına göre ortalama mutlak yüzdelik hata değerlerine bakıldığında % 7.26 hata oranı ile ortalama 5 sn'den kısa sürede hesaplanan rüzgar gücü tahminini yapmışlardır.

Moustris ve arkadaşları, güneş ve rüzgar enerji santrallerini bir arada bulunduran hibrit güç istasyonlarının optimum düzeyde çalıştırılması için yapay sinir ağlarını kullanarak 800kW'lık bir rüzgar türbinine sahip olan Yunanistan'ın Tilos adası için 24 saatlik kısa dönemli rüzgar hızı tahmini geliştirmişlerdir (Moustris vd., 2017). Yapay sinir ağının giriş verisinde geçmiş rüzgar hızı verilerini kullandıkları gibi aynı zamanda hava basıncı değerinden de yararlanmışlardır. Sonuçlar ele alındığında, tahmin yöntemlerinin otomatik bir rüzgar gücü bilgi sistemini tasarlamak için yeterli sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür.

Türkiye'de yapılan çalışmalara bakıldığında; Akinci, farklı yapay sinir ağı modelleri kullanarak Batman bölgesi için kısa dönemli rüzgar hızı tahmini

gerçekleştirirken, Nogay ve arkadaşları benzer analizler kullanarak Mardin bölgesi için çalışmalarını yapmışlardır (Akinci, 2011; Nogay, vd., 2012).

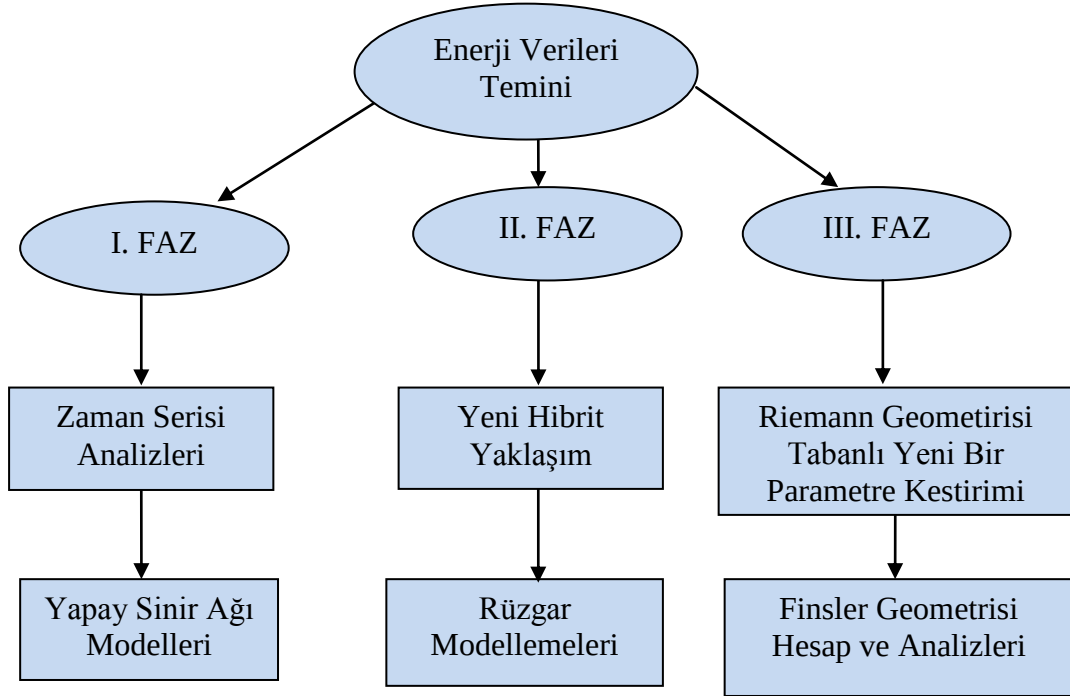
Rüzgar hızı tahmini üzerine yapılan hibrit yaklaşımlarda, zaman serisi analizleri ile farklı ayırıştırma tekniklerinin bir arada kullanılarak yapılan çalışmalar olabileceği gibi aynı zamanda yapay sinir ağları gibi akıllı sezgisel yaklaşımların yine farklı ayırıştırma teknikleri ile bir arada kullanıldığı görülmektedir (Liu, vd., 2009; Hu, vd., 2013; Shukur, vd., 2015; Wang, 2014; Liu, vd., 2012; Guo, vd., 2012)

Bir bölgenin rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesinde önemli bir etken olan rüzgar hızı modellemesi üzerine yapılan çalışmalarda ise iki parametrelili Weibull dağılım fonksiyonunun literatürde en sık kullanılan modeller arasında yer aldığı görülmektedir (Baseer, vd., 2017; Bassyouni, vd., 2015; Akdağ ve Güler, 2010; Celik, 2003; Akdağ ve Güler, 2009; Kurban, 2007; Kantar, 2011). Rüzgar hızının doğru modellenebilmesi için Log-normal dağılımı (Garcia, vd., 1998; Luna ve Church, 1974; Justus vd., 1976; Kiss ve Janosil, 2008), ters Gauss dağılımı (Brano, vd., 2011; Bardsley, 1980), iki parametrelili Gamma dağılımı (Morgan, 2011; Kaminsky, 1977; Sherlock, 1951), hibrit dağılımlar (Kollu, vd., 2012; Takle, 1978; Jaramillo ve Borja, 2004; Rosen vd., 1999), Burr dağılımı (Zaharim vd., 2009), üç parametrelili Weibull dağılımı (Carta vd., 2009; Van der Auwera, vd., 1980), Weibull dağılımının özel bir formu olan Rayleigh dağılımı (Sharma ve Ahmed, 2016; Pishgar-Komleh, vd., 2015), 2016 yılında önerilen ters Weibull dağılımı (Akgül, vd., 2016) ve benzer dağılım fonksiyonları rüzgar enerjisi dönüştürme sistemi çalışmalarında önerilmiş ve kullanılmıştır.

Doğru ve hassas bir model yapısının geliştirilebilmesi amacı ile yeni bir dağılım fonksiyonu yapısının belirlenmesi farklı bölgelere ait rüzgar hızı modellemesinde önem teşkil etmektedir. Rüzgar hızı ve benzeri dağılımların simetrik olmayan ve kararsız bir karaktere sahip olması modelleme konusunda da birçok zorluğu beraberinde getirmektedir. Bu kapsamda tez çalışmasının da ana kısmını oluşturan Finsler geometrisi, asimetrik ve/veya izotropik olmayan fiziksel olguları modellemek için en iyi bilinen Riemann geometrisine göre çok daha güçlü bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır (Markvorsen, 2016; Antonelli, vd., 2003; Yajima ve Nagahama, 2015; Bao, vd., 2004). Geodezikleri iki parametrelili eğri ailesi olan iki boyutlu bir Finsler uzayında,

Finsler metrik fonksiyonu Matsumoto tarafından elde edilmiştir (Matsumoto, 1989,1994,1995).

Bu tez çalışması kapsamında üç ayrı fazda analizler planlanmıştır. Bu üç ayrı faz ana iki temel konu üzerinde yoğunlaşarak ayrılmıştır (Şekil 1.2). Bu iki temel konu Bölüm 3'de verilen rüzgar hızı tahmini ve Bölüm 4 ve 5' de sunulan bir bölgenin rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan rüzgar hızı modelleridir.



Şekil 1.2. Tez iş akış planı.

Fazın ilk aşamasında, elde edilen rüzgar hızı verileri ile öncelikli olarak mevsimsel bütünleştirilmiş otoregresif hareketli ortalama (SARIMA) modeli kullanılarak zaman serisi analizleri gerçekleştirilmiş ve farklı SARIMA modelleri ile karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. İstatistiksel testler ile de modelin uygunluğu gösterilmiştir. Yine aynı faz hedefi doğrultusunda, Jordan/Elman(JENN), Kaskat (CFNN) ve İleri beslemeli (FFNN) yapay sinir ağları kullanılarak saatlik, günlük, haftalık ve aylık rüzgar hızı tahminleri gerçekleştirilmiştir.

İkinci faz çalışmaları doğrultusunda ise görgül kip ayrıştırma tekniği kullanılarak yapay sinir ağları ile hibrit yaklaşımlar oluşturup kısa dönemli rüzgar hızı tahminleri gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak, 2016 yılında Akgül ve arkadaşları tarafından mevsimsel analizde önerilen ters Weibull dağılımının da içerisinde olduğu

farklı yöntemler kullanılarak sadece mevsimsel değil aylık ve yıllık rüzgar hızı analizleri gerçekleştirilmiştir.

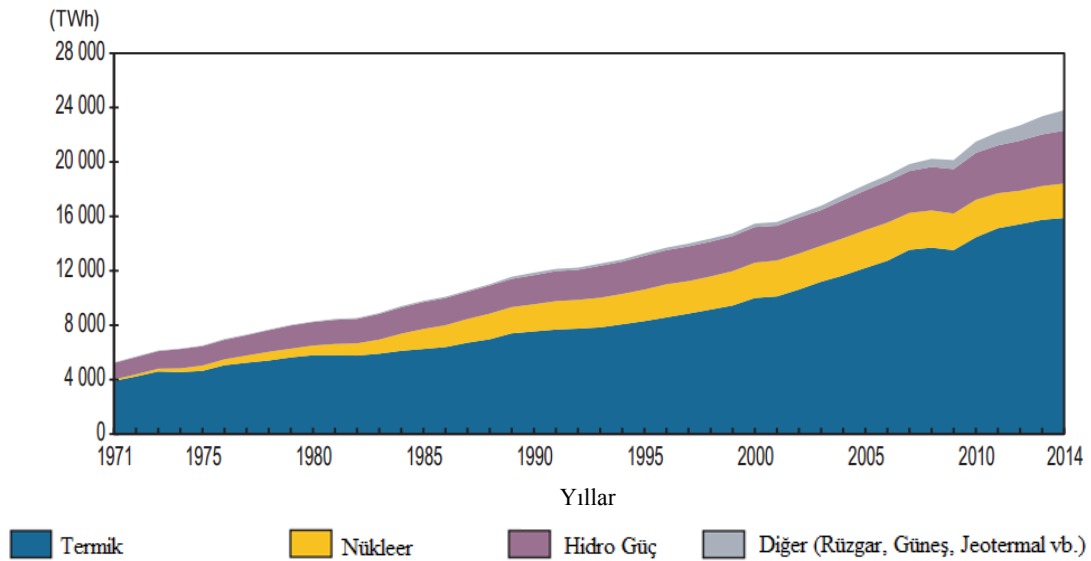
Üçüncü faz çalışmaları doğrultusunda rüzgar hızı modellenmesinde sıklıkla kullanılan iki parametrelili Weibull dağılımı için Riemann uzayında bilgi geometrisi tabanlı yeni bir parametre kestirim yöntemi geliştirilmiştir. Aynı faz çalışmaları doğrultusunda 2-boyutlu Finsler uzaylarının metrik fonksiyonu, rüzgar hızı modellemesi gibi bir çok uygulama alanında kullanılan iki parametrelili Weibull dağılımı için elde edilmiştir. Şekil (k) ve ölçek (c) parametrelerine sahip olan Weibull olasılık dağılım fonksiyonuna Finsler geometrisi ile farklı bir yaklaşım getirilerek 2-boyutlu Finsler uzayında metrik tanımlaması gerçekleştirilmiştir. Gelecek çalışmalara ışık tutması açısından bu yeni yaklaşım ile özellikle bir bölgenin rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesinde daha hassas modellerin oluşturulabilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda Finsler geometri tabanlı analizler rüzgar hızı modellemesinde sıklıkla kullanılan diğer metotlar ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve enerji potansiyel analizleri yapılarak sunulmuştur.

Bu tez çalışması kapsamında İkinci Bölümde genel olarak enerji sistemleri hakkında bilgiler verilip yenilenebilir enerji sistemleri arasında yer alan rüzgar enerjisi hakkında tanımlamalar sunulmuştur. Tezin Üçüncü Bölümünde, birinci fazda ve ikinci fazın başında yapılan rüzgar hızı tahmin metotları sunulmuştur. Dördüncü Bölümde ise analiz edilen rüzgar hızı modellemeleri sunularak, Riemann geometrisi tabanlı geliştirilen yeni bir parametre tahmin yöntemi ele alınmıştır. Beşinci Bölümde iki parametrelili eğri ailesi için negatif olmayan reel sayılarda tanımlı farklı n parametrelerine bağlı çeşitli Finsler metrikleri elde edilmiştir. Elde edilen Finsler metriklerine ait geodeziklerin hesabı ve yeni iki parametrelili olasılık ve kümülatif olasılık yoğunluk fonksiyonları, seçilen negatif olmayan farklı n reel sayı değerleri için karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır. İki parametrelili eğri aileleri için Finsler metriğinin elde edilmesi adım adım gösterilmiş olup iki parametrelili eğri ailesine sahip olan Weibull dağılımı için tanımlamalar yapılmıştır. Bu bölümün sonunda ise negatif olmayan farklı n değerleri için iki parametrelili Weibull dağılım fonksiyonu eğri ailelerine ait Finsler metrikleri ve onların geodeziklerine ilişkin hesaplamalar karşılaştırmalı analizler ve uygulamalar üzerinden yorumlanmıştır.

2. ENERJİ SİSTEMLERİ

Günümüzde enerji hayatımızın vazgeçilmez bir parçası olarak karşımıza çıkmaktadır. Hayatımızın hemen hemen her alanında karşımıza çıkan enerji kavramı fizikte, iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanmıştır. Enerji sistemi ise, enerjinin veya enerji faydalarının gereken yere gerektiği zamanda arz miktarı kadarıyla bir iletim ve dağıtım ağı üzerinden ulaştırılabilmesi olarak tanımlanmıştır (Bilgiç, 2016). Enerji arz sektörü ve enerji son kullanım teknolojilerinden oluşan enerji sistemlerinin amacı, müşterilere enerjinin faydalarını kararlı ve kaliteli olarak iletmektir.

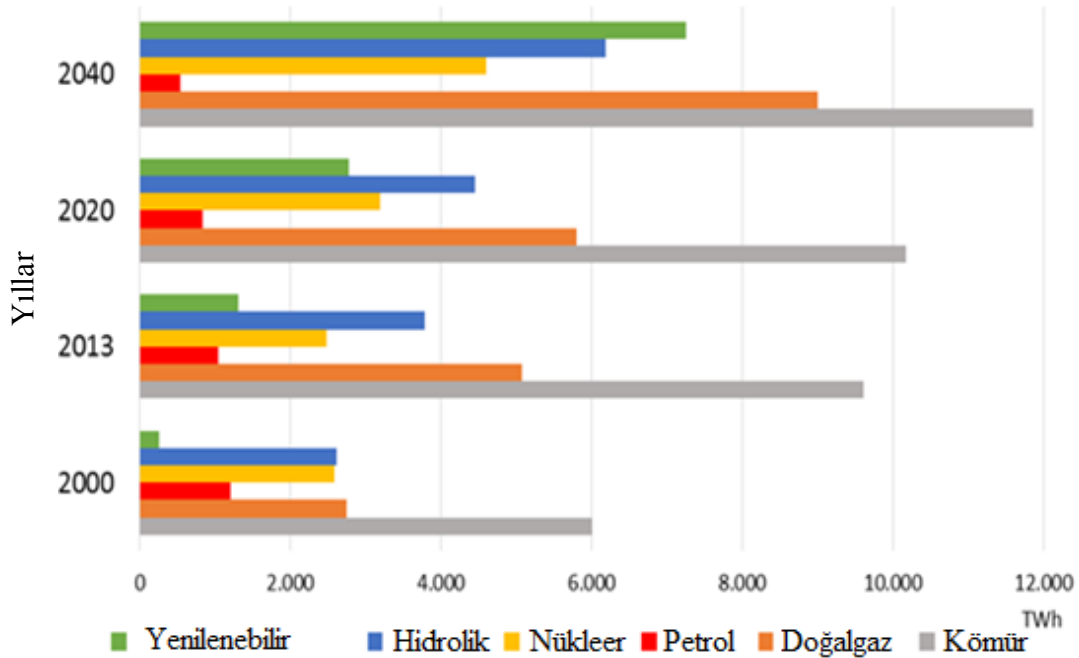
Enerji kaynaklarının kullanımına göre elektrik enerji üretimini konvansiyonellik ve yenilenebilirlik açısından sınıflandırmak mümkündür. 1971-2014 yılları arasında dünyada elektrik üretiminin enerji kaynaklarına göre dağılımı Şekil 2.1'de gösterilmiştir (IEA Key World Energy Statistics, 2016). Konvansiyonel enerji kaynakları, yaygın olarak kullanılan petrol, odun, kömür, doğalgaz vb. fosil yakıtlar olabileceği gibi toryum, uranyum gibi parçalanabilen yakıtlar olarak da ele alabiliriz. Yenilenemeyen enerji kaynakları olarak da ifade edilen bu enerji kaynakları her ne kadar hayvan ve bitki artıkları ile tekrar dönüşüp fosil yakıtları oluştursalar da uzun yıllar gerektiren bu dönüşümleri sebebiyle konvansiyonel enerji kaynakları olarak ifade edilirler. Diğer bir enerji sisteminde kullanılan enerji kaynağı ise bu tez çalışmasının da ana konusunu içeren yenilenebilir enerji kaynaklarıdır.



Şekil 2.1. 1971-2014 yılları arasında dünyadaki elektrik enerjisi üretiminin kaynaklarına göre dağılımı.

2.1.Yenilenebilir Enerji Sistemleri

Günümüzde hızla artan enerji ihtiyacına paralel olarak konvansiyonel enerji kaynaklarının ekosistem üzerinde ki olumsuz etkilerinden ötürü, elektrik enerjisi talebinin karşılanmasında yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarının kullanımı önem kazanmıştır. Yenilenebilir enerji sistemleri, kullanılan enerji kaynaklarına göre rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, jeotermal enerji, hidrolik enerji ve biyoyakıt enerjileri olarak sınıflandırılabilir. Yeni politika senaryoları da dikkate alındığında dünya elektrik üretiminde enerji kaynaklarının payları Şekil 2.2'de gösterilmiştir (IEA Key World Energy Statistics, 2016). Şekil 2.2'den de görüldüğü gibi kullanımı en çok azalan enerji kaynağı petrol olmasına karşın yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı yıllara göre artış göstermektedir. Şekil 2.2'den de görüleceği üzere konvansiyonel enerji kaynakları arasında yer alan nükleer, kömür ve doğalgazında kullanımının da yıllara göre artış göstereceği raporlanmıştır.



Şekil 2.2. 2040 yılına kadar öngörülen dünyadaki elektrik enerjisi üretiminde enerji kaynaklarının payı.

Günümüzde yenilenebilir enerji sistemlerinin arasında en sık kullanılan enerji kaynakları rüzgar ve güneş enerji sistemleridir. Bu tez çalışması kapsamına konu olan yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan rüzgar enerjisi bir sonraki bölümde ele alınacaktır.

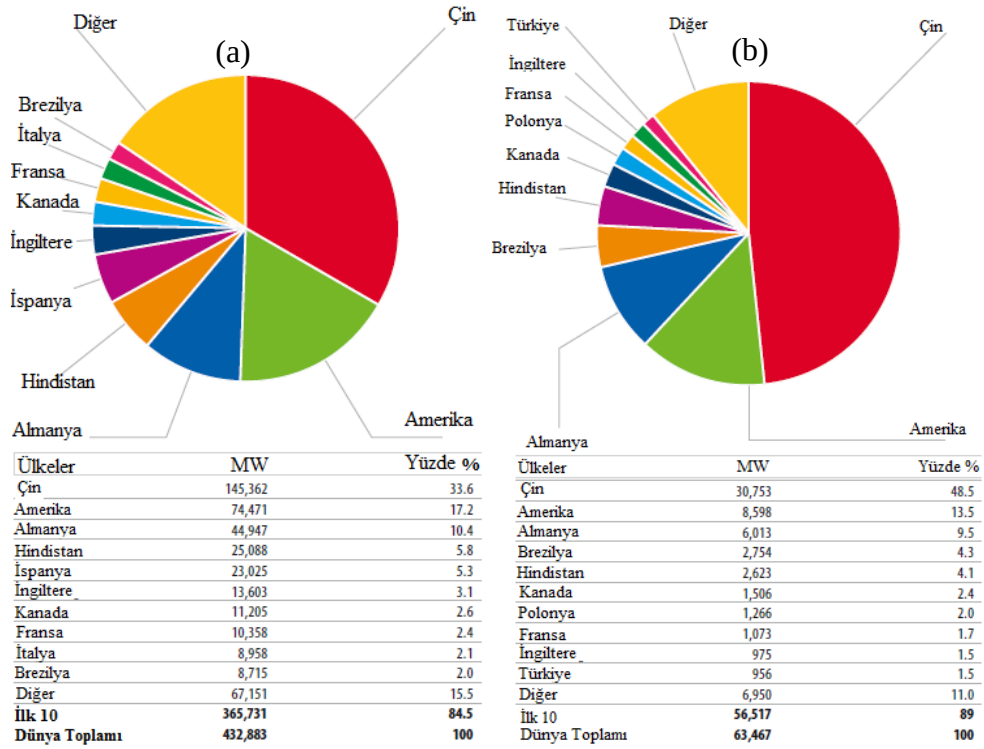
2.1.1.Rüzgar enerji sistemleri

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan rüzgar enerjisi kaynağını güneşten alan bir enerji türüdür. Belirli bir zaman aralığında dünyanın bir kısmı güneş tarafından ısıtılırken, büyük hava kütleleri yoğunluğu düşen havanın sebep olduğu düşük basınç bölgelerine doğru yönelir. Bu yönelme hareketi rüzgar adı verilen doğa olayına sebep olur. Güneşten gelen yaklaşık % 1-2'lik enerji rüzgar enerjisine dönüşürken bu değer yaklaşık 1.26×10^9 MW'lık bir enerjiye karşılık gelir ki bu dünya enerji tüketiminin yaklaşık 20 katından daha fazladır (Öğüt, 2014). Teoride dünya enerji ihtiyacının sadece rüzgar enerjisi ile sağlanabileceği bu açıdan düşünülse de, günümüzde gerek kararlılık problemleri gerekse enerji sistemlerinde ki üretim verimlilikleri buna olanak sağlayamamaktadır.

Rüzgar enerjisinin kullanımı M.Ö. 5000'li yıllara dayansa da elektrik enerjisi üretimi amacıyla ilk kez 1881 yılında Danimarka'da kullanılmıştır. İlk kullanım döneminde yeterli güvenin olmaması sebebiyle, artan enerji ihtiyacına paralel olarak 1920'lerin sonunda kullanımı azalırken, 2. Dünya savaşının ardından aerodinamik teknolojisinin gelişmesiyle rüzgar türbinlerinden elektrik enerjisinin elde edilerek kullanımı tekrar önem kazanmıştır. İlerleyen yıllarda yaşanan petrol krizleri ve ülkelerin özkaynaklarının kullanımının önemi rüzgar enerjisi üzerine yapılan çalışmaları hızla arttırmıştır (Akdağ, 2008).

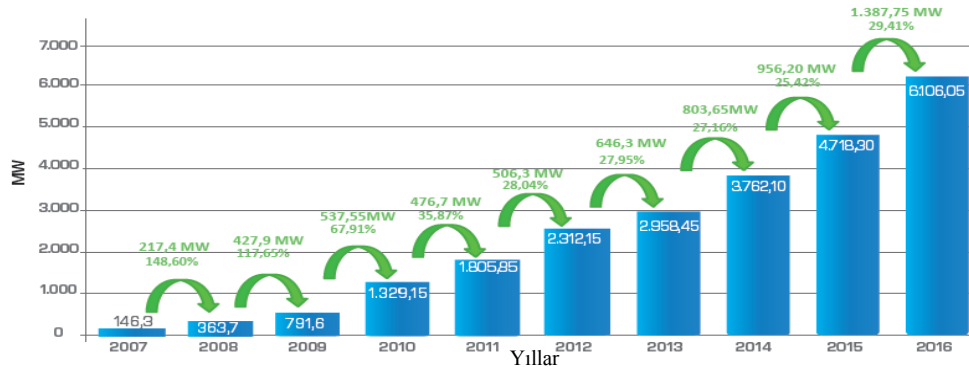
Günümüzde artan elektrik enerjisi talebi ile birlikte rüzgar enerji sistemlerinin kullanımını hızla artırmaktadır. Dünyada Aralık 2015 verilerine göre toplam kurulu rüzgar gücü kapasitesine sahip ilk 10 ülke ve dünyada ki payları Şekil 2.3'de verilmiştir (GWEC, 2016). Şekil 2.3.(a)'dan da görüleceği gibi Çin ve Amerika toplam % 50.8'lik pay ile dünyada en çok rüzgar enerji sistemine sahip ülkelerdir. İlk 10'da yer alan ülkelerin dünya ülkeleri arasında % 84.5 gibi büyük bir paya sahip olduğu da ayrıca görülmektedir.

İstatistiklerde, 2015 Ocak ve Aralık ayları arasında dünyada kurulan rüzgar enerji sistemleri arasında yaklaşık 956 MW kurulu güç kapasitesi ile Türkiye'de ilk 10'da yer almaktadır. Şekil 2.3 (b) 'den de görüleceği gibi, Çin ve Amerika yine toplam kurulu rüzgar enerjisi sisteminde olduğu gibi, sadece 2015'de de kurulan rüzgar enerji sistemleri açısından da dünyanın % 62'sini oluşturmaktadır.



Şekil 2.3. Aralık 2015 verilerine göre Dünyada kurulu rüzgar gücü kapasitesine göre ilk 10'da yer alan ülkeler (a) Tüm yıllar (b) Ocak-Aralık 2015 arasında kurulan.

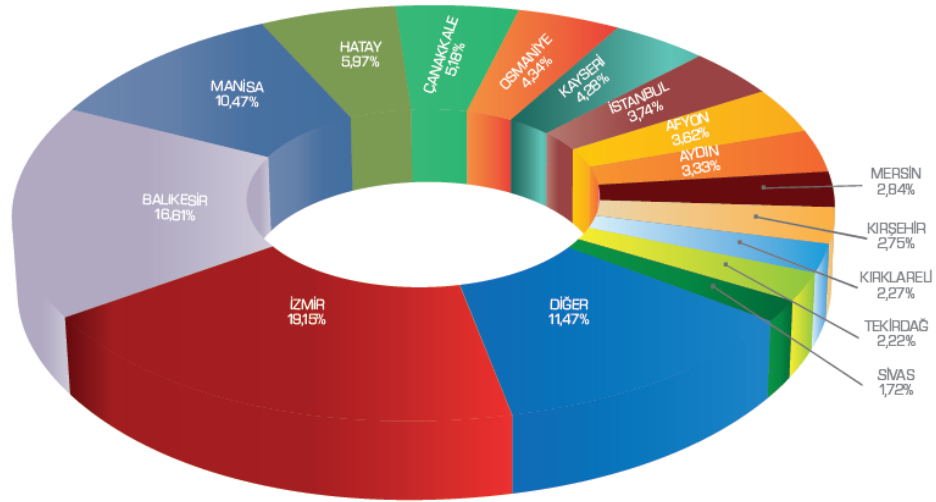
Ülkemizde kurulu rüzgar gücünün yıllara göre kümülatif değişimi Şekil 2.4'de gösterilmiştir. 2007-2016 yılları arasında kurulan rüzgar enerji sistemleri ele alındığında, 2011 yılı hariç tüm yıllar için artan bir yatırım profili olduğu görülmektedir. Özellikle 2016 yılında yapılan 1387.75 MW'lık rüzgar enerji sistemleri kurulumu ile ülkemizde toplam 6106.05 MW'lık bir rüzgar enerji sistemi kurulu gücü yer aldığı görülmektedir.



Şekil 2.4. Türkiye'de ki rüzgar enerji sistemlerinin kümülatif kurulum değerleri

Ülkemizde kurulan rüzgar enerji sistemlerinin illere göre dağılımı Şekil 2.5'de gösterilmiştir (Tureb, 2017). Ocak 2017 verilerine göre işletmede ki rüzgar enerji sistemleri ele alındığında 1169.4 MW kurulu güç kapasitesi ile İzmir ülkemizde en fazla rüzgar enerjisi dönüştürme sistemini barındıran ilimiz olarak yer almaktadır.

Bölgeler bazında, Ege ve Marmara bölgelerinin sahip olduğu rüzgar enerji sistemi ülke genelinde % 73.41'ini barındırmaktadır. Ege ve Marmara bölgeleri sırasıyla 2376.35 MW ve 2105.7 MW kurulu rüzgar enerji sistemine sahipken bu bölgeleri sırasıyla 888.7 MW ve 534.9 MW değerler ile Akdeniz ve İç Anadolu bölgeleri büyük bir fark ile takip etmektedir.



Şekil 2.5. Türkiye'de ki rüzgar enerji sistemlerinin illere göre dağılımı.

Dünya'da ve Türkiye'deki rüzgar enerji sistemlerine bakıldığında hızla artan bir kurulu güç sisteminin varlığından söz edilebilir. Bu artan talep ile birlikte rüzgar enerji sistemleri üzerine yapılan çalışmalar gittikçe hız kazanmaktadır. Bu çalışmalar kapsamında da bazı önemli kavramlar karşımıza çıkmaktadır. Bunlardan ilki, bir bölgeye rüzgar enerjisi dönüştürme sistemi kurulmadan önce o bölgenin rüzgar hızı karakteristiğinin belirlenmesi ve modellenmesi iken diğer bir konu, rüzgar enerjisinden elde edilen elektrik enerjisinin kısa, orta ve uzun dönemde ne kadarlık bir değerde şebekeye güç sağlayabileceğidir. Üçüncü bir kavram ise şebeke altyapısının bu sistemlerden elde edilecek elektrik enerjisine olan uygunluğudur. Bu tez çalışması kapsamında da ele alınacak ilk iki kavram bir sonraki bölümlerde uygulamalı olarak sunulacaktır.

3.ENERJİ SİSTEMLERİNDE RÜZGAR HIZI TAHMİNİ

Rüzgar enerjisi sistemlerinden elektrik enerjisi üretimi, asimetrik yapıdaki değişken rüzgar hızına ve meteorolojik şartlara bağlıdır. Enterkonnekte sistemin üretim planlaması ve güç sisteminin yönetimi açısından rüzgar enerji sistemlerinden üretilen elektrik enerjisinin anlık, kısa, orta ve uzun ölçekte tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple en az hata oranı ile rüzgar hızının gelecek bir zaman dilimi içerisinde farklı zaman ölçeklerinde tahmin edilmesi gerekmektedir.

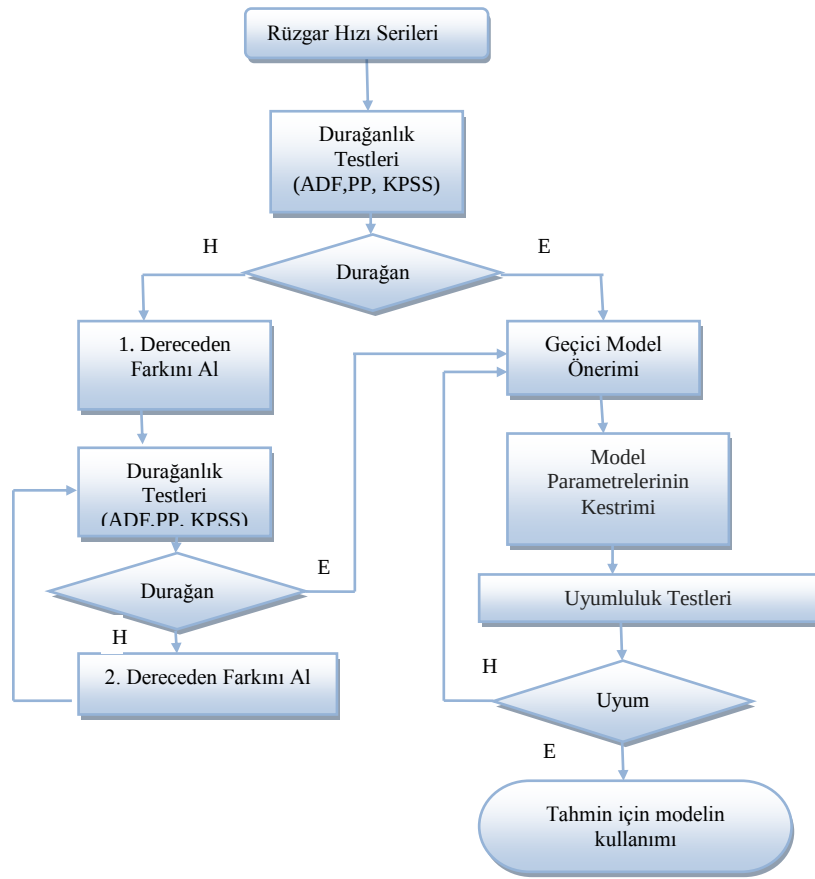
Anlık tahminler rüzgar türbin kontrolü için kullanılan ve bir kaç dakika için yapılan tahminleri içerirken, çok kısa süreli tahminler 0-6 saat arası için yapılan ve güç sisteminin yönetimi için kullanılan tahminlerdir. 0-72 saat arası yapılan tahminler ise üretim planlaması ve enerji borsası için kullanılan kısa süreli tahminleri içerir. 0-7 gün veya daha fazla zaman aralıklarında yapılan orta ve uzun süreli tahminler ise bakım onarım planlaması amacıyla yapılmaktadır.

Üretim planlaması ve güç sistem yönetimi açısından önemli bir faktör olan rüzgar hızı tahmini için Bölüm 1'de de ele alınan bir çok farklı yöntem geliştirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında da örnek uygulamalar üzerinden önce zaman serisi analizleri kullanıp, daha sonra akıllı sezgisel yaklaşımlardan yapay sinir ağları kullanılarak rüzgar hızı tahmin analizleri ayrı periyotlar için gerçekleştirilmiştir. Bu bölümün son kısmında ise hibrit yaklaşımlar kullanılarak rüzgar hızı tahmin sonuçları karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır.

3.1. Zaman Serisi Analizi ve Uygulamaları

Tezin birinci fazında hedeflenen çalışmalar doğrultusunda yer alan, zaman serisi analizleri kapsamında, aylık ortalama rüzgar hızı verilerinin, mevsimsel bütünleştirilmiş otoregresif hareketli ortalama (Seasonal Auto-Regressive Integrated Moving Average-SARIMA) modelleri ve farklı istatistiksel testler ile analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın akış diyagramı Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Akış diyagramından da görüleceği gibi öncelikli olarak serinin durağan olup olmadığına dair birim kök testleri uygulanmıştır. Seri durağan ise geçici model önerimine geçilmiş ve sonrasında model parametreleri belirlenerek uyumluluk testleri yapılmış, test sonuçlarına göre de modelin tahminde kullanımı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1. Zaman serisi analiz çalışmalarının akış planı.

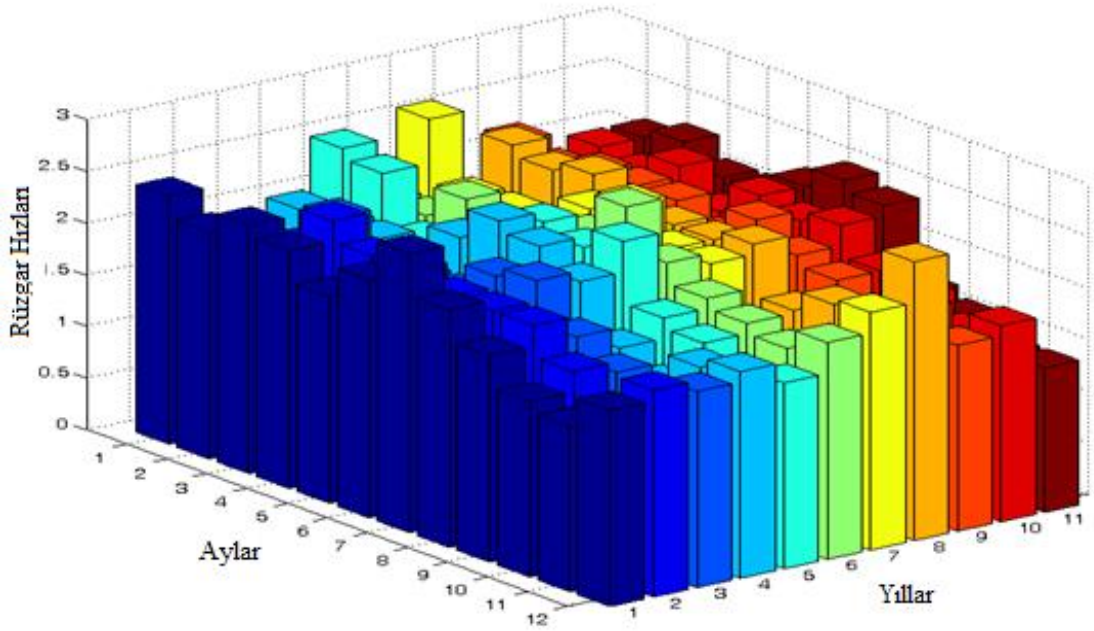
Serinin durağan olmaması durumunda ise serinin 1. dereceden farkı alınarak tekrar durağan olup olmadığına bakılır. Durağan ise tekrar birinci adımda tekrarlanan akış planı takip edilerek modelin tahmin için kullanımına geçilir. Şayet seri hala durağan değil ise, 2. dereceden farkı alınarak işlem aynı döngü sırasında takip edilir.

Tez çalışmasında mevsimsel bütünleştirilmiş otoregresif hareketli ortalama (SARIMA) modelleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Literatürde zaman serisi modellerinin gösterimi ile ilgili birçok farklı yapı mevcuttur. Seasonal ARIMA(p,d,q)(P,D,Q)_s (SARIMA) modellerinin genel gösterimi Denklem 3.1'de sunulmuştur.

$$\begin{aligned}
 (1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p)(1 - \Phi_1 B^s - \Phi_2 B^{2s} - \dots - \Phi_P B^{Ps})(1 - B)^d (1 - B^s)^D Y_t = \\
 (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q)(1 - \Theta_1 B - \Theta_2 B^2 - \dots - \Theta_Q B^{Qs}) \varepsilon_t
 \end{aligned}
 \quad (3.1)$$

Burada değişkenler $AR = \phi$, $B = \text{Lag operatörü}$, $SAR = \Phi$, $MA = \theta$, $SMA = \Theta$, $\varepsilon_t = \text{Hata}$ olarak tanımlanmıştır.

Rüzgar hızı verileri olarak Bilecik iline ait, 10 m yükseklikte ölçülen, 11 yıllık periyottaki rüzgar hızı serisi kullanılmıştır. Şekil 3.2'de verilen Bilecik ili rüzgar hızı profiline bakıldığında bölgenin düşük rüzgar hızı rejimine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 3.2. Bilecik ili aylık ortalama rüzgar hızı verilerin yıllara göre dağılımı.

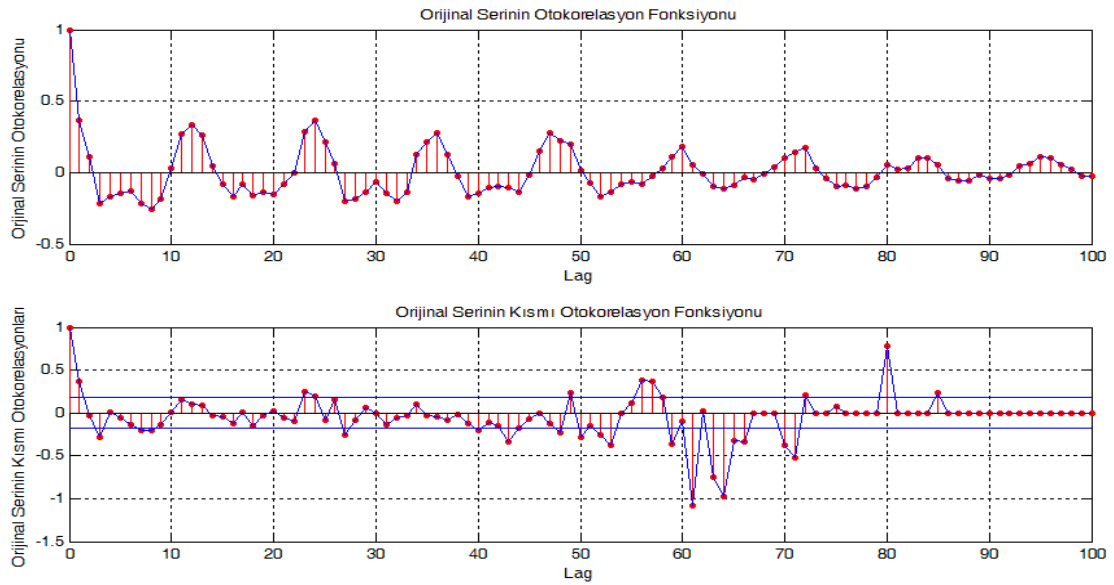
Rüzgar hızı serisinin birim kök testleri olarak ADF (Augmented Dickey–Fuller) ve PP (Phillips-Perron) ve KPSS (Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin) testleri uygulanmıştır. Çizelge 3.1.'de rüzgar hızı verisine ait hesaplanan durağanlık test sonuçları gösterilmiştir (Dokur, vd., 2016 e).

Çizelge 3.1. Orijinal serinin durağanlık test sonuçları.

Durağanlık Testleri	İstatistik Değeri	Kritik Değer %1	Kritik Değer %5	Kritik Değer %10
ADF	-7,1592	-3,4816	-2,8839	-2,5787
PP	-6,1378	-3,4808	-2,8835	-2,5786
KPSS	0,0809	0,7390	0,4630	0,3470

Birim kök testi yorumlanırken, ADF (Augmented Dickey–Fuller) ve PP (Phillips-Perron) için % 1, % 5 ve % 10 kritik değerlerinin mutlak değeri, istatistik değerinden küçük ise seri durağan olarak yorumlanmaktadır. KPSS (Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin) testinde ise bu hipotezin tam tersi olarak durağanlık analizleri yapılmaktadır. Yapılan test sonuçlarından da görülebileceği üzere, orijinal serimizin durağandır.

Serinin durağan olması ile birlikte serinin otokorelasyonu (ACF) ve kısmi otokorelasyonu (PACF) dağılımına bakılarak model önerimine geçilebilir. Şekil 3.3 'de ACF ve PACF değişimleri gösterilmiştir (Dokur, vd., 2016 e). Serinin otokorelasyon fonksiyonuna da bakıldığında mevsimsellik etkisi içerisinde yer aldığı gözlemlenmektedir.



Şekil 3.3. Orijinal serinin ACF ve PACF değişimleri.

Durağanlık testleri ve otokorelasyon dağılımları incelenen işaretin model seçimi yapılabilir. Model önermelerde, çeşitli p ve q gecikmeleri için ($p=0,1,2$ ve $q=0,1,2$ gibi) farklı kombinasyonlarda model tahminleri yapılarak, katsayıların istatistiksel anlamlılıklarına bakılmalıdır. Sonuçlar doğrultusunda, tüm model katsayılarının istatistiksel anlamlı ($p(\text{value}) < \%5$) olması istenir.

Bilecik ili verileri için tüm bu analizler gerçekleştirildiğinde en uygun modelin SARIMA(1,0,0)(0,1,1)₁₂ olduğu görülmüştür. Model için tüm değerlerin anlamlı olduğu

gözlemlenmiştir. Seçilen modelin kapalı formu Denklem 3.2' de gösterilmiştir. Model uygunluk test sonuçları ve diğer tüm analiz değerleri Çizelge 3.2' de sunulmuştur (Dokur, vd., 2016 e).

$$(1 - B^{12})Y_t = (1 - \Theta_1 B^{12})\varepsilon_t \quad (3.2)$$

Çizelge 3.2. Model parametreleri ve test sonuçları.

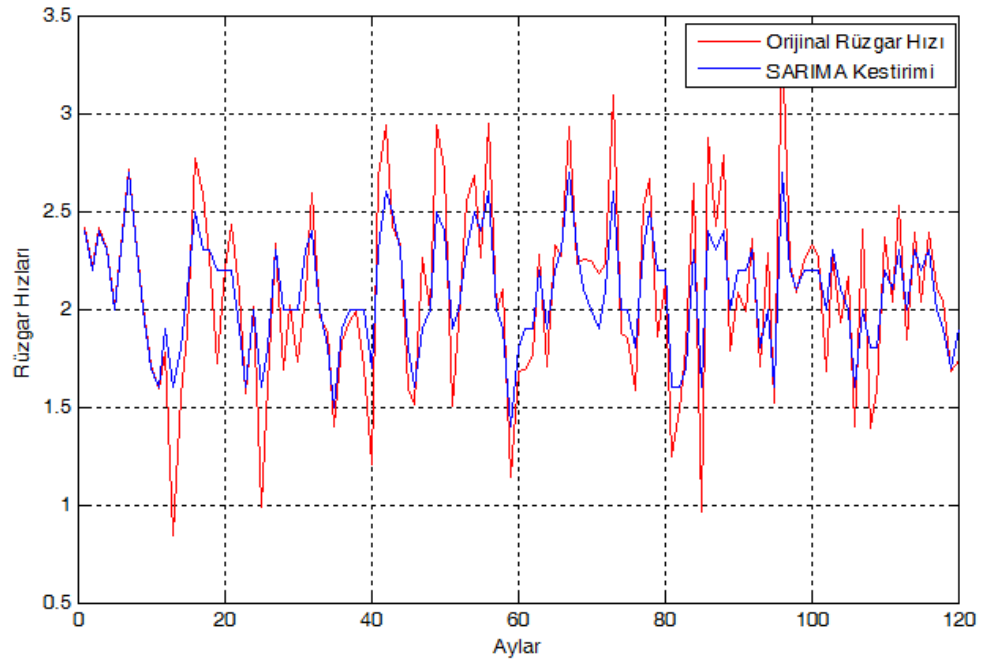
SARIMA(1,0,0)(0,1,1) ₁₂	Katsayılar	Standart Hata	t-istatistik	
Constant	-0.00706	0.00593	-1.18929	
AR{1}/ ϕ	0.169978	0.0817548	2.07912	
SMA{12}/ Θ	-0.794957	0.0561034	-14.1695	
Varyans	0.0575996	0.0064069	8.9902	
Durbin Watson Test	P		DW	
	0.7640		2,0099	
Lags				
Ljung-Box Test	12	24	36	48
P _{Value, LBQ}	0,6138	0,5876	0,7493	0,8624
h _{LBQ}	0	0	0	0

Model parametreleri belirlenen yapının açık formu, Denklem 3.3 ve 3.4'de gösterilmiştir.

$$Y_t = \phi Y_{t-1} + Y_{t-12} + \phi Y_{t-13} + \varepsilon_t - \Theta \varepsilon_{t-12} \quad (3.3)$$

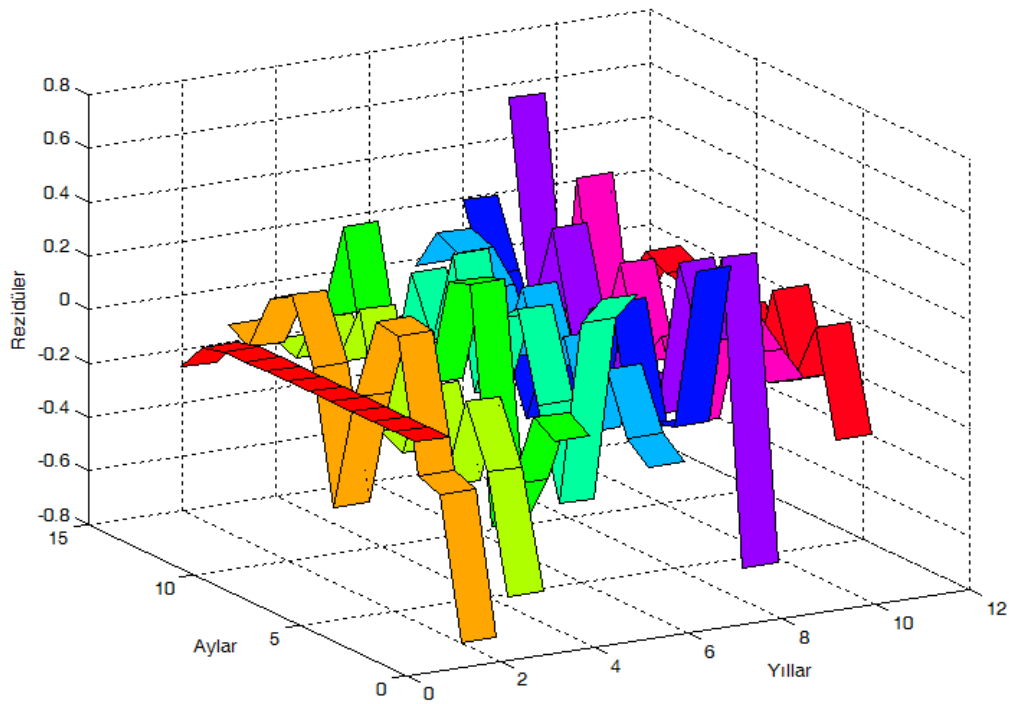
$$Y_t = -0.00706 + 0.169978 Y_{t-1} + Y_{t-12} - 0.169978 Y_{t-13} + \varepsilon_t - 0.794957 \varepsilon_{t-12} \quad (3.4)$$

Modelin ve orijinal işaretin zamana göre değişimi Şekil 3.4'de gösterilmiş olup aynı zamanda rezidülerin aylara ve yıllara göre 3 boyutlu olarak değişimi Şekil 3.5' de sunulmuştur.

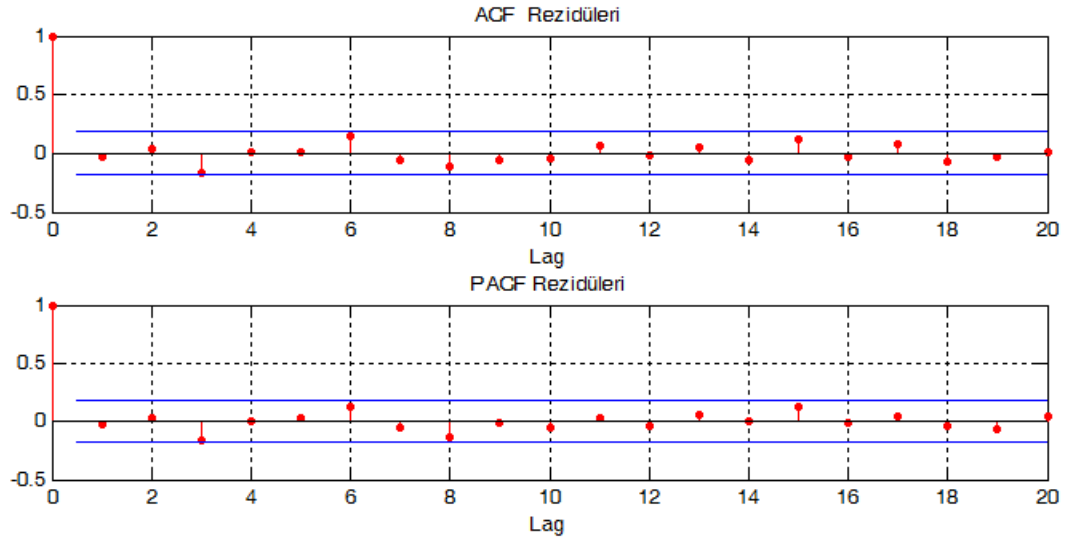


Şekil 3.4. Orijinal seri ve modelin zamana göre değişimi.

Modelin uygunluğunu Şekil 3.6'de gösterilen rezidülerin ACF ve PACF'lerin izin verilen değerler arasında olması ile analiz edilir.

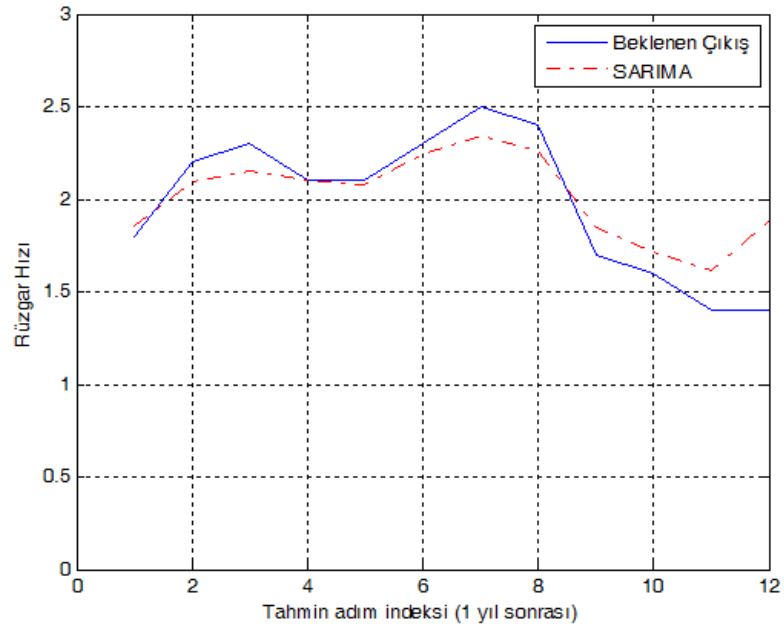


Şekil 3.5. Rezidülerin değişimi.



Şekil 3.6. Rezidülerin ACF ve PACF değişimi.

Modelin rezidülerinin izin verilen sınırlar arasında olduğu Şekil 3.6'dan kolaylıkla görülebilir. 10 yıllık veriler kullanarak oluşturulan modelin bir sonraki yılı tahmini ise Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Rüzgar hızı tahmin sonuçları.

Oluşturulan tüm modeller için, bir sonraki bölümlerde de kullanılacak olan model performans kriterleri, Denklem 3.5'de gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{RMSE} &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \\ \text{MSE} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \\ \text{MAPE} &= \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - \hat{y}_i)}{y_i} \right| 100 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Burada y_i gerçek değeri ifade ederken $\hat{y}_i$ ise tahmin değeri olarak belirtilir. N ise gözlem sayısı olarak ele alınır.

Çizelge 3.3' de oluşturulan farklı modeller için karşılaştırmalı sonuçlar performans kriter sonuçlarına göre gösterilmiştir (Dokur, vd., 2016 e).

Çizelge 3.3. SARIMA Modelleri için farklı parametrelerin performans metrikleri.

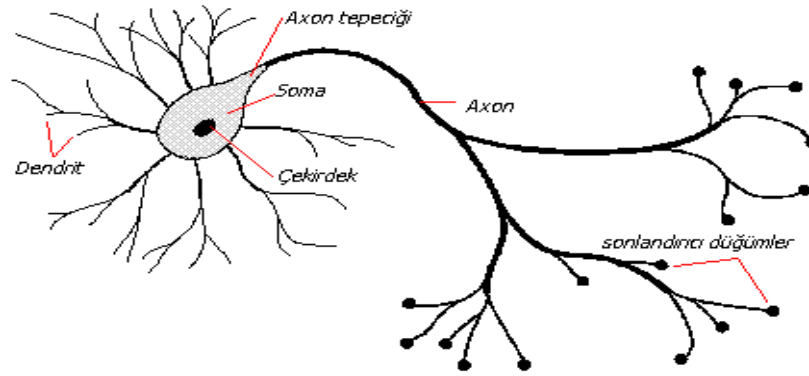
Modeller	RMSE	MSE	MAPE
(0,0,2)(1,1,0) ₂₄	0.3750	0.1406	15.2170
(0,0,1)(1,1,0) ₂₄	0.3738	0.1397	15.1143
(0,0,1)(1,1,0) ₃₆	0.3175	0.1008	14.7953
(1,0,0)(0,1,1) ₃₆	0.2658	0.0707	12.0242
(1,0,0)(0,1,1) ₂₄	0.2540	0.0645	11.8160
(1,0,1)(1,1,2) ₁₂	0.2468	0.0609	10.8725
(1,0,1)(1,1,1) ₁₂	0.2458	0.0600	10.8209
(1,0,1)(0,1,2) ₁₂	0.1865	0.0348	8.1982
(1,0,0)(0,1,1)₁₂	0.1829	0.0334	8.0003

Tüm bu analizler doğrultusunda SARIMA(1,0,0)(0,1,1)₁₂ modeli % 10 hata payının altında bulunan değeri ve 0.0334 hataların karesinin ortalama değeri ile diğer oluşturulan modellere göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

3.2. Yapay Sinir Ağı Analizleri ve Uygulamaları

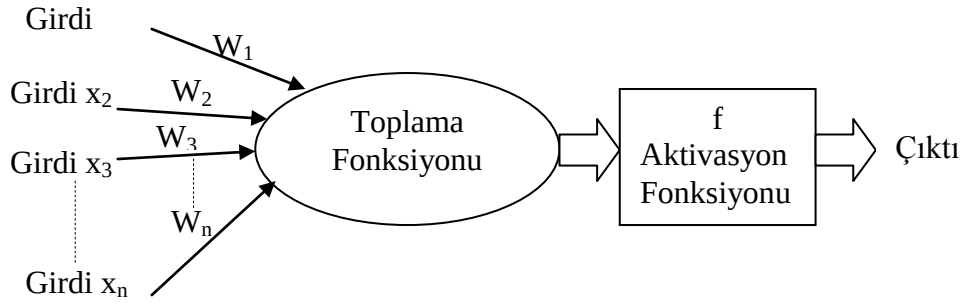
Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks – YSA) teknolojisi bilgisayar dünyasında insan beyninin ve sinir sisteminin davranışlarını taklit etme esası üzerine kurulmuş bir bilgi işleme yaklaşımıdır. İnsan beyninin en temel özelliği olan öğrenme fonksiyonunu gerçekleştiren yazılım ortamındaki akıllı sezgisel sistemlerdir.

Yapay sinir ağları, beynin çok basit bir nöron modelinin benzetimi üzerine kuruludur (Şekil 3.8.). Bu şekilde elde edilen ağ ile öğrenme olayı gerçekleşir. Yapay sinir ağlarının kullanım alanları içerisinde yer alan alanlar; kontrol ve sistem tanımlama, görüntü ve ses tanıma, tahmin ve kestirim, arıza analizi, tıp, haberleşme, trafik, üretim yönetimi ve benzeri uygulama alanları olarak sıralayabiliriz.



Şekil 3.8. Basit bir sinir hücresi.

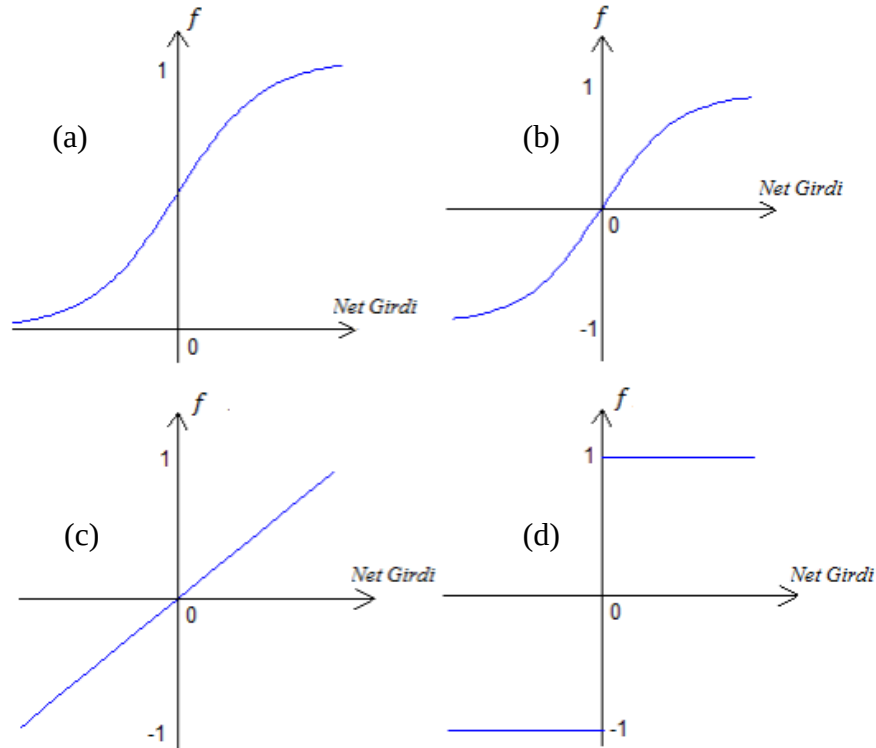
Temel bir yapay sinir ağı hücresi biyolojik sinir hücresine göre çok daha basit bir yapıya sahiptir. En temel yapay nöron modeli Şekil 3.9.'da görülmektedir. Yapay sinir ağı hücresinde temel olarak dış ortamdan ya da diğer nöronlardan alınan veriler yani girişler, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıkışlar bulunmaktadır. Dış ortamdan alınan veri ağırlıklar aracılığıyla nörona bağlanır ve bu ağırlıklar ilgili girişin etkisini belirler. Toplam fonksiyonu ise net girişi hesaplar, net giriş, bu girişlerle ilgili ağırlıkların çarpımının bir sonucudur. Aktivasyon fonksiyonu işlem süresince net çıkışı hesaplar ve bu işlem aynı zamanda nöron çıkışını verir. Genelde aktivasyon fonksiyonu, doğrusal olmayan (nonlineer) bir fonksiyondur. Burada b bir sabittir, bias veya aktivasyon fonksiyonunun eşik değeri olarak adlandırılır.



Şekil 3.9. Temel yapay sinir ağı hücresi.

Nöronun matematiksel modelinde; $\text{Çıktı} = f(w \cdot x + b)$ şeklinde nöron çıkışı hesaplanır. Buradaki w ağırlıklar matrisi, x ve n ise sırasıyla girişler matrisi ve giriş sayısıdır. Matematiksel olarak en temel model; $\text{net} = \sum_{i=1}^n w_i x_i + b$ ve $\text{Çıktı} = f(\text{net})$;

$\text{Çıktı} = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b\right)$ şeklinde yazılabilir. Formülde görülen f aktivasyon fonksiyonunu ifade eder. Yapay sinir ağlarında sıklıkla kullanılan aktivasyon fonksiyonları Şekil 3.10.'da verilmiştir.



Şekil 3.10. YSA'larda sıklıkla kullanılan aktivasyon fonksiyonları: a) Sigmoid, b)Hiperbolik-Tanjant,c) Doğrusal d)Adım aktivasyon fonksiyonları.

Yapay sinir ağı modelleri yapısına göre temel olarak ileri beslemeli ve geri beslemeli yapay sinir ağları olmak üzere iki grupta toplanmaktadır. İleri beslemeli yapay sinir ağlarında gecikmeler bulunmazken, işlem girişlerden çıkışlara doğru ilerler. Bir katmandan sadece kendinden sonraki katmanlar arasında bağlantı bulunmaktadır.

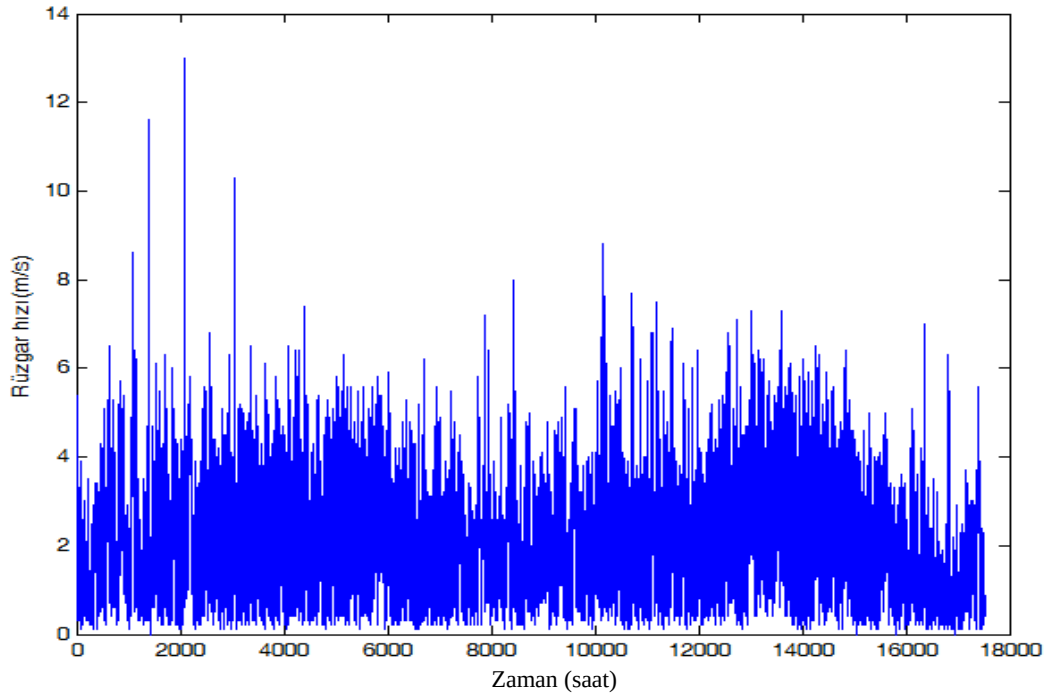
Geri beslemeli yapay sinir ağlarında ise ileri beslemeli yapay sinir ağı yapısının aksine bir hücrenin çıktısı sadece kendinden sonra gelen katmana girdi olarak verilmeyip aynı zamanda kendinden önceki veya kendi katmanında yer alan herhangi bir hücreye de girdi olarak verilebilir.

Yapay sinir ağlarında girdi değerlerine göre istenen çıktıyı üretebilmenin yolu ağın öğrenebilmesinden geçer. Öğrenme algoritmalarına göre yapay sinir ağları danışmalı, danışmasız ve destekleyici öğrenme olmak üzere üçe ayrılır (Yalcın, 2012). Danışmalı öğrenmede eğitim sırasında hem girdi hem de o girdi değerleri için istenen çıktı değerleri sisteme verilip gösterilen örneklerden genellemeler yaparak bir çözüm uzağı elde edilirken, danışmasız öğrenmede sadece girdi değerleri verilir ve örneklerdeki parametreler arasındaki ilişkileri sistemin kendi kendine öğrenmesi beklenir. Destekleyici öğrenmede ise sistemin kendisine verilen girdilere karşılık ağın kendi çıktısını üretmesini bekler ve üretilen çıktının olumlu veya olumsuz olduğunu gösteren bir çıktı verir. Ağ bu bilgi vasıtasıyla eğitim sürecini devam ettirir. Literatürde en sık kullanılan yapay sinir ağı öğrenme algoritmaları geri yayılım ve Levenberg-Marquardt eğitim algoritmalarıdır.

Tez çalışmasının birinci fazı hedefleri arasında yer alan yapay sinir ağları model yapılarının rüzgar hızı verileri kullanılarak karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yapılan analizlerde, Jordan/Elman (JENN), İleri Beslemeli (FFNN) ve Kaskat(CFNN) yapay sinir ağı yapıları, iki yıllık saatlik Bilecik ili rüzgar hızı verileri kullanılarak karşılaştırılmıştır (Şekil 3.11). Tüm analizlerde Levenberg-Marquardt eğitim algoritması kullanılmıştır.

Rüzgar hızı tahmin çalışmalarında önemli zorluklardan biri de eğitim veri setinin seçilme problemidir. Elektriksel yük tahmini gibi diğer tahminlerde geçmiş yıllara bakılarak kolaylıkla yapay sinir ağının eğitim seti oluşturulabilirken, rüzgar hızının kararsız ve değişken bir yapıya sahip olması rüzgar hızı tahmininde bir çok zorluğu da beraberinde getirmektedir. En basit yöntem sıcaklık, basınç ve nem gibi meteorolojik parametrelerle rüzgar hızının regresyon analizleri ile tahmin edilebilir. Fakat bu yöntem

hassas, güvenilir ve sürekli bir yaklaşım ortaya koyamamaktadır. Tez çalışması kapsamında Birinci Bölümde verilen bir çok literatür çalışmasında da olduğu gibi rüzgar hızı tahmininde giriş veri seti olarak bir önceki, iki önceki veya daha geçmişteki zaman aralıklarında yer alan rüzgar hızları ile gelecekteki rüzgar hızları eğitim veri setini oluşturmaktadır. Kaydırmalı pencereleme (sliding window) tekniği ile yapay sinir ağlarının giriş ve hedef verilerinden oluşan eğitim veri seti gerçekleştirilmiştir.

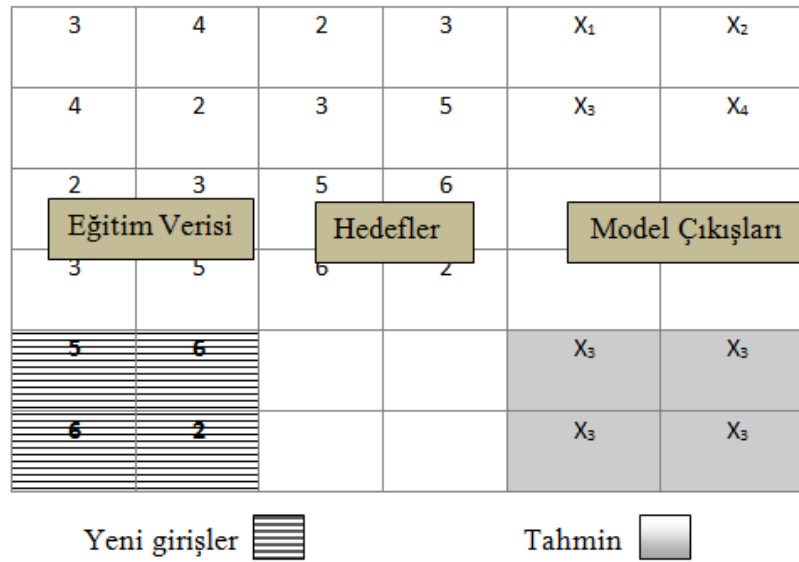


Şekil 3.11. Bilecik ili rüzgar hızı verisinin zamana göre değişimi.

Çalışmada kullanılan kaydırmalı pencereleme tekniğini $A=[3 \ 4 \ 2 \ 3 \ 5 \ 6 \ 2 \ 3 \ 4]$ olarak tanımladığımız bir matris üzerinden ele alırsak, yapay sinir ağlarının eğitim, hedef ve çıkış verileri Şekil 3.12' de ki gibi olacaktır. Burada ki amaç, bir adım önceki değerlerden yararlanarak bir sonraki adım ile ağı eğitmek ve sonraki gelecek değerlerde eğitilmiş ağı tahmin değerini yakalayabilmesidir.

Veriler yapay sinir ağı girişine verilmeden önce Denklem 3.6'da gösterilen şekilde normalizasyonu yapılarak ölçeklendirilmiştir.

$$V_{\text{normalize}} = [V_{\text{gerçek}} - V_{\text{minimum}}] / [V_{\text{maksimum}} - V_{\text{minimum}}] \quad (3.6)$$



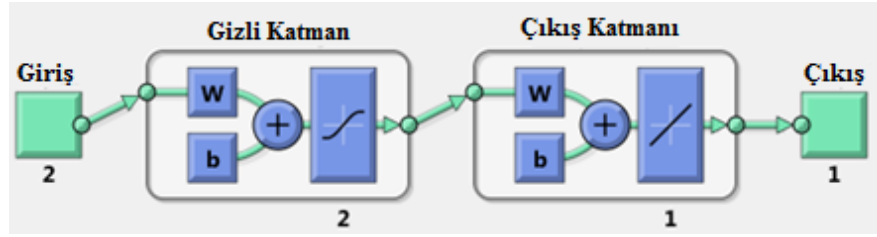
Şekil 3.12. Çalışmada kullanılan kaydırmalı pencereleme (sliding window) tekniği.

Denklem 3.6 kullanılarak yapılan normalizasyonun amacı rüzgar hızı verilerinin $[0,1]$ aralığında ölçeklendirilerek eğitim hatasını azaltarak, tahmin hassasiyetinin artırılmasıdır. Tahmin işlemi yapılması ile birlikte yine aynı şekilde ters ölçekleme yapılarak ve fonksiyonun tam tersi işletilerek gerçek değerlere erişilir.

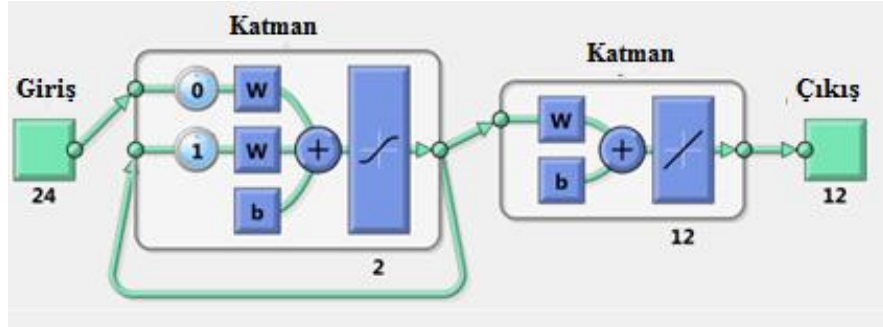
Oluşturulan yapay sinir ağ yapıları saatlik, günlük, haftalık ve aylık olarak gerçekleştirilmiştir. Buna göre ağ yapılarında kullanılan giriş çıkış katmanları, aktivasyon fonksiyonları ve nöron sayıları Çizelge 3.4'de verilmiştir. Yapay sinir ağı mimarilerinin, giriş, çıkış ve aktivasyon değerlerinin saatlik, günlük, haftalık ve aylık olarak gösterimi Şekil 3.13-3.17'da gösterilmiştir (Dokur, vd., 2016 g).

Çizelge 3.4. Yapay sinir ağı mimarileri.

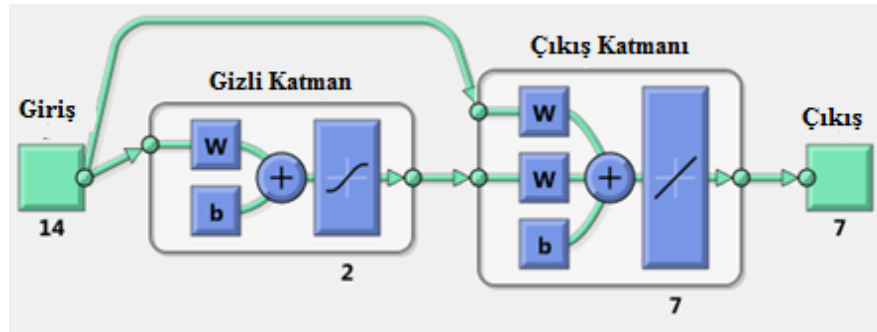
Model	Zaman	YSA Yapısı	Aktivasyon Fonksiyonları	
			Gizli Katman	Çıkış Katmanı
FFNN, JENN, CFNN	Saatlik	2 giriş+1 gizli katman 2 nöron+çıkış katmanı 1 nöron ile	Tansig	Purelin
	Günlük	24 giriş+2 giriş katmanı 2 nöron+çıkış katmanı 12 nöron	Tansig	Purelin
	Haftalık	14 giriş+1 gizli katman 2 nöron+ çıkış katmanı 7 nöron	Tansig	Purelin
	Aylık	60 giriş+1 gizli katman 20 nöron+çıkış katmanı 30 nöron	Tansig	Purelin



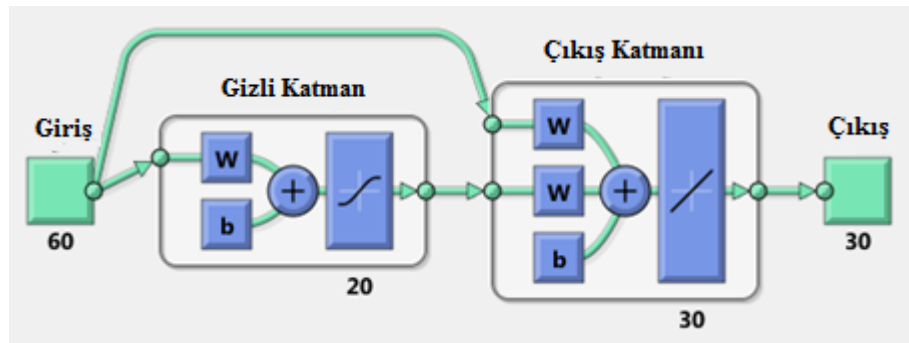
Şekil 3.13. FFNN, 2 giriş, 1 gizli katman 2 nöron ve 1 çıkış, saatlik zaman dilimi.



Şekil 3.14. JENN , 24 giriş , 2 gizli katman 2 nöron ve 12 çıkış, yarım gün kestirimi.



Şekil 3.15. CFNN , 14 giriş , 1 gizli katman 2 nöron ve 7 çıkış, haftalık kestirim.



Şekil 3.16. CFNN , 60 giriş , 1 gizli katman 20 nöron ve 30 çıkış, aylık kestirim.

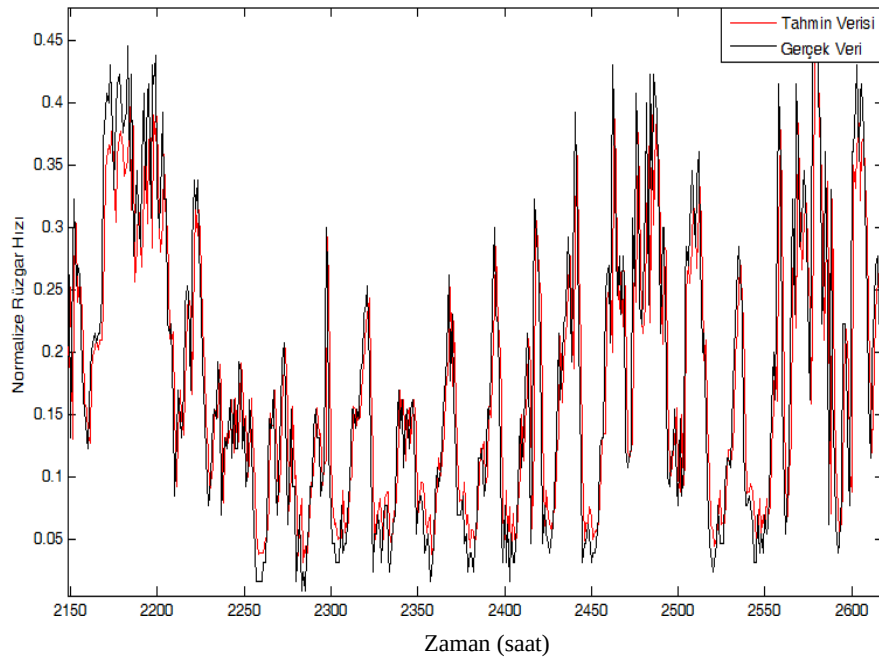
Model sonuçlarının performansları, bir önceki bölümde verilen hataların ortalamasının karesi (MSE) ve kriterleri ile karşılaştırılarak sunulmuş (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5. Model sonuçları.

Model	Zaman	MSE (Eğitim)	MSE (Doğrulama)
FFNN	Saatlik	0.0179	0.0246
JENN		0.0180	0.0247
CFNN		0.0180	0.0246
FFNN	Günlük	0.0175	0.0252
JENN		0.0175	0.0248
CFNN		0.0181	0.0259
FFNN	Haftalık	0.0260	0.0355
JENN		0.0250	0.0380
CFNN		0.0291	0.0489
FFNN	Aylık	0.0247	0.0610
JENN		0.0279	0.0314
CFNN		0.0376	0.1273

Çizelge 3.5.'den de görülebileceği üzere ileri beslemeli (FFNN) ve Jordan-Elman (JENN) yapay sinir ağı yapıları saatlik zaman dilimi hariç, diğer tüm zaman dilimleri için kaskat ileri beslemeli (CFNN) yapay sinir ağı yapısına göre daha iyi sonuç vermektedir. Örnek bir zaman dilimi için alınan normalize edilmiş rüzgar hızı verisinin tahmin model sonuçları Şekil 3.17'de gösterilmiştir.

Genel anlamda bu bölümde yapılan çalışmanın amacı birbirlerine göre farklı yapıdaki yapay sinir ağı modelleri için genel bir karşılaştırma yaparak, hibrit yaklaşımlar için yapay sinir ağı yapısının seçimi konusunda ön bir analiz yapabilmektedir.



Şekil 3.17. Rüzgar hızı tahmin sonuçlarının normalize edilmiş rüzgar hızı verisi üzerinden örnek bir zaman dilimi için gösterimi.

Model karşılaştırmaları açısından ön analiz çalışmaların yapıldığı bu bölüm ile birlikte, ileri beslemeli ve Jordan Elman yapay sinir ağlarının kullanımına karar verilerek kısa dönemli rüzgar hızı tahmin sonuçlarının detaylı grafiksel sonuçları ve hibrit yaklaşımlar ile karşılaştırmalı analizleri bir sonraki bölümde ele alınacaktır.

3.3. Hibrit Yaklaşım Analizleri ve Uygulamaları

Son yıllarda rüzgar hızı tahmini üzerine yapılan çalışmalarda farklı yöntemlerin birlikte kullanılarak daha hassas yaklaşımlar ile kestirimlerin hibrit bir yapıda gerçekleştirildiği görülebilir (Dokur, vd., 2016 f). Gerek zaman serisi analizleri gerekse akıllı sezgisel yaklaşımlarda, farklı ayrıştırma metotları veya farklı optimizasyon teknikleri ile birlikte hibrit kullanımı daha hassas modellerin kurulabilmesi açısından önemlidir.

Tez çalışması kapsamında (Huang, vd., 1998) tarafından sinyal işlemede kullanılmak üzere önerilen Görgül Kip Ayrışımı (Empirical Mode Decomposition-GKA) yöntemi ile farklı yapıdaki yapay sinir ağlarının hibrit bir şekilde kullanılması uygulamalı olarak verilmiştir.

Kübik spline interpolasyon yardımıyla üst ve alt zarfların ortalaması esasına dayanan görgül kip ayrışımı yöntemi zaman serisini kendini oluşturan yarı ortogonal özgül kip fonksiyonları (Intrinsic Mode Functions-ÖKF) cinsinden ifade etmeye dayanmaktadır. GKA yöntemiyle açılan her salınımın ÖKF olabilmesi için iki koşul: uç nokta sayısının sıfır geçiş sayısına eşit veya farkın bir olması ve üst ile alt zarfın ortalamasının sıfır olması gerekmektedir. Fourier dönüşümü ve Dalgacık Dönüşümüne kıyaslandığında taban fonksiyonu seçimi gerektirmeyen uyarlamalı yöntem olarak sınıflandırılmaktadır. Bu amaçla, GKA algoritmasının en önemli kısmı olan ayıklama, ÖKF'leri belirtilen özellikleri sağlayana kadar sinyalin içinden elde etmeye dayanır. GKA algoritması (Mert ve Akan, 2014):

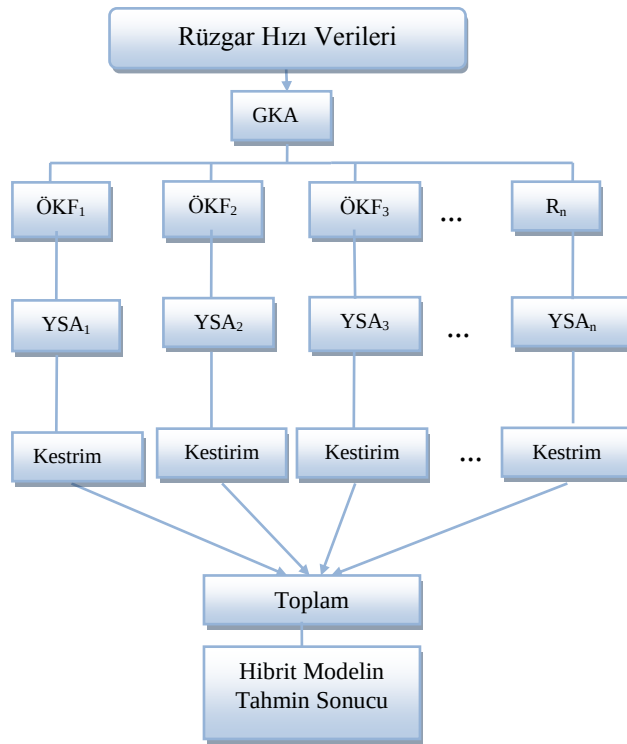
- a) Ayırık sinyal $x(n)$ içinde yerel üst ve alt ekstremum noktaları M_i , $i=1,2,...$ ve m_k , $k=1,2,...$, bulunur.
- b) Kübik interpolasyon ile bulunan üst ve alt ekstremum noktaları birleştirilerek üst zarf, $M(n)=f_M(M_i,n)$ ve alt zarf $m(n)=f_m(m_i,n)$ elde edilir.
- c) Alt ve üst zarfların ortalaması bulunur, $e(n)=(M(n)+m(n))/2$
- d) Ortalama sinyalden çıkarılır, $x(n)=x(n)-e(n)$.
- e) Basamak (a) ya geri dönülür ve $x(n)$ sabit kalmaya başladığında durdurulur.
- f) ÖKF, $\phi_i(n)$ elde edilince sinyalden çıkarılır. $x(n)=x(n)-\phi_i(n)$, ve eğer $x(n)$ sabit, monoton artan veya azalan $r(n)$, değilse basamak (a) ya dön.

Böylece, herhangi bir kabul ve seçim yapılmadan ÖKF'ler elde edilir. Görgül kip ayrışımı ile elde edilen ÖKF'lerin toplamı, orjinal işareti vermiş olur (Denklem 3.7).

$$x(n) = \sum_{i=1}^L \phi_i(n) + r(n) \quad (3.7)$$

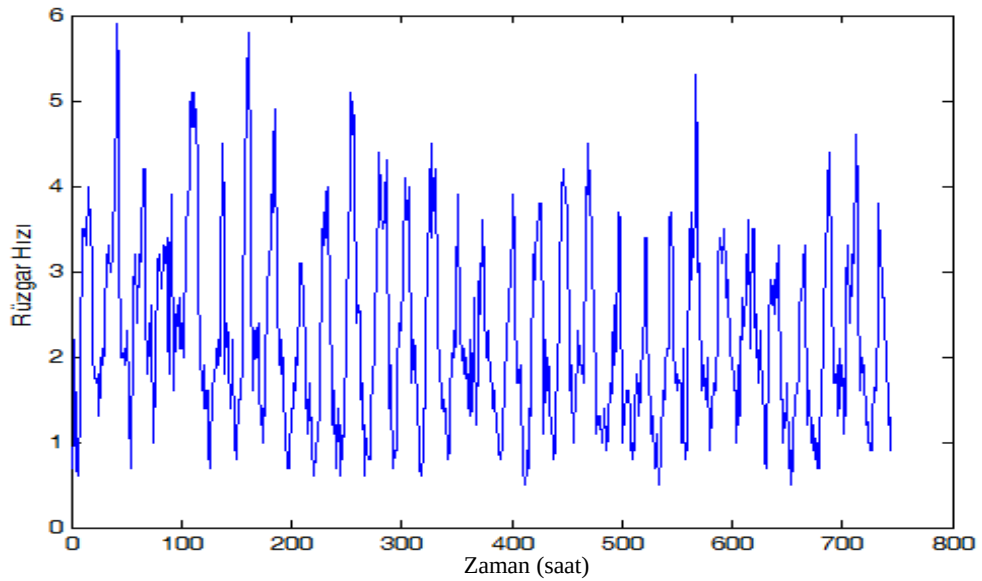
Burada, L toplam ÖKF sayısını ifade etmektedir.

Bu tez çalışmasında, hibrit yaklaşım uygulaması olarak rüzgar hızı serisi görgül kip ayrışımı yardımıyla, ÖKF'lerine ayrıştırılacak ve her bir ayrıştırılmış ÖKF ayrı ayrı yapay sinir ağı girişine verilerek hibrit bir yapıda rüzgar hızı tahmini gerçekleştirilecektir. Oluşturulan hibrit yaklaşım sadece yapay sinir ağı ile oluşturulan model ile karşılaştırılacak ve sonuçları yorumlanacaktır. Çalışmanın akış diyagramı Şekil 3.18'de gösterilmiştir (Dokur, vd., 2015 b).



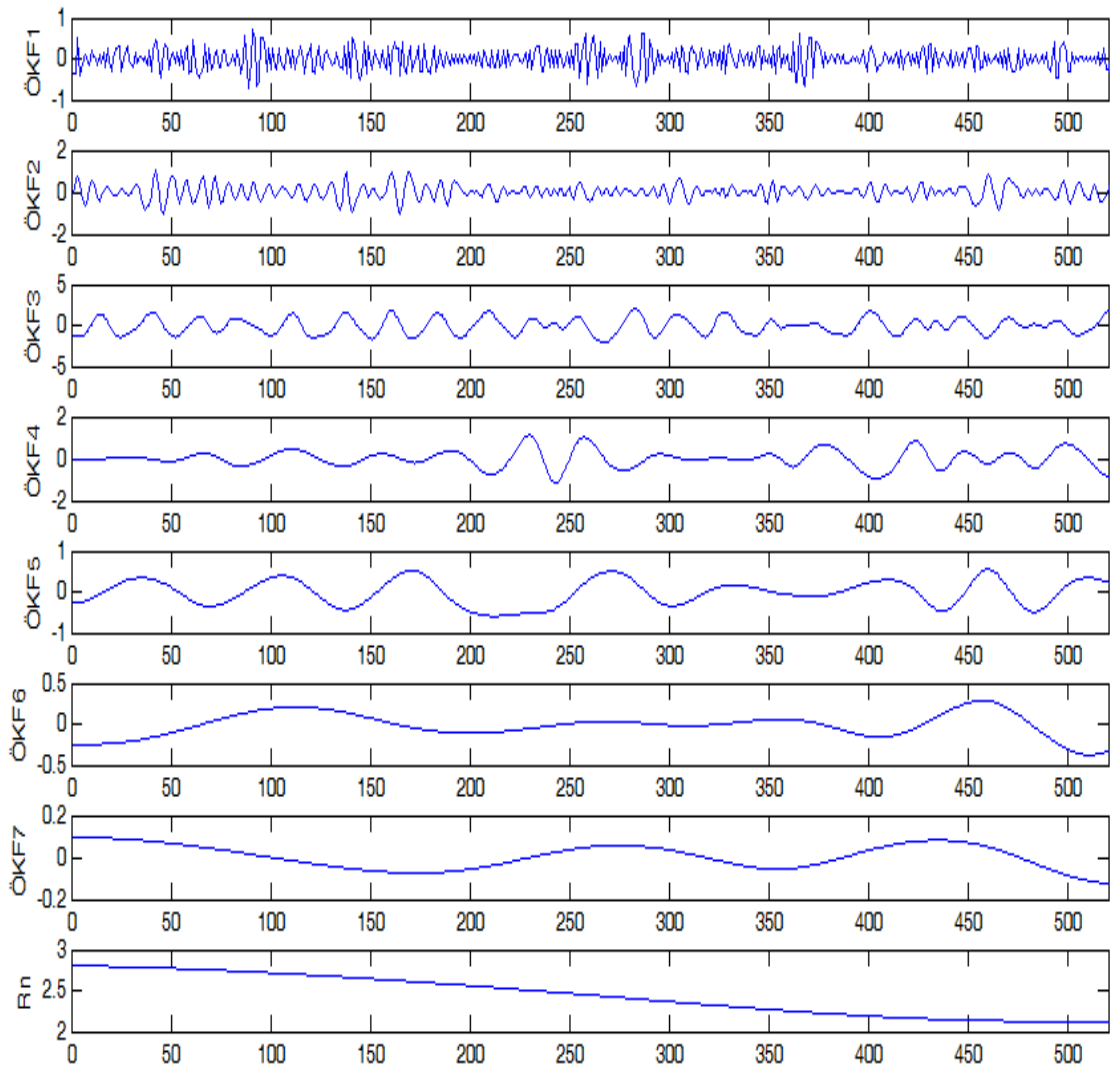
Şekil 3.188. Hibrit uygulamanın akış diyagramı.

Hibrit yaklaşıma örnek uygulama kapsamında Bilecik ili 2014 yılı Temmuz ayı için 744 örnek içeren saatlik rüzgar hızı verilerinin 1-520 arası verileri eğitim verileri olarak seçilirken 521-744 arası veriler ise test verileri olarak seçilmiştir. Şekil 3.19'de saatlik kaydedilen aylık orijinal rüzgar hızı verileri yer almaktadır.



Şekil 3.19. Aylık rüzgar hızı verisi.

Şekil 3.17'de verilen akış diyagramında da görülebileceği gibi, öncelikli olarak yapay sinir ağı girişine verilecek orjinal rüzgar hızı serisi görgül kip ayrışımı ile alt bileşenlerine ayrıştırılarak öz kip fonksiyonları elde edilmiştir (Şekil 3.20). Elde edilen ÖKF'leri ayrı ayrı oluşturulan yapay sinir ağı modellerine giriş verisi olarak verilmiş ve ağ eğitimi ayrıştırılmış sinyaller ile tamamlanmıştır. Ayrıştırılmış sinyallerden gelen alt bileşenler ayrı ayrı sinir ağının girişine verildikten sonra her bir ayrıştırılmış veri için tahminler bağımsız olarak analiz edilmiştir. Sonuçta elde edilen tüm ayrıştırılmış sinyallerin kestirim değerleri toplanarak modelin tahmin sonuçlarına ulaşılmıştır.



Şekil 3.20. GKA yöntemi ile ayrıştırılmış rüzgar hızı serileri.

Hibrit model sonuçları Jordan-Elman (JENN) ve ileri beslemeli (FFNN) yapay sinir ağları ile kullanılarak ayrı ayrı elde edilen model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, bir önceki bölümde de ele alınan hataların karesinin ortalaması (MSE) ve Denklem 3.8'da verilen hataların mutlak değerinin ortalaması (MAE) performans kriterleri ile karşılaştırmalı analiz sonuçları gösterilmiştir (Çizelge 3.6) (Dokur, vd., 2016 b; 2016 c).

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i| \quad (3.8)$$

Burada diğer performans kriteri gösterimlerinde olduğu gibi y_i ve $\hat{y}_i$ sırasıyla gerçek ve gözlenen değerleri göstermektedir. N ise gözlem sayısını ifade etmektedir.

Çizelge 3.6. Performans kriterlerine göre karşılaştırmalı analiz sonuçları.

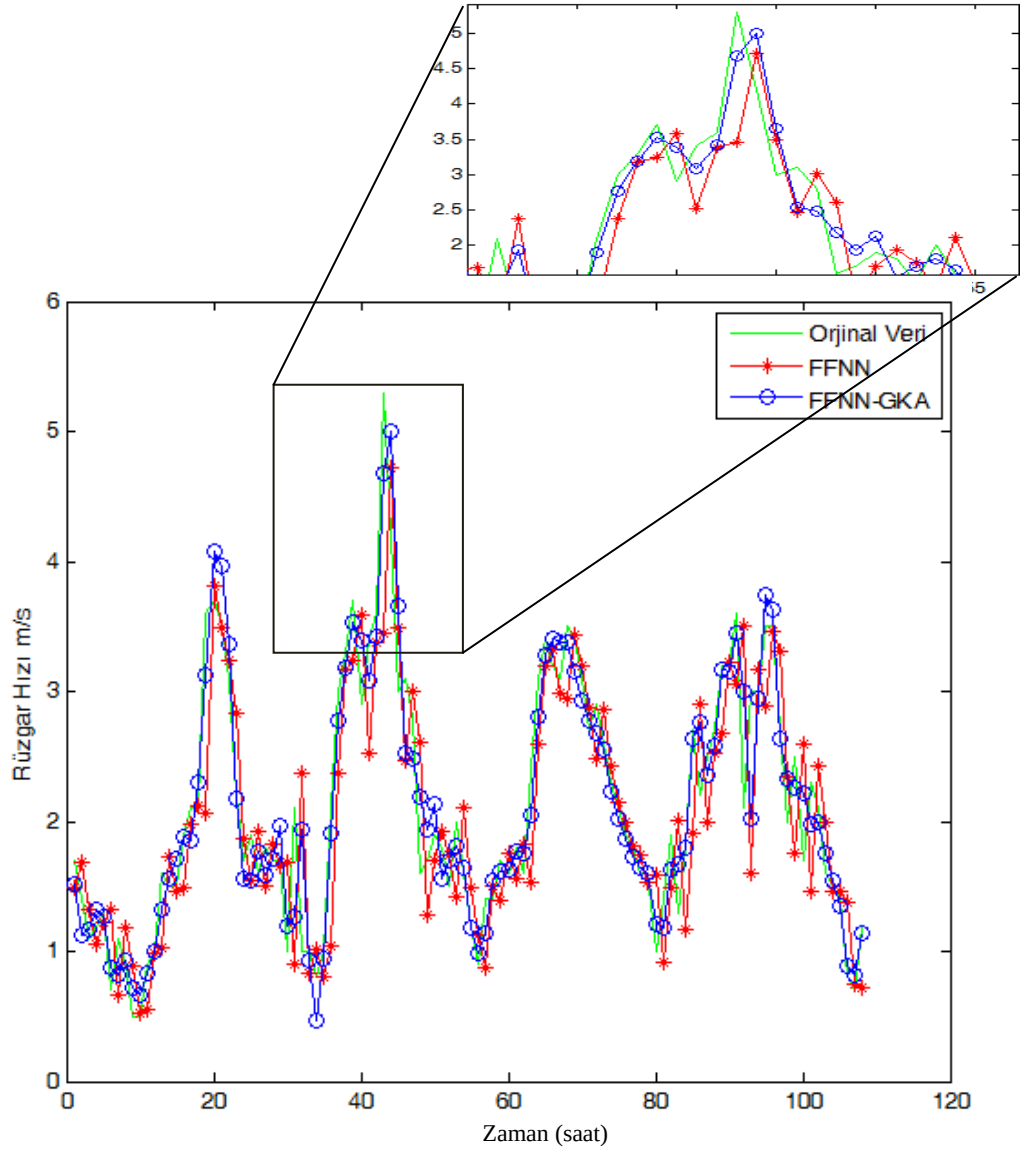
Performans Kriteri	FFNN	JENN	FFNN-GKA	JENN-GKA
MSE	0.2871	0.2939	0.0879	0.0920
MAE	0.4037	0.4056	0.2185	0.2221

Çizelge 3.6'dan da görüldüğü gibi, hibrit yaklaşım ile oluşturulan model sonuçlarının sadece yapay sinir ağı yapıları ile oluşturulan model sonuçlarına göre daha uygun olduğu sonucuna ulaşılabilir.

Sadece JENN ile MSE ve MAE değerleri sırasıyla 0.5421 ve 0.4056 bulunurken, JENN-GKA hibrit yapısında 0.3032 ve 0.2221 sonuçları elde edilerek hata değerlerinin düşürülmesi sağlanmıştır.

Aynı ay için yapılan bir diğer hibrit yaklaşımda ise ileri beslemeli yapay sinir ağları kullanılmıştır. Model performans kriterlerine bakıldığında ileri beslemeli yapay sinir ağı ile oluşturulan hibrit modelin hem sadece FFNN ile oluşturulan modele göre hemde JENN ve JENN-GKA hibrit modellerine göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Hibrit modelin ve sadece yapay sinir ağından elde edilen tahmin değerlerinin grafiksel gösterimi Şekil 3.21'de sunulmuştur.



Şekil 3.21. İleri beslemeli yapay sinir ağı ve hibrit modelin karşılaştırmalı tahmin sonuçları.

4.ENERJİ SİSTEMLERİNİN PLANLANMASINDA RÜZGAR HIZI MODELLEMESİ ve ENERJİ POTANSİYELİ ANALİZLERİ

Bir bölgeye rüzgar enerjisi dönüştürme sistemi kurulmadan önce o bölgenin rüzgar enerji potansiyeli belirlenmeli ve modellenmelidir. Rüzgar enerjisinden elde edilecek elektrik enerjisi o bölgenin hava yoğunluğuna, türbinin süpürme alanına ve rüzgar hızının küpüne bağlı olarak değişmektedir. Enerji potansiyelinin belirlenmesindeki önemli faktörlerden biri de, bölgenin değişken ve kararsız yapıdaki rüzgar hızı karakteristiğidir. Bu sebeple rüzgar enerjisi dönüştürme sistemi kurulacak bölge için rüzgar hızı karakteristiğinin belirlenmesi ve modellenerek analiz edilmesi gerekmektedir.

Tez çalışmasının ana konusunu teşkil eden rüzgar hızı modellemesi kapsamında, bu bölümde literatürde sıklıkla kullanılan iki parametrelili Weibull, Rayleigh dağılımlarının yanı sıra Akgül ve arkadaşları tarafından 2016 yılında mevsimsel rüzgar hızı modellemesinde önerilen, ters Weibull dağılımı kullanılarak sadece mevsimsel değil aynı zamanda aylık, ve mevsimsel analizler de farklı bölgeler için gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda bu dağılım fonksiyonlarının parametrelerinin tahminlerine ilişkin karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Bu bölümün son kısmında ise iki parametrelili Weibull dağılımı için Riemann geometrisi tabanlı bilgi geometrisi kullanılarak yeni bir parametre tahmin metodu geliştirilmiştir. Bir sonraki bölüm olan Bölüm 5'de, 2 - boyutlu Finsler uzayında iki parametrelili eğri ailelerine ilişkin metrik hesaplamaları yapılarak yeni olasılık ve kümülatif olasılık yoğunluk fonksiyonları elde edilmiş ve uygulamalı analizleri sunulmuştur.

4.1. İki Parametrelili Weibull Dağılımı Tabanlı Rüzgar Hızı Analizleri ve Uygulamaları

İsveçli fizikçi Wallodi Weibull, malzemenin çekme gerilmesinin dağılımını açıklamak amacıyla 1939 yılında Weibull dağılımını geliştirmiştir (Oral, 2010). Dünyanın bir çok bölgesinin rüzgar hızı karakteristiğini temsil etmek için iki parametrelili Weibull dağılımı en sık kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemin kullanılma amacı, rüzgar dağılımına çok iyi uyum göstermesi, dağılımın esnek bir yapıya sahip olması, parametrelerinin belirlenmesindeki kolaylık, parametre sayısının

az olması, parametrelerin bir yükseklik için belirlenmesinin ardından farklı yükseklikler için elde edilebilmesi gibi faktörlerdir (Akdağ ve Güler, 2008).

İki parametrelili Weibull dağılımı için olasılık yoğunluk fonksiyonu Denklem 4.1'de gösterilmiştir.

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (4.1)$$

Burada, v rüzgar hızı, k şekil parametresi, c ölçek parametresi $f(v)$ ise olasılık yoğunluk fonksiyonunu ifade etmektedir.

İki parametrelili Weibull dağılımının kümülatif olasılık yoğunluk fonksiyonu ise Denklem 4.2'de gösterilmiştir.

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (4.2)$$

Weibull kümülatif olasılık dağılım fonksiyonu, rüzgar hızının, belli bir v değerinden küçük ya da eşit gerçekleşme olasılığını verir.

Bölüm 1'de de ele alınan bir çok literatür çalışmasında da olduğu gibi iki parametrelili Weibull dağılımı gerek ülkemizde gerekse dünya üzerinde ki bir çok bölgede rüzgar verilerine uyum sağladığı görülmektedir.

Weibull dağılımında en yüksek sıklığa sahip rüzgar hızı Denklem 4.3'e göre belirlenir.

$$v_{\text{mod}} = c \left(1 - \frac{1}{k}\right)^{1/k} \quad (4.3)$$

Maksimum rüzgar hızı ise Denklem 4.4'a göre hesaplanabilir.

$$v_{\text{maks}} = c \left(\frac{k+2}{k}\right)^{1/k} \quad (4.4)$$

En yaygın kullanılan rüzgar gücü formülü ise Denklem 4.5'de verilmiştir.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (4.5)$$

Burada ρ (kg/m³) hava yoğunluğu olup, A (m²) ise rüzgar türbininin süpürme alanıdır. Weibull dağılımı için ortalama güç yoğunluğu Denklem 4.6 ile gösterilmiştir.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) \quad (4.6)$$

Burada Γ , gamma fonksiyonudur. 15.6 C° ve 1 atmosfer basınçta deniz seviyesindeki havanın yoğunluğu $\rho_0 = 1.225$ kg/m³ değeri dikkate alınarak deniz seviyesinden yüksekliği (H_m) ve diğer konum bilgilerine göre düzeltilmiş hava yoğunluğu Denklem 4.7'ye göre bulunur. Analizlerde Bilecik ili hava yoğunluğu bu denkleme göre 1.1235 kg/m³ olarak alınmıştır. Yine rüzgar hızının standart sapması, Denklem 4.8'e göre hesaplanabilir.

$$\rho = \rho_0 - 1.194 \cdot 10^{-4} H_m \quad (4.7)$$

$$\sigma = \sqrt{c^2 \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{2}{k} \right) \right]} \quad (4.8)$$

Denklemlerden de görülebileceği gibi, güç potansiyelini belirlemek için önemli verilerden biride rüzgar hızıdır. Rüzgar yönü, potansiyel için etkili olmamakla birlikte rüzgar enerjisi çevrim sistemlerinin yerleştirilmesinde önemli bir rol oynadığı konusu da ayrıca belirtilmelidir.

Weibull dağılımının parametrelerinin bulunması için literatürde bir çok farklı yaklaşım önerilmiştir (Stevens ve Smulders, 1979; Justus, vd., 1978; Akdag ve Dinler, 2009; Lysen, 1983).

Çalışmamızın ilk kısmında en yüksek olabilirlik ve grafik metodu analizler de kullanılacaktır. En yüksek olabilirlik yöntemi likelihood fonksiyonunun maksimizasyonu temeline dayanmaktadır. Fakat bu yöntemin en önemli zorluğu likelihood fonksiyonun çözümü ile ilişkili bazı problemlerdir. Bu durumda denklem şekline göre bazı iteratif teknikler çözüm için uygulanır. Grafik metodu ise geniş örnek sayısında iyi sonuçlar verirken dar ölçekli verilerde yetersiz kalabilmektedir.

Weibull dağılımı şekil ve ölçek parametrelerinin belirleme yöntemlerinden biri olan grafik metodunda (GM), Denklem 4.2'de ki kümülatif olasılık yoğunluk fonksiyonunun her iki tarafının iki defa doğal logaritmasının alınması ile Denklem 4.9 elde edilir.

$$\ln[-\ln[1-F(v)]] = k \ln v - k \ln c \quad (4.9)$$

$\ln[-\ln[1-F(v)]]$ 'nin $\ln v$ 'ye göre grafiği uzayda doğruyu gösterir ve k parametresi bu doğrunun eğimini vermektedir. Doğrunun ordinat değerlerinin hesaplanması için ilk olarak frekans dağılımının ve birikimli frekans dağılımının hesaplanması gerekmektedir. En küçük kareler problemi hesaplanan bu değerler ile çözülerek k ve c parametreleri bulunur.

Weibull parametrelerinin belirleme yöntemlerinden biri olan en yüksek olabilirlik metodu (EYO), Steven ve Smulders tarafından önerilmiştir. En yüksek olabilirlik yöntemi geniş iterasyon adımları içermektedir. Weibull dağılımının şekil ve ölçek parametreleri Denklem 4.10 ve Denklem 4.11'e göre hesaplanmaktadır.

$$k = \left(\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right)^{-1} \quad (4.10)$$

$$c = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (v_i)^k}{\sum_{i=1}^n v_i^k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (4.11)$$

Grafik metod ve en yüksek olabilirlik metodunun Bilecik ili 10 m yükseklikteki 2013-2014 verileri kullanılarak aylık ve yıllık karşılaştırmalı analiz sonuçları Çizelge 4.1'de gösterilmiştir (Dokur, vd., 2015 d).

Çizelge 4.1'de grafik (GM) ve en yüksek olabilirlik metodu (EYO) için Weibull dağılım parametreleri hesaplanmış ve Denklem 3.5'de gösterilen hataların ortalamasının karesinin karekökü olan (RMSE) hata performans kriteri ile iki yöntem karşılaştırılmıştır (Dokur, vd., 2015 d).

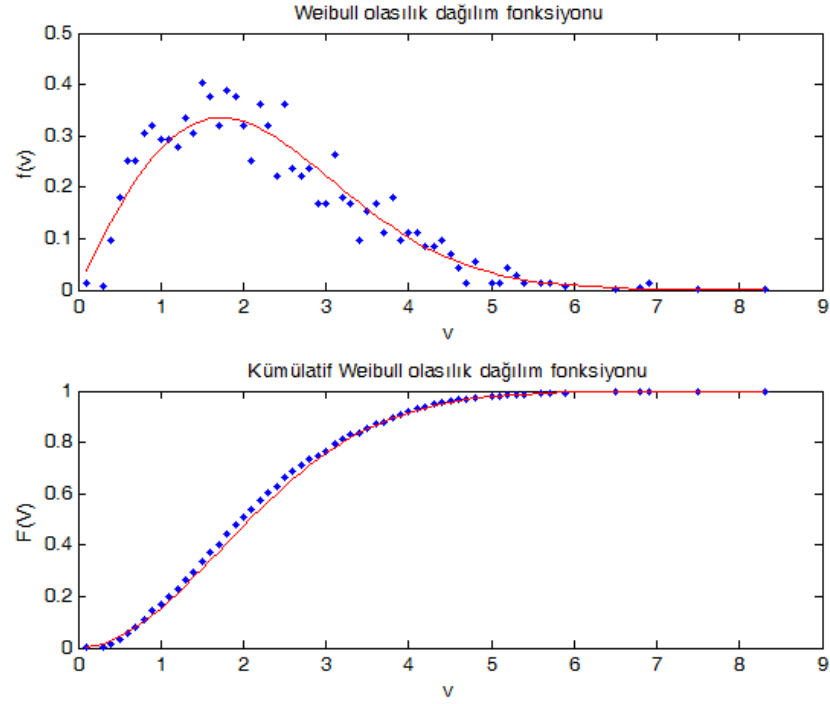
10 m yükseklikte ölçülen Bilecik ili rüzgar hızı verileri için en yüksek olabilirlik yöntemi ile hesaplan parametrelerin hata performansı yönünden daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Ölçülen veriler yardımı ile, en yüksek olabilirlik metodundan elde edilen Weibull şekil parametresi yıllar bazında k , 1.9156, 2.0466 ve ölçek parametresi c 2.3089, 2.1061 bulunmuştur.

Çizelge 4.1. Parametre tahmin yöntemlerinin örnek Bilecik verisi için karşılaştırılması.

Aylar	Metot	2013			2014		
		k	c	RMSE	k	c	RMSE
Ocak	EYO	2.2400	2.4860	0.0284	2.1885	2.0545	0.0328
	GM	2.5054	2.4956	0.0413	2.6455	2.1682	0.0685
Şubat	EYO	2.1236	2.2914	0.0387	1.9435	1.8455	0.0406
	GM	2.5603	2.3799	0.0689	2.2698	1.9850	0.0754
Mart	EYO	2.0730	1.2524	0.0364	2.2748	2.1660	0.0261
	GM	2.1849	1.2465	0.0385	2.4473	2.1824	0.0348
Nisan	EYO	2.3111	2.3331	0.0267	2.0241	2.0614	0.0320
	GM	2.6233	2.3432	0.0403	2.4410	2.1843	0.0679
Mayıs	EYO	1.9387	2.3502	0.0322	2.0202	2.0965	0.0258
	GM	2.1924	2.3857	0.0491	2.1813	2.3252	0.0296
Haziran	EYO	1.9435	2.6441	0.0322	2.1401	2.3132	0.0294
	GM	2.2101	2.6745	0.0482	2.5904	2.4307	0.0640
Temmuz	EYO	2.3567	3.1580	0.0247	2.2348	2.5420	0.0301
	GM	2.6460	3.0771	0.0387	2.5028	2.5295	0.0416
Ağustos	EYO	2.1287	2.8553	0.0362	2.0093	2.5030	0.0324
	GM	2.5243	2.8809	0.0564	2.1933	2.4921	0.0403
Eylül	EYO	2.0093	2.3163	0.0291	2.1629	2.1439	0.0353
	GM	2.1600	2.2962	0.0351	2.4546	2.1897	0.0534
Ekim	EYO	1.8692	2.0347	0.0367	2.2758	1.8371	0.0390
	GM	2.1222	2.1434	0.0620	2.5608	1.8384	0.0508
Kasım	EYO	2.2285	1.7290	0.0391	2.1381	1.8864	0.0371
	GM	2.7083	1.8124	0.0720	2.5457	1.8916	0.0583
Aralık	EYO	2.1275	2.2904	0.0321	1.9591	1.7732	0.0347
	GM	2.5455	2.2748	0.0551	2.2776	1.8744	0.0638
Yıllık	EYO	1.9156	2.3089	0.0268	2.0466	2.1061	0.0284
	GM	2.2063	2.4226	0.0526	2.6196	2.3537	0.0856

Rüzgar hızı profili Weibull dağılımına uyan bölgenin rüzgar hızı değişimleri ve enerji güç yoğunları Çizelge 4.2'de gösterilmiştir (Dokur ve Kurban, 2015 a). Bilecik ili rüzgar hızı profiline bakıldığında düşük rüzgar rejimine sahip olan bir bölgeye sahip olması sebebiyle istenilen güç yoğunlukları gözlenemese burada ki amaç parametre tahmin metotlarının karşılaştırılmasıdır.

Örnek bir ay için rüzgar hızı dağılımının en yüksek olabilirlik metoduyla elde edilen parametreler ile hesaplanmış olasılık yoğunluk ve kümülatif olasılık yoğunluk değerleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir (Dokur ve Kurban, 2015 c).



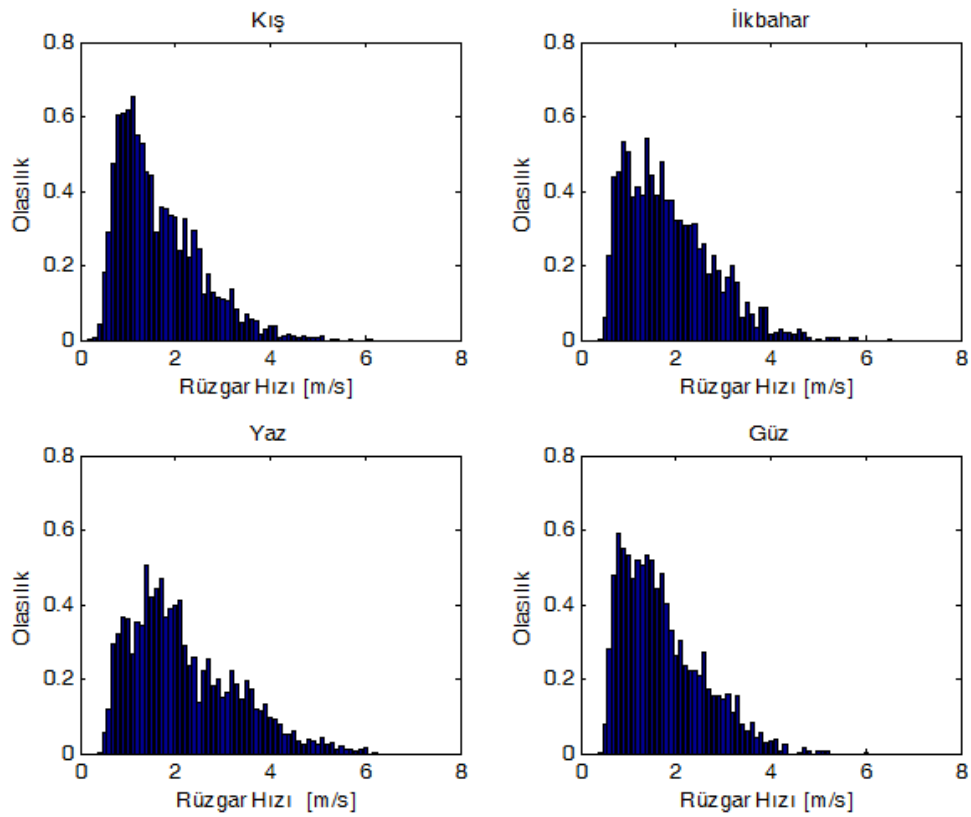
Şekil 4.1. Örnek bir ayın olasılık yoğunluk ve kümülatif olasılık yoğunluk fonksiyonlarının değişimi.

Çizelge 4.2. Güç yoğunlukları ve hız değerleri.

Aylar	2013					2014				
	v_m	σ	v_{mod}	v_{maks}	P_w	v_m	σ	v_{mod}	v_{maks}	P_w
Ocak	2.2018	1.0396	1.9091	3.3053	10.31	1.8195	0.8772	1.5544	2.7639	5.93
Şubat	2.0294	1.0051	1.6980	3.1320	8.46	1.6365	0.8778	1.2724	2.6559	4.84
Mart	1.1094	0.5615	0.9115	1.7348	1.41	1.9186	0.8934	1.6791	2.8582	6.73
Nisan	2.0671	0.9490	1.8256	3.0557	8.31	1.8265	0.9445	1.4723	2.8948	6.46
Mayıs	2.0842	1.1225	1.6167	3.3876	10.02	1.9368	1.0050	1.8425	3.1246	8.50
Haziran	2.3448	1.2577	1.8230	3.8054	14.24	2.0486	1.0076	1.7236	3.1487	8.64
Temmuz	2.7986	1.2625	2.4983	4.0986	20.31	2.2514	1.0652	1.9494	3.3837	11.04
Ağustos	2.5287	1.2497	2.1194	3.8976	16.34	2.2180	1.1546	1.7768	3.5300	11.65
Eylül	2.0526	1.0685	1.6443	3.2668	9.23	1.8987	0.9250	1.6092	2.9019	6.81
Ekim	1.8065	1.0037	1.3508	3.0029	6.79	1.6273	0.7575	1.4246	2.4237	4.10
Kasım	1.5313	0.7263	1.3235	2.3047	3.48	1.6706	0.8224	1.4046	2.5690	4.69
Aralık	2.0285	1.0030	1.6994	3.1275	8.43	1.5722	0.8373	1.2315	2.5394	4.25
Yıllık	2.0483	1.1131	1.5705	3.3535	9.63	1.8658	0.9553	1.5177	2.9396	6.81

Sonuç olarak bu ilk uygulamalı analizde hem parametre tahmin yöntemlerinden en yüksek olabilirlik metodu hemde grafik metot için iki parametrelili Weibull dağılımın Bilecik verileri üzerinden kestirimi yapıp aylık ve yıllık analizlerle karşılaştırılmıştır. Genel olarak 2013-2014 yılları arası ortalama hız ve güç yoğunluğu değerleri yaz aylarında yüksek görülmüştür. Fakat enerji üretimine geçilecek olursa sadece ortalama hız ve enerji yoğunluğu değil bunun yanında verilerin nasıl dağıldığı da önem taşımaktadır.

Bilecik ili 2014 yılı verilerine göre rüzgar hızı verilerinin olasılık yoğunluk dağılımlarının mevsimsel değişimi Şekil 4.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Mevsimsel rüzgar hızı verilerinin Bilecik ili için olasılık dağılımları.

Verilerin mevsimsel olarak Weibull dağılımına uyumu incelendiğinde, aylık ve yıllık analizlerden farklı olarak Justus ve arkadaşları tarafından önerilen parametre tahminin yanı sıra Lysen tarafından önerilen ampirik yaklaşımlar da kullanılmıştır (Justus, vd., 1978; Lysen 1983).

Justus ve arkadaşları tarafından önerilen metotta (MJ), şekil (k) ve ölçek (c) parametrelerinin hesabı sırasıyla Denklem 4.12 ve 4.13'de verilmiştir.

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}} \right)^{-1.086} \quad (4.12)$$

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1+1/k)}. \quad (4.13)$$

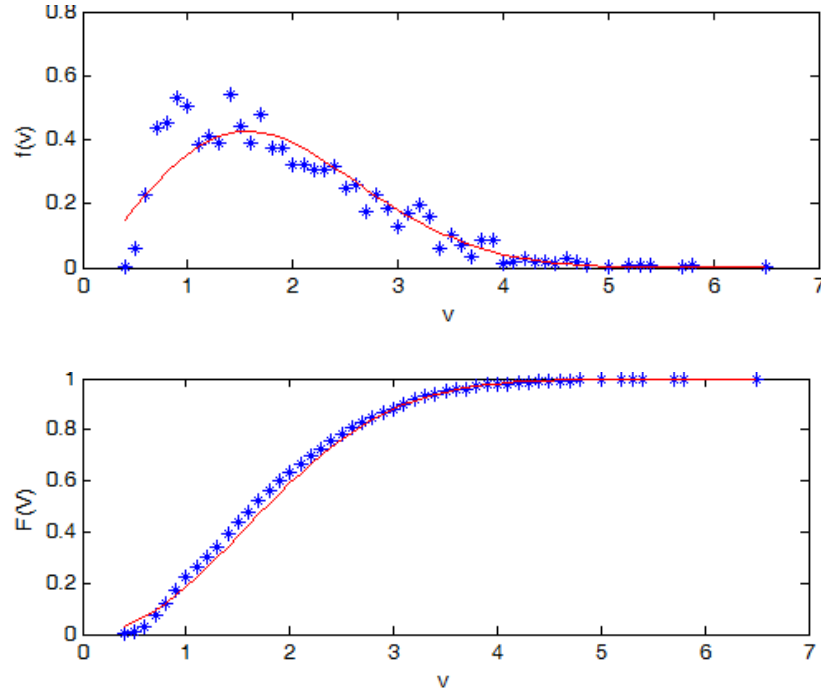
Aynı şekil parametresi hesabına sahip olan Lysen'in metodunda (ML) ise ölçek parametresinin tahmini Denklem 4.14'e göre elde edilir. Mevsimsel analizlerde elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3. de gösterilmiştir (Dokur, vd., 2016 d).

$$c = \bar{v} \left(0.568 + \frac{0.433}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (4.14)$$

Çizelge 4.3. Parametre tahmin yöntemlerinin mevsimsel veriler için karşılaştırılmalı sonuçları.

Mevsimler	Metotlar	k	c	RMSE
Kış	MLM	2.0142	1.8916	0.0331
	GM	2.4506	2.0790	0.0791
	MJ	1.9867	1.8815	0.0311
	ML	1.9867	1.4773	0.0710
İlkbahar	MLM	2.1417	2.1153	0.0269
	GM	2.5044	2.2630	0.0648
	MJ	2.1288	2.1067	0.0252
	ML	2.1288	1.6516	0.0833
Sonbahar	MLM	2.1590	1.9547	0.0336
	GM	2.5612	2.0595	0.0669
	MJ	2.1423	1.9459	0.0318
	ML	2.1423	1.5255	0.0825
Yaz	MLM	2.1131	2.4549	0.0290
	GM	2.5628	2.5602	0.0613
	MJ	2.0949	2.4443	0.0271
	ML	2.0949	1.9165	0.0863

Çizelge 4.3'den de görüldüğü üzere mevsimsel veriler için Justus metodunun diğer yöntemlere göre daha hassas sonuç verdiği görülmektedir. Justus metodu ile elde edilen parametreler ile gerçekleştirilen Weibull dağılımının uyumu örnek bir mevsim üzerinden Şekil 4.3 gösterilmektedir.



Şekil 4.3. İlkbahar ayı için olasılık ve kümülatif olasılık yoğunluk dağılımları.

4.2. Ters Weibull Dağılımı ve Karşılaştırmalı Rüzgar Hızı Analizleri ve Uygulamaları

Ters Weibull dağılımı ilk kez 2016 yılında Akgül ve arkadaşları tarafından mevsimsel rüzgar hızı modellemesi amacıyla önerilmiştir (Akgül vd., 2016). Yapılan çalışmalarında iki parametrelili Weibull ve ters Weibull dağılımları 2009 yılına ait 10m yükseklikte ki Bursa ve Sakarya rüzgar hızları verileri için mevsimsel olarak analiz edilmiştir. Ters Weibull dağılımının Bursa ili kış ve sonbahar mevsimlerinde, Sakarya ili içinde tüm mevsimlerde Weibull dağılımına göre daha iyi sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir.

Tez çalışmasının ikinci fazı kapsamında ters Weibull dağılımının sadece mevsimsel olarak performansı değil aynı zamanda aylık olarak da performans analizleri ülkemizin 6 farklı bölgesi için incelenmiştir.

Ters Weibull dağılımının olasılık yoğunluk ve kümülatif olasılık yoğunluk fonksiyonları sırasıyla Denklem 4.15 ve 4.16'da gösterilmiştir.

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

$$F_{TWD}(v) = e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^{-k}}. \quad (4.16)$$

Burada, iki parametrelili Weibull dağılımında olduğu gibi parametreler şekil (k) ve ölçek (c) parametreleri olarak ifade edilmiştir.

Ters Weibull dağılımının parametre kestirimi olarak en yüksek olabilirlik metodu kullanılmıştır. Buna göre Denklem 4.17 'de verilen likelihood fonksiyonunda ters Weibull dağılımı yerine koyulup her iki tarafın doğal logaritması alındığında Denklem 4.19 elde edilir.

$$L(k, c) = \prod_{i=1}^n f(v_i; \theta) \quad (4.17)$$

$$L(k, c) = \prod_{i=1}^n kc^{-k} v_i^{k-1} \exp(-c^{-k} v_i^k) \quad (4.18)$$

$$\ln L(c, k) = n \ln k + n \ln c - (k+1) \sum_{i=1}^n \ln v_i - c^k \sum_{i=1}^n v_i^{-k} \quad (4.19)$$

Şekil ve ölçek parametrelerine göre türevleri alınıp sıfıra eşitlendiğinde Denklem 4.20 ve 4.21 elde edilir.

$$\frac{\partial \ln L(k, c)}{\partial k} = \frac{n}{k} + n \ln c - \sum_{i=1}^n \ln v_i - c^k \ln c \sum_{i=1}^n v_i^{-k} + c^k \sum_{i=1}^n v_i^{-k} \ln v_i = 0 \quad (4.20)$$

$$\frac{\partial \ln L(k, c)}{\partial c} = \frac{nk}{c} - kc^{k-1} \sum_{i=1}^n v_i^{-k} = 0 \quad (4.21)$$

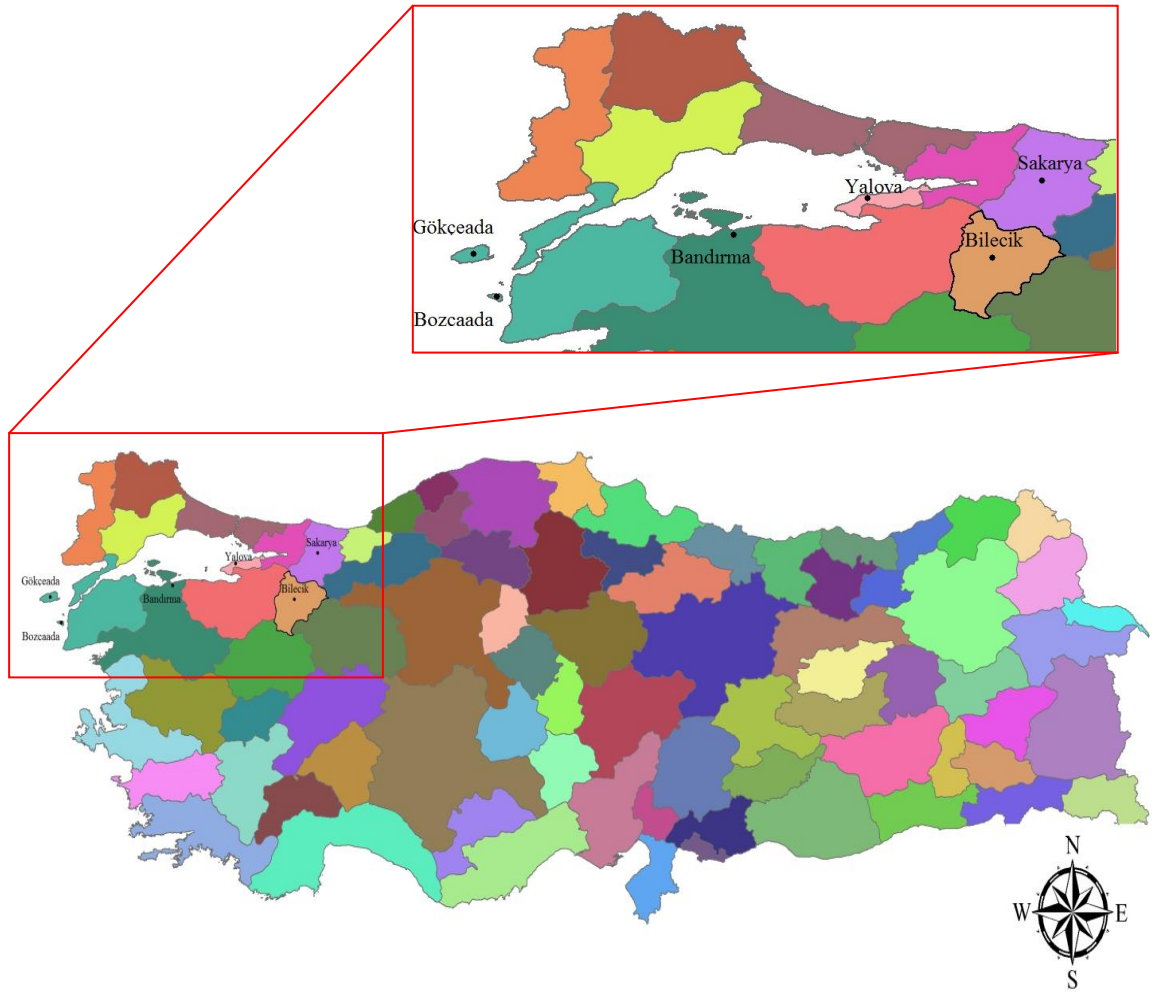
Elde edilen denklemler Newton-Raphson iterasyon yöntemi ile çözülmüş ve parametreler Denklem 4.22 ve 4.23'e göre hesaplanmıştır.

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n v_i^{-k}}{\sum_{i=1}^n \ln v_i \sum_{i=1}^n v_i^{-k} - n \sum_{i=1}^n v_i^{-k} \ln v_i} \quad (4.22)$$

$$c = \left(\frac{n}{\sum_{i=1}^n v_i^{-k}} \right)^{1/k} \quad (4.23)$$

Çalışmamızda ayrıca rüzgar hızı modellenmesinde iki parametrelili Weibull dağılımı gibi sıklıkla kullanılan yöntemlerden biri olan Rayleigh dağılımında model karşılaştırmalarında kullanılmıştır. Rayleigh dağılımı şekil parametresinin sabit olduğu ($k=2$), iki parametrelili Weibull dağılımının özel bir formudur.

Tez çalışmasının ikinci fazı kapsamında gerçekleştirilen bu bölümde, Marmara bölgesinde yer alan ortalama 2-3 m/s ve 5-6 m/s rüzgar hızı rejimlerine sahip 6 farklı bölge için analiz edilmiştir (Şekil 4.4).

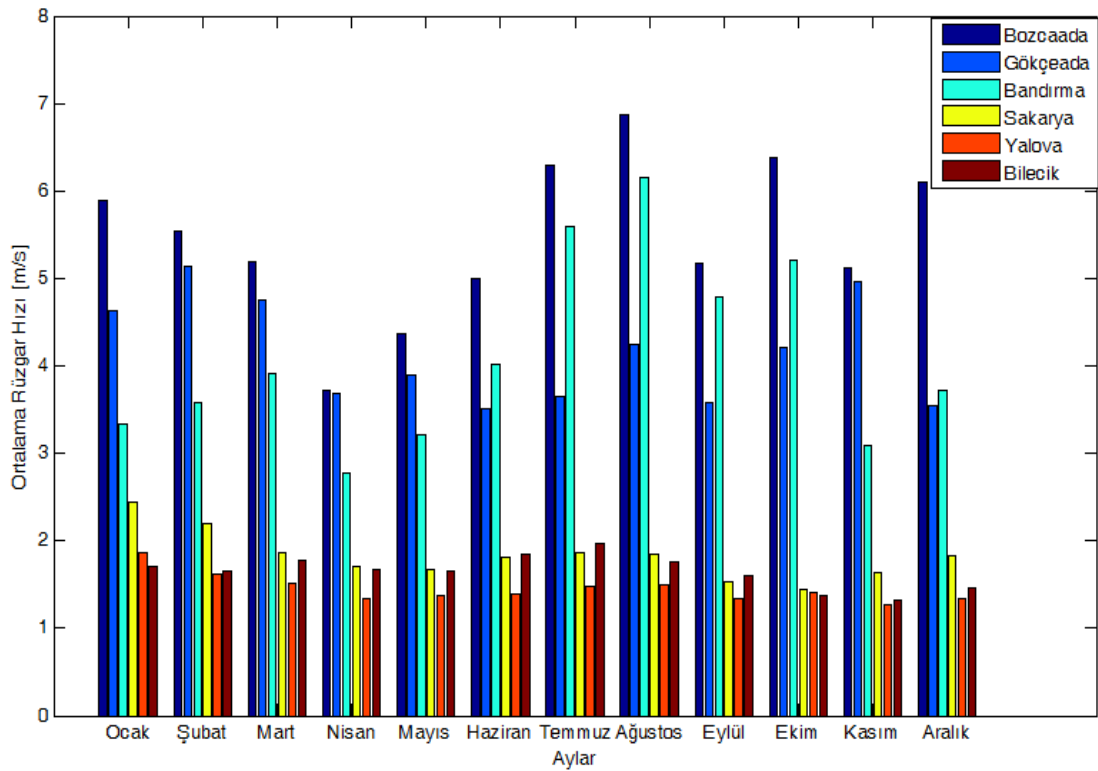


Şekil 4.4. Rüzgar hızı verilerinin analizinde kullanılan bölgeler.

Ters Weibull, Rayleigh ve iki parametrelili Weibull dağılımları Ekim 2015-Aralık 2016 saatlik rüzgar hızı verileri için bu altı farklı bölge için karşılaştırmalı olarak modellenmiştir. Bölgelere ait coğrafik bilgiler ve rüzgar hızı periyotları Çizelge 4.4'de gösterilmiştir. Bölgelere ait ortalama aylık rüzgar hızı değişimleri Şekil 4.5'de gösterilmiştir (Dokur, vd., 2016a; 2017 c).

Çizelge 4.4. Bölgelere ait coğrafik bilgiler ve rüzgar hızı periyotları.

İstasyon	Enlem (°K)	Boylam (°D)	Rakım (m)	Rüzgar Hızı Periyodu
Bandırma	40° 21'	27° 58'	20	Ekim 2015-Eylül 2016
Sakarya	40° 46'	30° 22'	31	Ekim 2015-Eylül 2016
Yalova	40° 39'	29° 15'	30	Ekim 2015-Eylül 2016
Bozcaada	39° 48'	26° 02'	20	Ekim 2015-Eylül 2016
Gökçeada	40° 10'	25° 50'	48	Ekim 2015-Eylül 2016
Bilecik	40° 05'	30° 05'	850	Ekim 2015-Eylül 2016



Şekil 4.5. Ortalama rüzgar hızı değerlerinin aylık değişimleri.

Şekil 4.5'de de gösterilen ortalama rüzgar hızı profillerine bakıldığında; Bozcaada, Gökçeada ve Bandırma yüksek rüzgar hızı rejimine sahipken, Bilecik, Yalova ve Sakarya düşük rüzgar hızı profiline sahip bölgeler olarak yer almaktadır. Bu sebeple yapılan analizlerde hem düşük hemde yüksek rejim potansiyeline sahip bölgeler karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Ters Weibull dağılımı (TWD), Rayleigh dağılımı (RD) ve iki parametrelili Weibull dağılımı (WD) ile yapılan aylık parametre kestirimi sonuçları ve performans kriteri karşılaştırmalı olarak 6 bölge için Çizelge 4.5'de gösterilmiştir. Buna ek olarak mevsimsel analiz sonuçları da Çizelge 4.6'da sunulmuştur.

Yapılan analiz sonuçlarına göre Bandırma bölgesi için iki parametrelili Weibull dağılımının genel olarak uyumlu sonuç verdiği gözlemlenirken, sadece Ocak ve Şubat aylarında Rayleigh dağılım fonksiyonunun diğer dağılım fonksiyonlarına göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir.

Sakarya ve Yalova bölgeleri için hem iki parametrelili Weibull dağılımının hemde ters Weibull dağılımının Rayleigh dağılım fonksiyonuna göre daha iyi modelleme imkanını bizlere sunduğu, model performans kriterleri üzerinden görülmektedir. Özellikle aylık yapılan analizlerde sekiz aylık periyotta ters Weibull dağılımının Yalova bölgesi için model sonuçları daha uyumlu olmaktadır. Bilecik, Gökçeada ve Bozcaada verilerinde ise iki parametrelili Weibull dağılımının modelleme yeteneği diğer yöntemlere göre daha iyidir.

Mevsimsel analizlerde sadece Yalova ve Sakarya bölgeleri için kış ve yaz mevsimlerinde ters Weibull dağılımının uyumlu sonuç verdiği gözlemlenirken genel olarak tüm diğer bölgelerde iki parametrelili Weibull dağılımı düşük hata oranıyla iyi sonuçlar verdiği görülebilir.

Sonuç olarak bu bölümde yapılan tüm analizler gösteriyor ki, mevsimsel analiz için önerilen ters Weibull dağılımının aylık analizlerde de farklı rüzgar hızı profili ve karakteristiğine sahip bölgeler için uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Buna ek olarak, modellerin hata performans kriterleri karşılaştırıldığında Marmara bölgesinde yer alan altı farklı lokasyonlar için Rayleigh dağılım fonksiyonunun kullanımının uygun olmadığı da ayrıca gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.5. 3 farklı yöntem ve 6 farklı bölge için karşılaştırmalı aylık sonuçlar.

Aylar	Metotlar	BANDIRMA			SAKARYA			BOZCAADA			YALOVA			GÖKÇEADA			BİLECİK		
		k	c	RMSE	k	c	RMSE	k	c	RMSE	k	c	RMSE	k	c	RMSE	k	c	RMSE
Ocak	WD	1.5623	3.7486	0.0582	1.9682	2.7627	0.0919	1.8045	6.6232	0.0307	1.7410	2.3207	0.0880	1.3428	5.0590	0.0418	1.6461	1.9157	0.0953
	TWD	1.1515	2.9619	0.0600	1.1924	1.8577	0.0823	0.9265	3.7083	0.0475	1.0463	1.4903	0.0794	0.8861	3.2446	0.0445	1.0408	1.4973	0.1001
	RD	2.0000	2.8730	0.0544	2.0000	1.9608	0.1013	2.0000	4.8133	0.0418	2.000	1.7013	0.1090	2.0000	4.1057	0.0609	2.000	1.4372	0.1138
Şubat	WD	1.4723	3.9865	0.0526	1.9261	2.4819	0.0755	1.6015	6.1965	0.0367	2.1647	1.8286	0.1189	1.3051	5.5598	0.0428	1.8733	1.8738	0.0837
	TWD	1.0543	3.0466	0.0542	1.3922	1.9224	0.0726	0.9071	3.6235	0.0407	1.5447	1.5618	0.1301	0.7942	3.0087	0.0459	1.2361	1.4339	0.0861
	RD	2.0000	3.1593	0.0497	2.0000	1.7710	0.0744	2.0000	4.6698	0.0521	2.000	1.2713	0.1369	2.0000	4.4978	0.0666	2.000	1.3470	0.1008
Mart	WD	1.4180	4.3319	0.0450	2.0228	2.1096	0.0826	1.7867	5.8550	0.0325	2.1652	1.7105	0.1569	1.5189	5.2773	0.0401	1.9676	2.0109	0.0586
	TWD	1.0324	3.3361	0.0483	1.3296	1.6490	0.0890	1.1443	3.8262	0.0365	1.5903	1.4862	0.1680	0.7970	2.8500	0.0495	1.0602	1.3871	0.1043
	RD	2.0000	3.4856	0.0544	2.0000	1.4878	0.1089	2.0000	4.2631	0.0433	2.000	1.1888	0.1615	2.0000	4.0362	0.0581	2.000	1.4274	0.1136
Nisan	WD	1.4740	3.0964	0.0656	1.9425	1.9414	0.1078	1.6364	4.1676	0.0460	2.1101	1.5135	0.1542	1.2784	3.9648	0.0544	1.9534	1.8862	0.0809
	TWD	1.1083	2.5888	0.0753	1.3709	1.5494	0.1102	0.8152	2.2832	0.0601	1.4875	1.3092	0.1703	0.8169	2.3124	0.0629	1.2219	1.4635	0.1021
	RD	2.0000	2.4504	0.0685	2.0000	1.3825	0.1190	2.0000	3.1097	0.0702	2.000	1.0575	0.1692	2.0000	3.2268	0.0931	2.000	1.3414	0.1189
Mayıs	WD	1.8045	3.6287	0.0507	2.1874	1.8982	0.1076	2.0583	4.9181	0.0413	2.4932	1.5593	0.1907	1.5182	4.3269	0.0460	2.0486	1.8816	0.0769
	TWD	1.2190	2.6545	0.0528	1.4121	1.4535	0.1083	0.8346	2.5515	0.0804	1.6508	1.1059	0.1504	0.9244	2.5723	0.0553	1.2414	1.4124	0.1036
	RD	2.0000	2.6356	0.0606	2.0000	1.3171	0.1434	2.0000	3.4576	0.0710	2.000	1.0614	0.2423	2.0000	3.3112	0.0692	2.000	1.3234	0.1301
Haziran	WD	1.6328	4.5150	0.0477	2.0188	2.0526	0.1027	1.6549	5.5660	0.0355	2.4608	1.5837	0.1890	1.5583	3.9031	0.0855	2.1354	2.0912	0.0619
	TWD	1.1530	3.1024	0.0520	1.3476	1.5468	0.0891	0.8038	2.6544	0.0554	1.7143	1.3308	0.1866	0.8461	1.7734	0.1209	1.2414	1.4124	0.1011
	RD	2.0000	3.3790	0.0639	2.000	1.4483	0.1167	2.000	4.1143	0.0629	2.000	1.0798	0.2177	2.0000	2.8753	0.1340	2.000	1.4590	0.1336
Temmuz	WD	2.5125	6.2834	0.0453	1.8042	2.1176	0.1294	2.5944	7.0754	0.0375	2.0939	1.6823	0.1659	2.0412	4.0798	0.0453	2.6047	2.2152	0.0725
	TWD	1.1490	3.1454	0.0837	1.3756	1.5461	0.1063	0.9914	3.0676	0.0816	1.5833	1.1814	0.1477	1.1490	3.1454	0.0837	1.2783	1.3162	0.1720
	RD	2.0000	4.3024	0.0864	2.000	1.5390	0.1210	2.000	4.8267	0.0756	2.000	1.1535	0.2202	2.0000	4.3024	0.0864	2.000	1.5039	0.1897
Ağustos	WD	2.6025	6.9199	0.0353	1.9255	2.0917	0.1211	2.7271	7.7120	0.0349	2.3836	1.6882	0.1506	2.2751	4.7470	0.0537	2.3304	2.0004	0.0934
	TWD	1.1677	3.4542	0.0732	1.5350	1.6011	0.1116	0.9470	3.5991	0.0743	1.5166	1.2609	0.1452	0.8318	2.0100	0.1113	1.3071	1.2458	0.1523
	RD	2.0000	4.7124	0.0734	2.000	1.4928	0.1171	2.000	5.2297	0.0702	2.000	1.1575	0.2093	2.0000	3.2934	0.1062	2.000	1.3751	0.1750
Eylül	WD	1.8575	5.3794	0.0542	1.7849	1.7416	0.1427	2.0247	5.8461	0.0336	2.3544	1.5084	0.1599	2.0404	4.0454	0.0615	2.2881	1.8204	0.0722
	TWD	1.0928	2.8811	0.0678	1.4073	1.4738	0.1509	0.8056	2.7155	0.0683	1.5706	1.1682	0.1547	0.8435	1.7806	0.1060	1.1278	1.1483	0.1646
	RD	2.0000	3.8617	0.0833	2.000	1.2716	0.1211	2.000	4.1237	0.0608	2.000	1.0351	0.2196	2.0000	2.8505	0.1115	2.000	1.2556	0.1816
Ekim	WD	1.8129	5.8586	0.0479	1.9550	1.6481	0.1177	2.0730	7.2087	0.0353	2.2958	1.6051	0.1568	1.7396	4.7091	0.0459	2.3304	1.5460	0.0683
	TWD	1.1690	3.5906	0.0580	1.4277	1.4271	0.1419	1.1342	3.9799	0.0519	1.5495	1.2293	0.1313	0.8177	2.2914	0.0726	1.1850	0.9874	0.1680
	RD	2.0000	4.2331	0.0717	2.000	1.1719	0.1245	2.000	5.0678	0.0554	2.000	1.1052	0.1891	2.0000	3.4331	0.0787	2.000	1.0632	0.2048
Kasım	WD	1.4656	3.4498	0.0640	1.6827	1.8591	0.1344	1.6233	5.7244	0.0464	2.0936	1.4494	0.2007	1.5134	5.5136	0.0398	1.8810	1.5050	0.0939
	TWD	1.1569	2.9564	0.0755	1.3118	1.7153	0.1580	1.1590	3.7346	0.0485	1.4843	1.3278	0.2201	0.8072	2.9672	0.0507	0.9168	0.9942	0.1740
	RD	2.0000	2.7327	0.0704	2.000	1.3879	0.1094	2.000	4.2814	0.0623	2.000	1.0139	0.1977	2.0000	4.2350	0.0531	2.000	1.0814	0.1301
Aralık	WD	1.2553	4.0254	0.0945	1.5851	2.0589	0.1222	1.9482	6.8862	0.0365	2.1847	1.5250	0.1879	1.1198	3.7053	0.0597	1.9703	1.6487	0.0893
	TWD	1.0727	2.9619	0.0977	1.2511	1.8612	0.1408	1.0950	4.0143	0.0408	1.5062	1.2830	0.1824	0.8141	2.4122	0.0713	1.1334	1.1267	0.1112
	RD	2.0000	3.3966	0.1185	2.000	1.5742	0.1079	2.000	4.8969	0.0508	2.000	1.0584	0.1977	2.0000	3.2546	0.1087	2.000	1.1699	0.1371

Çizelge 4.6. Mevsimsel analiz sonuçları.

Mevsim	Metotlar	Bandırma			Sakarya			Bozcaada			Yalova			Gökçeada			Bilecik		
		k	c	RMSE	k	c	RMSE	k	c	RMSE	k	c	RMSE	k	c	RMSE	k	c	RMSE
Kış	WD	1.4113	3.9266	0.0490	1.7849	2.4241	0.0773	1.7735	6.5834	0.0192	2.1817	1.8227	0.1123	1.2276	4.7335	0.0328	1.7828	1.8118	0.0745
	TWD	1.0441	3.3531	0.0575	1.1231	1.8980	0.0759	0.8758	4.0794	0.0321	1.2558	1.3670	0.1153	0.7885	3.2038	0.0407	1.0384	1.5177	0.0973
	RD	2.0000	3.1500	0.0586	2.0000	1.7674	0.0805	2.0000	4.7969	0.0364	2.000	1.2660	0.1514	2.0000	3.9763	0.0648	2.000	1.3222	0.0939
İlkbahar	WD	1.4923	3.6876	0.0375	2.0330	1.9842	0.0781	1.7500	4.9851	0.0201	2.3103	1.6026	0.1227	1.4162	4.5515	0.0317	1.9833	1.9267	0.0511
	TWD	1.0247	3.5010	0.0558	1.3079	1.7188	0.0996	0.7914	3.0610	0.0462	1.4690	1.3528	0.1338	0.7968	2.8871	0.0419	1.0481	1.4708	0.0978
	RD	2.0000	2.8972	0.0425	2.0000	1.3977	0.1007	2.0000	3.6484	0.0427	2.000	1.1022	0.1684	2.0000	3.5706	0.0596	2.000	1.3651	0.1050
Yaz	WD	2.0652	5.9418	0.0306	1.9877	1.8021	0.1177	2.1758	6.8172	0.0250	2.4038	1.6524	0.1494	1.8835	4.2572	0.0526	2.3310	2.1039	0.0541
	TWD	1.1310	3.3237	0.0528	1.3756	1.5461	0.1351	0.7948	2.9871	0.0641	1.5007	1.2856	0.1418	0.8177	2.2732	0.0808	1.2414	1.4124	0.1192
	RD	2.0000	4.1763	0.0636	2.0000	1.2762	0.1333	2.0000	4.7532	0.0595	2.000	1.1313	0.2014	2.0000	3.0452	0.0944	2.000	1.4469	0.1497
Güz	WD	1.6017	4.8877	0.0398	1.8630	1.7863	0.0981	1.8516	6.2764	0.0233	2.2305	1.5224	0.1445	1.6613	4.6731	0.0207	2.1075	1.6247	0.0489
	TWD	1.0411	3.4317	0.0435	1.3118	1.7153	0.1384	0.7867	3.2689	0.0442	1.4516	1.3792	0.1692	0.7950	2.9146	0.0517	0.9098	1.0730	0.1692
	RD	2.0000	3.6696	0.0631	2.0000	1.2872	0.0933	2.0000	4.5157	0.0457	2.000	1.0527	0.1705	2.0000	3.4659	0.0547	2.000	1.1361	0.1464

4.3. Riemann Geometri Tabanlı Yeni Bir Parametre Tahmin Metodunun Geliştirilmesi ve Uygulaması

İki parametrelili Weibull dağılımı için literatürde farklı parametre tahmin yöntemlerinin kullanıldığı bir önceki bölümlerde uygulamalı olarak gösterilmişti. Bu bölümde, tez çalışmasının üçüncü fazını içeren Riemann geometrisi tabanlı yeni bir bilgi geometrisi metodu (Information Geometry Method-IGM) parametrelerin kestirimi için geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda öklid geometrisinde yer almayan mimariye sahip Fisher metrik veya bilgi metriği olarak da isimlendirilen Riemann metriği kullanılmıştır. Ayrıca, Fisher matrisinden elde edilen diferansiyel denklemler nümerik olarak çözülmüştür. Bilgi geometrisi metodu (IGM), literatürde yer alan grafik metodu (GM), en yüksek olasılık metodu (MLM), güç yoğunluğu metodu (PDM) ve amprik metotlar (MJ-ML) ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Matematiğin yeni bir kolu olan bilgi geometrisinin temel fikri öklid olmayan geometrinin yöntem ve tekniklerini stokastik süreç ve olasılık teorilerine uygulamaktır. Riemann geometrisi tabanlı bilgi geometrisi öklid geometri tekniğinin kesin doğru doğrulukta olmadığını da göstermektedir. Bir sonraki bölümde Finsler geometrisi ele alındığında, öklid geometrisine ilişkin bu kavramlar daha detaylı olarak ele alınacaktır.

Galanis ve arkadaşları Kuzey Atlantik okyanusunda dalga boylarının karakteristiğini bilgi geometrisi tabanlı yeni bir yaklaşım ile analiz etmişlerdir. Çalışmalarında benzer komşuluklar ve geodeziklerin kullanılması ile iki farklı senaryo yaklaşımı geliştirmişlerdir (Galanis, vd., 2012).

Dalga boyu karakteristiğinin belirlenmesinde en önemli etkenin rüzgar hızı olması sebebiyle Galanis ve arkadaşlarının çalışmasında da iki parametrelili Weibull dağılımı kullanılarak modellemeler yapılmıştır. Tez çalışması kapsamında da, bu bölümde benzer analizleri rüzgar hızı verilerine uygulayarak geodeziklerin kullanımı senaryosuna uygun olarak hesaplamalar yapılmıştır.

Olasılık dağılım aileleri; mesafe gibi geometrik ifadeler, Riemann metrikleri, eğrikler ve manifoldlar olarak tanımlanmaktadır. Bir n boyutlu olasılık dağılım ailesinin istatistiksel manifoldları olan S , Denklem 4.24 gibi ifade edilebilir:

$$S = \{p_{\zeta} = p(v, \zeta) \mid \zeta = [\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n] \in \Xi\}. \quad (4.24)$$

Bir istatistiksel manifoldtaki geometriksel model Fisher Information Matrisi ile tanımlanabilir. Burada ζ , bir $n \times n$ matris $G(\zeta) = [g_{ij}(\zeta)]$ tanımlanmaktadır (Amari, 1985; Amari ve Nagaoka, 2000; Arwini ve Dodson, 2007).

$$g_{ij}(\zeta) = E_{v|\zeta}[\partial_i \ell(v; \zeta) \partial_j \ell(v; \zeta)] = \int \partial_i \ell(v; \zeta) \partial_j \ell(v; \zeta) p(v; \zeta) dv, \quad i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (4.25)$$

Burada ℓ , log-likelihood fonksiyonu Denklem 4.26'da verilmektedir.

$$\ell(v, \zeta) = \ell_\zeta(x) = \log[p(v, \zeta)] \quad (4.26)$$

Denklem 4.27, p dağılımında beklenen değeri göstermektedir.

$$E_{x|\zeta}[f] = \int f(v) p(v; \zeta) dv. \quad (4.27)$$

Fisher metrik yada Information metrik, Riemannian metrik olarak da tanımlanmaktadır. Bu modelin özellikleri Levi-Civita koneksiyonlarının Christoffel sembolleri (Γ_{jk}^i) ile tanımlanmaktadır ki Fisher metriklerine göre bu koneksiyonların çözümü:

$$\sum_{i=1}^2 g_{hi} \Gamma_{jk}^i = \Gamma_{jk,h}, \quad (h=1, 2). \quad (4.28)$$

Burada

$$\Gamma_{jk,h}(\zeta) = E_\zeta \left[\left(\partial_j \partial_k \ell_\zeta + \frac{1}{2} \partial_j \ell_\zeta \partial_k \ell_\zeta \right) (\partial_h \ell_\zeta) \right], \quad i, j, h = 1, 2, \dots, n. \quad (4.29)$$

S istatistiksel manifoldunun iki elementi olan f_1 ve f_2 arasındaki minimum uzaklık, bu iki elementi birbirine bağlayan asgari uzunluk eğrisine karşılık gelen ω geodeziğine göre tanımlanır. Bu da koneksiyonlar arasındaki minimum eğriyi vermektedir. 2. dereceden adi diferansiyel denklem sistemini sağlayan böyle bir eğri Denklem 4.30'da gösterilmiştir.

$$\omega = (\omega_i): \mathbb{R} \rightarrow S$$

$$\omega_i''(t) + \sum_{j,k=1}^n \Gamma_{jk}^i(t) \omega_j'(t) \omega_k'(t) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4.30)$$

İlk durum koşulları altında $\omega(0) = f_1$, $\omega(1) = f_2$.

İki parametrelili Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu Denklem 4.1'de verilmişti. İki parametrelili eğri ailesine sahip olan Weibull dağılımı 2-boyutlu istatistiksel manifold olarak Denklem 4.31'de ki gibi düşünülebilir.

$$\xi = [k, c], \Xi = \{[k, c]; k, c > 0\}$$

$$p(v; \xi) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} \quad (4.31)$$

Buna göre log-likelihood fonksiyonu Denklem 4.32'de ki gibi olur.

$$l(v, \xi) = \log(p(v, \xi)) = \log k - \log c + (k-1)(\log v - \log c) - \left(\frac{v}{c} \right)^k. \quad (4.32)$$

Tüm bu adımlar kullanılarak hesaplanan Fisher information matrisi Denklem 4.33'de verilmektedir :

$$G(k, c) = \begin{bmatrix} k^2 c^2 & c(1-\gamma) \\ c(1-\gamma) & \frac{6(\gamma-1)^2 + \pi^2}{6k^2} \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Burada $\gamma = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\sum_{k=1}^n 1/k - \ln n \right) \cong 0.577215$ Euler Gammadır.

Denklem 4.29 ile çözümü tanımlanan Fisher metrikleri ile elde edilen Levi-Civita koneksiyonlarının Christoffel sembolleri Denklem 4.34'da verilmektedir.

$$\begin{aligned}
\Gamma_{11}^1 &= \frac{6\left(\gamma k - k - \frac{\pi^2}{6}\right)}{\pi^2 c}, \\
\Gamma_{11}^2 &= \frac{-k^3}{\pi^2 c^2}, \\
\Gamma_{21}^1 &= \Gamma_{12}^1 = \frac{6\left(\gamma^2 - 2\gamma + \frac{\pi^2}{6} + 1\right)}{\pi^2 k}, \\
\Gamma_{21}^2 &= \Gamma_{12}^2 = \frac{6k(1-\gamma)}{\pi^2 c}, \\
\Gamma_{22}^1 &= -\frac{6(1-\gamma)c\left(\gamma^2 - 2\gamma + \frac{\pi^2}{6} + 1\right)}{\pi^2 k^3}, \\
\Gamma_{22}^2 &= -\frac{6\left(\gamma^2 - 2\gamma + \frac{\pi^2}{6} + 1\right)}{\pi^2 k}.
\end{aligned} \tag{4.34}$$

Denklem 4.34, Denklem 4.30'da yerine yazılırsa;

$$\begin{aligned}
\omega_1''(t) + \frac{6\left(\gamma k - k - \frac{\pi^2}{6}\right)}{\pi^2 c} \left(\omega_1'(t)\right)^2 + \frac{12\left(\gamma^2 - 2\gamma + \frac{\pi^2}{6} + 1\right)}{\pi^2 k} \omega_1'(t) \omega_2'(t) - \frac{6(1-\gamma)c\left(\gamma^2 - 2\gamma + \frac{\pi^2}{6} + 1\right)}{\pi^2 k^3} \left(\omega_2'(t)\right)^2 &= 0 \\
\omega_2''(t) - \frac{k^3}{\pi^2 c^2} \left(\omega_1'(t)\right)^2 + \frac{12k(1-\gamma)}{\pi^2 c} \omega_1'(t) \omega_2'(t) - \frac{6\left(\gamma^2 - 2\gamma + \frac{\pi^2}{6} + 1\right)}{\pi^2 k} \left(\omega_2'(t)\right)^2 &= 0.
\end{aligned} \tag{4.35}$$

Şekil ve ölçek parametreleri Denklem 4.35'in nümerik çözümü ile elde edilebilir. Tüm bu analiz çalışmalarında Mathematica yazılım ortamında NDSolve ile *shooting metot* kullanılarak çözüme ulaşılmıştır.

Tez çalışması kapsamında bilgi geometrisi metodu; grafik metot (GM), en yüksek olabilirlik metodu (MLM), Justus ve Lysenin ampirik metotları (MJ ve ML) ve Denklem 4.36'da verilen Akdağ ve Dinler tarafından önerilen güç yoğunluğu metodu (PDM) olmak üzere altı farklı yöntem ile karşılaştırılarak sonuçları yorumlanmıştır.

Güç yoğunluğu modelinde şekil ve ölçek parametresinin hesabı Denklem 4.37'de gösterilmiştir (Akdağ ve Dinler, 2009).

$$k = 1 + \frac{3.69}{(E_{pf})^2}$$

$$c = \frac{\bar{V}}{\Gamma(1+1/k)}$$
(4.36)

Enerji örüntü faktörü olarak ifade edilen E_{pf} Denklem 4.37'e göre hesaplanmıştır.

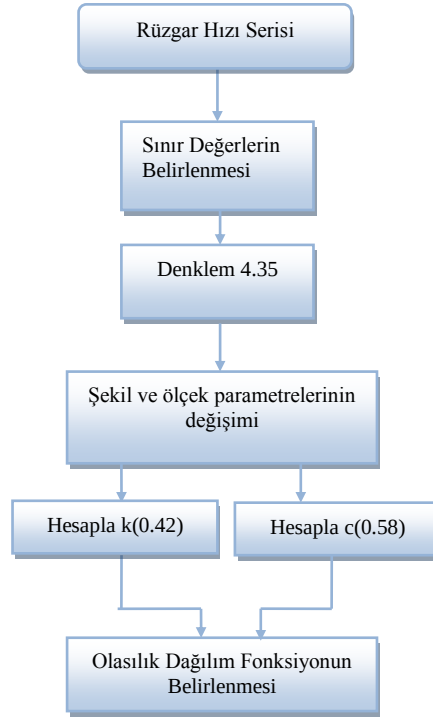
$$E_{pf} = \frac{\bar{V}^3}{(\bar{V})^3} = \frac{\Gamma(1+3/k)}{\Gamma(1+1/k)^3}$$
(4.37)

Bilgi geometrisi metotunda, Bilecik ili örnek rüzgar hızı verisi üzerinden karşılaştırmalı analiz yapıldığında öncelikli olarak Denklem sistemi 4.35'in çözümünün yapılabilmesi için sınır koşulları belirlenmelidir. Denklem sisteminin sınır koşulları, Bilecik ili üç yıllık rüzgar hızı verileri kullanılarak, en yüksek olasılık metotundan $k(0)=1.9236$ ve $c(0)=2.3030$ ve grafik metotdan, $k(1)=2.3588$ ve $c(1)=2.6292$ olarak seçilmiştir. Bu iki parametre tahmin metoduyla hesaplanmış dağılımlar arasındaki uzaklığı veren minimum uzunluklu eğri Denklem sistemi 4.38'in çözümü olan iki boyutlu bir $w = (w_1, w_2)$ eğrileridir.

$$\begin{aligned} \omega_1''(t) - 0.648896(\omega_1'(t))^2 + 1.1527\omega_1'(t)\omega_2'(t) - 0.15166(\omega_2'(t))^2 &= 0 \\ \omega_2''(t) - 0.135974(\omega_1'(t))^2 + 0.42936\omega_1'(t)\omega_2'(t) - 0.576349(\omega_2'(t))^2 &= 0 \end{aligned}$$
(4.38)

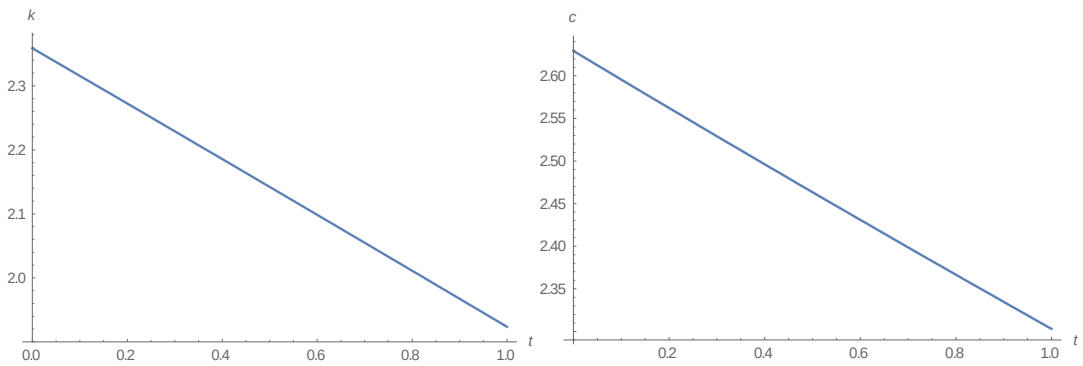
$$\omega(0) = \begin{bmatrix} k(0) \\ c(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.9236 \\ 2.3030 \end{bmatrix}, \quad \omega(1) = \begin{bmatrix} k(1) \\ c(1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.3588 \\ 2.6292 \end{bmatrix} \quad \omega(t) = \begin{bmatrix} k(t) \\ c(t) \end{bmatrix}.$$

Bilgi geometrisi metodunda çalışmanın akış diyagramı Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Problemde ilk olarak, lineer olmayan diferansiyel denklem sistemleri için sınır değerler belirlenmeli ve buna göre sayısal olarak çözülmelidir. Sonrasında, Weibull istatistiksel manifoldu için geodezik eğrilerinden $k(0.42)$ ve $c(0.58)$ optimal noktalarında şekil ve ölçek parametrelerinin hesabı yapılmalıdır. Şekil ve ölçek parametrelerinin uygulamamız için değişimi Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.6. IGM akış diyagramı.

Altı farklı yöntem kullanılarak hesaplanan rüzgar gücü yoğunlukları Çizelge 4.7'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Çizelge 4.7'den de kolayca görülebileceği gibi üç yıllık periyotta hesaplanan ortalama güç yoğunlukları bazında % 0.0301 hata oranına sahip olan IGM diğer metotlara göre daha iyi sonuç vermektedir.



Şekil 4.7. IGM metoduna göre k ve c geodeziklerinin değişimi.

Çizelge 4.7. Hesaplanan rüzgar güç yoğunluğu (W/m^2) ve parametre kestirim sonuçları.

	Ölçülen	GM	MJ	ML	MLM	PDM	IGM
Ortalama	9.9654	11.7144	9.5446	9.5635	9.5195	9.9226	9.9624
k	-	2.3588	1.8899	2.3588	1.9236	1.8249	2.17698
c	-	2.6292	2.2893	1.8021	2.3030	2.2862	2.43745

IGM yıllık analizlerde iyi sonuçlar vermesine rağmen aylık analizlerde Fisher matrisinin yapısından kaynaklı olarak, hata oranı PDM metoduna göre yükselmektedir (Çizelge 4.8).

Sonuç olarak tez çalışması kapsamında yeni bir yaklaşım olarak geliştirilen bilgi geometrisi metodunda yıllık bazlı yapılan analizlerde veri sayısının artmasıyla beraber diğer yöntemlere göre daha iyi sonuçlar hesaplanabilirken, aylık bazlı analizlerde en iyi % 1.1587 ve en kötü % 8.0470 hata değerlerine ulaşılmıştır. Sonuçlar gösteriyor ki öklid olmayan yapı formundaki IGM, gerek rüzgar hızı çalışmalarında gerekse uygulamalı bilimlerde kullanılan Weibull dağılımı için literatüre farklı bir yaklaşım getirmektedir. Gelecek çalışmalarda bu yöntemde farklı optimizasyon teknikleri kullanılarak geodeziklerin optimum noktalarının belirlenmesi üzerine çalışmalar yapılabileceği de ayrıca önerilebilir.

Çizelge 4.8 Aylık analiz sonuçları ve güç yoğunluk hataları (PDE).

Aylar	GM			MJ			ML			MLM			PDM			IGM		
	k	c	PDE	k	c	PDE	k	c	PDE	k	c	PDE	k	c	PDE	k	c	PDE
			(%)			(%)			(%)			(%)			(%)			(%)
Ocak	2.5285	2.5494	5.0955	2.0170	2.3199	4.2161	2.0170	2.3212	4.0555	2.0416	2.3318	3.9394	1.9436	2.3182	0.5610	2.2405	2.4561	3.0647
Şubat	2.1229	2.5590	4.5905	1.7538	2.3822	4.3073	1.7538	2.3840	4.09096	1.80696	2.4026	5.6550	1.6944	2.3770	0.1676	1.93902	2.49255	3.2517
Mart	1.9091	1.9861	0.8003	1.7649	1.8850	4.8983	1.7649	1.8864	4.6852	1.8088	1.8985	0.8019	1.6962	1.8804	0.1715	1.85115	2.49255	1.1587
Nisan	2.2203	2.5901	8.5976	1.8909	2.3225	7.9629	1.8909	2.3240	7.7811	1.96238	2.3351	5.9392	1.7625	2.3153	0.3139	1.85115	1.94905	2.6863
Mayıs	2.4264	2.4189	3.9150	1.8975	2.2602	3.3419	1.8975	2.2623	3.1589	1.9594	2.2743	3.467	1.8751	2.2589	0.5001	2.2196	2.3315	7.8377
Haziran	2.4292	2.6068	7.0947	1.9407	2.4699	3.3857	1.9407	2.4714	3.2060	1.9700	2.4834	7.0947	1.8880	2.4678	0.5149	2.1548	2.5535	3.9350
Temmuz	2.4692	2.8731	9.3388	2.1801	2.8624	1.2911	2.1801	2.8636	1.1650	2.1941	2.8723	0.8172	2.1595	2.8624	0.4508	2.3484	2.870965	6.2575
Ağustos	2.4736	2.8167	8.0013	2.0352	2.7246	2.0207	2.0352	2.7261	1.8608	2.0570	2.7372	1.7213	2.0052	2.7240	0.5766	2.22448	2.78196	3.9769
Eylül	2.1234	2.3312	1.8960	1.9924	2.2729	3.1225	1.9924	2.2742	2.9543	2.0188	2.2847	2.9546	1.9422	2.2716	0.5601	2.06246	2.31158	1.6429
Ekim	2.5233	2.2118	14.988	2.0136	1.9554	5.1390	2.0136	1.9565	4.9792	2.0395	1.9658	4.8748	1.9227	1.9534	0.5470	2.2360	2.1099	8.0470
Kasım	2.6741	2.0080	4.8683	2.1664	1.9258	2.4172	2.1664	1.9267	2.2893	2.1837	1.9341	1.7955	2.1205	1.9257	0.5045	2.3708	1.9709	2.7960
Aralık	2.3909	2.2465	2.6597	1.8960	2.0805	3.7288	1.8960	2.0818	3.5397	1.9318	2.0935	2.3971	1.8392	2.0781	0.4512	2.1158	2.1803	1.2761

5.FİNSLER GEOMETRY TABANLI GELİŞTİRİLEN YENİ YAKLAŞIM

M.Ö.300 de Öklid, düzlem geometriyi ünlü beş aksiyomu ile tanımlamıştır. Öklidyen geometri, R^n de noktalar, doğrular, düzlemler, açılar gibi kavramları ve Öklid geometrisinin aksiyomlarıyla oluşturulmuş önerme ve teoremleri baz alır (Pisagor teoremi, trigonometrik formüller,vb.). Doğayı anlamak için düz olmayan uzaylar üzerinde geometri inşa etmeye ihtiyaç vardır. İlk olarak Gauss bu amaçla R^3 te 2-boyutlu yüzeyleri çalışarak düz olmayan uzayları tanımlamıştır. Daha sonra, B. Riemann, 1854 de Öklidyen uzaylara yerel olarak homeomorfik olan manifold tanımını vermiştir. Sonra bir manifold üzerinde, vektörler arasındaki açıları, iki nokta arasındaki uzaklığı ve eğrilerin uzunluğunu ölçmeyi sağlayan Riemann metriğinin tanımını vermiştir. Bununla birlikte, Riemann sonsuz küçük bir büyüklüğün verilmesiyle, genel düzgün mesafe fonksiyonlarını ifade etme problemini de ortaya atmıştır.

P. Finsler tarafından bir Finsler manifoldu üzerinde varyasyonlar hesabı yöntemleriyle, bu problem inceleninceye kadar yaklaşık 60 yıl süren çalışmalardan somut bir sonuç elde edilememiştir. Finsler'in 1918 deki doktora tezi çalışması bu doğrultudaki ilk adım olmuş ve izleyen bir kaç yıl içinde varyasyonlar hesabının notasyonları yerini tensör hesabı notasyonlarının kullanımına bırakmıştır.

1925 te Synge, Taylor ve Berwald hemen hemen eş zamanlı olarak bu yeni uzay için tensör hesabı metotlarını kullanmışlardır. Tensör notasyonları ile bir Finsler uzayının metrik tensörünün bileşenleri, Riemann geometrisindeki metrik tensöre eşdeğer olarak şeklinde tanımlanmıştır. Berwald 1926 da bir Finsler manifoldu üzerinde Berwald konneksiyonu tanımını ve bazı Riemannian olmayan büyüklükleri vermiştir. Daha sonraki yıllarda Cartan ve Chern kendi konneksiyonlarını Finsler uzayı için tanımlamışlardır (Ceyhan ve Çivi, 2014).

Doğayı anlamak amacıyla düz olmayan uzaylar içerisinde geometri inşa etmek uygulamalı bilimler açısından büyük önem arz etmektedir. Finsler geometrisi de bu uygulama alanı içerisinde hassas bir yaklaşım ile asimetric yapılarda modelleme ve tanımlama yeteneğini bizlere getirmektedir.

Bu tez çalışmasında 2-boyutlu Finsler uzaylarının metrik fonksiyonu, rüzgar hızı modellemesi gibi bir çok uygulama alanında kullanılan iki parametrelili Weibull dağılımı için elde edilmiştir. Şekil (k) ve ölçek (c) parametrelerine sahip olan Weibull

olasılık dağılım fonksiyonuna Finsler geometrisi ile farklı bir yaklaşım getirilerek 2-boyutlu Finsler uzayında metrik tanımlaması gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak Finsler geometri tabanlı yeni olasılık ve kümülatif olasılık yoğunluk fonksiyonları önerilmiştir. Gelecek çalışmalara ışık tutması açısından bu yeni yaklaşım ile özellikle bir bölgenin rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan iki parametrelili Weibull olasılık dağılım fonksiyonunu içeren daha hassas modellerin oluşturulabilmesi hedeflenmektedir.

Geodezikleri iki parametrelili eğri ailesi olan iki boyutlu bir Finsler uzayında Finsler metrik fonksiyonu M. Matsumoto tarafından elde edilmiştir (Matsumoto, 1989,1994,1995). Bu çalışmada iki parametrelili eğri ailesine sahip olan Weibull dağılım fonksiyonundan elde edilen negatif olmayan reel sayılarda tanımlı farklı n parametrelerine bağlı çeşitli Finsler metrikleri hesaplanmıştır. Bu çalışmada elde edilen Finsler metriklerine ait geodeziklerin hesabı ve yeni iki parametrelili olasılık ve kümülatif olasılık yoğunluk fonksiyonları, seçilen negatif olmayan farklı n reel sayı değerleri için karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır. Bir sonraki bölümde iki parametrelili Weibull dağılım fonksiyon yapısı örnek bir uygulama üzerinden ele alınırken, Bölüm 5.3'te Finsler metrik tanımı ve iki parametrelili eğri aileleri için Finsler metriğinin elde edilmesi, adım adım gösterilmiş olup iki parametrelili eğri ailesine sahip olan Weibull dağılımı için tanımlamalar yapılmıştır. Son bölümde, negatif olmayan farklı n değerleri için iki parametrelili Weibull dağılım fonksiyonu eğri ailelerine ait Finsler metrikleri ve onların geodeziklerine ilişkin hesaplamalar karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.

5.1. İki Parametrelili Eğri Ailelerine İlişkin Metrik Hesaplamaları

İki boyutlu bir uzayda, sürekli bir fonksiyon M manifoldunda aşağıdaki koşulları sağlıyorsa bir Finsler metriği olarak ifade edilebilir.

- i. $F(x, y; \dot{x}, \dot{y}), TM \setminus \{0\}$ da C^∞ sınıfındadır
- ii. $F(x, y; \lambda \dot{x}, \lambda \dot{y}) = \lambda F(x, y; \dot{x}, \dot{y}), \lambda > 0$.

- iii. $g_{ij}(x, y; \dot{x}, \dot{y})$, temel metrik tensörü pozitif tanımlıdır. Burada (x, y) , M manifoldunun bir p noktasının koordinatlarını ve $(x, y; \dot{x}, \dot{y})$, $T_p M$ teğet demetinin $(\dot{x}, \dot{y})$ 'deki yerel koordinatlarını gösterir.

İki parametrelili dağılımlara ait iki boyutlu Finsler uzayında farklı Finsler metrikleri ve ilişkili geodezikleri belirlemek amacı ile aşağıdaki hesaplamalar yapılmıştır. İki parametrelili eğri aileleri

$$y = f(x; a, b) \quad (5.1)$$

Denklem 5.1 ile verilsin. Bu eşitlik ile verilen (x, y) düzleminde $C(a, b)$ eğri ailesini ele alalım. Öncelikli amacımız, $F^2 = (\mathbb{R}^2, L(x, y; \dot{x}, \dot{y}))$ iki boyutlu Finsler uzayının nasıl bulunacağını göstermektir. Bu sorunun çözümüne ilişkin Darboux'un metodu çalışmamızda ele alınmıştır.

İlk olarak Denklem 5.1'den;

$$z (= y') = f_x(x; a, b), \quad (5.2)$$

elde edilir. 5.1 ve 5.2 eşitliklerinden x , y ve z 'nin fonksiyonları olarak a ve b 'nin çözümleri aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{aligned} a &= \alpha(x, y, z), \\ b &= \beta(x, y, z) \end{aligned} \quad (5.3)$$

Daha sonraki aşamada,

$$z' = f_{xx}(x; \alpha, \beta) = u(x, y, z), \quad (5.4)$$

ifadesi, $C(a, b)$ iki parametrelili eğri ailesini karakterize eden y 'nin ikinci mertebeden diferansiyel denklemidir.

F^2 Finsler uzayında (x^1, x^2) ve (y^1, y^2) yerine, sırasıyla, (x, y) ve $(\dot{x}, \dot{y}) = (p, q)$ kullanacağız. Buna göre $C(a, b)$ eğrisinin s yay uzunluğunun diferansiyeli Denklem 5.5'de ki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned} ds &= L(x, y; \dot{x}, \dot{y}) dt, \\ (\dot{x}, \dot{y}) &= \left(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt} \right). \end{aligned} \quad (5.5)$$

$\dot{x} > 0$ varsayarak, $ds = L\left(x, y; 1, \frac{\dot{y}}{\dot{x}}\right) \dot{x} dt$ olur. Buna göre $y' = \frac{dy}{dx}$, sembolünü kullanarak

$$ds = A(x, y, y') dx, \quad (5.6)$$

elde edilir. Buradan

$$A(x, y, y') = L(x, y; 1, y') \quad (5.7)$$

ilişkisi elde edilir. Tersine olarak A'dan L'ye

$$L(x, y; \dot{x}, \dot{y}) = A\left(x, y, \frac{\dot{y}}{\dot{x}}\right) \dot{x}. \quad (5.8)$$

ilişkisi de görülebilir.

Geodezik, bir eğri boyunca hesaplanan $s = \int_{t_0}^t L(x, y; \dot{x}, \dot{y}) dt$ uzunluk integralini

minimum yapan eğridir ve

$$\ddot{x}^i + 2G^i(x, y; \dot{x}, \dot{y}) = 0 \quad (5.9)$$

Denklem 5.9'da ki Euler denkleminde elde edilir. Burada

$$G^i(x, y; \dot{x}, \dot{y}) = \frac{1}{2} g^{il} \left\{ \frac{\partial^2 F}{\partial x^j \partial y^l} y^j - \frac{\partial F}{\partial x^l} \right\} \quad (5.10)$$

şeklinde tanımlanan spray katsayıları ve $F(x, y; \dot{x}, \dot{y}) = \frac{L^2(x, y; \dot{x}, \dot{y})}{2}$ finsler metriğini ifade eder.

Geodezikleri veren Euler denkleminin Rashevsky formunu ele alırsak

$$A_{zz} y'' + A_{yz} y' + A_{zz} - A_y = 0, z = y' \quad (5.11)$$

eşitliği yazılır. Burada $A(x,y,z)$ ilişkili temel fonksiyondur ve Eşitlik 5.7'de tanımlanmıştır.

Darboux'un teoremine göre genel temel metrik tanımı (Matsumoto, 1989);

$$A(x, y, z) = \int_0^z (z-t) H(t, y-tx) dt + zE_y + E_x \quad (5.12)$$

şeklinde verilmiştir. Burada $H(\alpha, \beta)$ ve $E(x,y)$ keyfi olarak seçilebilir. Matsumoto'nun çalışmasında temel metrik fonksiyonu bir başka formda Denklem 5.13'de belirtilmiştir.

$$L(x, y, \dot{x}, \dot{y}) = \dot{x} \int_0^z (z-t) H(t, y-tx) dt + \dot{x}E_x + \dot{y}E_y. \quad (5.13)$$

Burada iki parametrelili eğri ailesi olarak Weibull dağılım fonksiyonu seçilip işlemlerimize devam edilecektir. İlk olarak Denklem 4.2'deki Weibull olasılık yoğunluk fonluk fonksiyonu α, β, u değişkenlerinin hesabı için Denklem 5.14 formatında basit bir formda lineerleştirilmiştir.

$$\begin{aligned} y &= \log[-\log(1-F(v))] = k \log \frac{v}{c}, \\ y &= kx - k \log c \end{aligned} \quad (5.14)$$

Burada $x=\log v$ 'i ifade etmektedir. Son olarak iki parametrelili fonksiyon aşağıdaki gibi tanımlanırsa,

$$y = f(x; k, c). \quad (5.15)$$

Lineer olarak bir eğri ailesinin tanımlanması durumunda bazı gerekli büyüklükler Denklem 5.16'da ki gibi elde edilir (Matsumoto, 1994).

$$\begin{aligned} \alpha &= z, \\ \beta &= y - zx, \\ u &= 0. \end{aligned} \quad (5.16)$$

İki parametrelili eğri ailelerinden biri olan Weibull dağılımı için $H(\alpha, \beta)$ ve $E(x,y)$ fonksiyonlarının keyfi seçimlerine bağlı olarak farklı Finsler metrikleri ve ilişkili geodezikler bir sonraki bölümde ele alınmıştır.

5.2. İki Parametrelili Weibull Dağılımında Yeni Yaklaşımla Finsler Metriklerinin Belirlenmesi ve Geodeziklerin Hesabı

İki parametrelili Weibull dağılımı için metrik fonksiyonu Denklem 5.13'de $H(\alpha, \beta) = \beta^n$ seçimiyle n keyfi negatif olmayan reel sayılar için farklı Finsler metrikleri bu bölümde elde edilecektir. Bunun için Denklem 5.13'de $H(z, y - zx) = \beta^n = (y - zx)^n$ ve $E = sabit$ seçimi ile iki parametrelili Weibull dağılımına ait metrik fonksiyonu ara hesaplamalar ile birlikte;

$$L(x, y, \dot{x}, \dot{y}) = \frac{y^{(n+2)} \dot{x}}{x^2} \sum_{k=0}^n \binom{n+2}{k+2} \left(-\frac{x\dot{y}}{y\dot{x}} \right)^{(k+2)}. \quad (5.17)$$

formunda elde edilir (Dokur, vd., 2017 a; 2017b). Elde edilen fonksiyonun Finsler metriği koşullarını sağladığı kolayca görülebilir.

5.2.1. Durum 1: n negatif olmayan tam sayı

n 'e tam sayı değerleri atandığında metrik ifadesi, L_n ve G_n , sırasıyla, n değerinde tanımlı metrik fonksiyonu ve spray katsayıları olmak üzere $n=2, 5$ ve 10 örnek değerleri için

$$\begin{aligned} L_2(x, y, p, q) &= \frac{q^2 x^2 (q^2 x^2 - 4pqxy + 6p^2 y^2)}{x^2 p^3} \\ L_5(x, y, p, q) &= \frac{q^2 x^2 (-q^5 x^5 + 7pq^4 x^4 y)}{x^2 p^6} (-21p^2 q^3 x^3 y^2 + \dots \\ &\quad 35p^3 q^2 x^2 y^3 - 35p^4 qxy^4 + 21p^5 y^5) \\ L_{10}(x, y, p, q) &= \frac{1}{x^2 p^{11}} q^2 x^2 (q^{10} x^{10} - 12pq^9 x^9 y + 66p^2 q^8 x^8 y^2 \dots \\ &\quad -220p^3 q^7 x^7 y^3 + 495p^4 q^6 x^6 y^4 - 792p^5 q^5 x^5 y^5 + 924p^6 q^4 x^4 y^6 \dots \\ &\quad 792p^7 q^3 x^3 y^7 + 495p^8 q^2 x^2 y^8 - 220p^9 qxy^9 + 66p^{10} y^{10}). \end{aligned} \quad (5.18)$$

olarak hesaplanabilirken, bu eşitliklere bağlı Finsler metriklerine ilişkin spray katsayıları Denklem 5.10'dan;

$$\begin{aligned}
 G_2^1 &= \frac{p^2 q (-qx + 4py)}{q^2 x^2 - 4pqxy + 6p^2 y^2} \\
 G_2^2 &= \frac{pq^2 (-qx + 4py)}{q^2 x^2 - 4pqxy + 6p^2 y^2} \\
 G_5^1 &= \frac{pq^2 (q^4 x^4 - 7pq^3 x^3 y + 21p^2 q^2 x^2 y^2 - 35p^3 qxy^3 + 35p^4 y^4)}{-q^5 x^5 + 7pq^4 x^4 y - 21p^2 q^3 x^3 y^2 + 35p^3 q^2 x^2 y^3 - 35p^4 qxy^4 + 21p^5 y^5} \quad (5.19) \\
 G_5^2 &= \frac{p^2 q (q^4 x^4 - 7pq^3 x^3 y + 21p^2 q^2 x^2 y^2 - 35p^3 qxy^3 + 35p^4 y^4)}{-q^5 x^5 + 7pq^4 x^4 y - 21p^2 q^3 x^3 y^2 + 35p^3 q^2 x^2 y^3 - 35p^4 qxy^4 + 21p^5 y^5} \cdot \\
 G_{10}^1 &= \frac{pq^2 (-q^9 x^9 + 12pq^8 x^8 y - 66p^2 q^7 x^7 y^2 + 220p^3 q^6 x^6 y^3}{(q^{10} x^{10} - 12pq^9 x^9 y + 66p^2 q^8 x^8 y^2 - 220p^3 q^7 x^7 y^3 + 495p^4 q^6 x^6 y^4 \dots} \\
 &\quad \frac{-495p^4 q^5 x^5 y^4 + 792p^5 q^4 x^4 y^5 - 924p^6 q^3 x^3 y^6 + 792p^7 q^2 x^2 y^7 - 495p^8 qxy^8 + 220p^9 y^9)}{-792p^5 q^5 x^5 y^5 + 924p^6 q^4 x^4 y^6 - 792p^7 q^3 x^3 y^7 + 495p^8 q^2 x^2 y^8 - 220p^9 qxy^9 + 66p^{10} y^{10}} \\
 G_{10}^2 &= \frac{p^2 q (-q^9 x^9 + 12pq^8 x^8 y - 66p^2 q^7 x^7 y^2 + 220p^3 q^6 x^6 y^3}{(q^{10} x^{10} - 12pq^9 x^9 y + 66p^2 q^8 x^8 y^2 - 220p^3 q^7 x^7 y^3 + 495p^4 q^6 x^6 y^4 \dots} \\
 &\quad \frac{-495p^4 q^5 x^5 y^4 + 792p^5 q^4 x^4 y^5 - 924p^6 q^3 x^3 y^6 + 792p^7 q^2 x^2 y^7 - 495p^8 qxy^8 + 220p^9 y^9)}{-792p^5 q^5 x^5 y^5 + 924p^6 q^4 x^4 y^6 - 792p^7 q^3 x^3 y^7 + 495p^8 q^2 x^2 y^8 - 220p^9 qxy^9 + 66p^{10} y^{10}}
 \end{aligned}$$

olarak hesaplanır. Hesaplanan değerlerden de görüleceği üzere n keyfi negatif olmayan tam sayılarda $G_n^1 = \frac{p}{q} G_n^2$ olmaktadır. Bu durumda, Denklem (5.19)'da ki spray katsayılarını, geodezikleri veren Denklem (5.20)'de ki Euler denklemlerinde yerine yazarsak

$$y'' = \frac{2^*(G^1 q - G^2 p)}{p^3} \quad (5.20)$$

Bu da bize C_1 ve C_2 integrasyon sabitleri olmak üzere, $y = C_1x + C_2$ doğrusal fonksiyon yapısını verecektir ki işlem adımlarında bu Denklem 5.17'de yerine koyulduğunda n keyfi negatif olmayan tüm tam sayı değerleri için Eşitlik 4.1 ve 4.2'de verilen aynı iki parametrelili Weibull olasılık ve kümülatif olasılık fonksiyonları elde edilir.

5.2.2. Durum 2: n negatif olmayan rasyonel sayılar için

Aynı işlem adımları negatif olmayan rasyonel sayılar için yapıldığında, $n = 1/2$, $11/12$ ve $1/1000$ değerleri için Finsler metriklerinin hesabı Denklem 5.21'deki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned} L_{1/2}(x, y, p, q) &= \frac{15q^2 x^2 \sqrt{y}}{8x^2 p} \\ L_{11/12}(x, y, p, q) &= \frac{805q^2 x^2 y^{11/12}}{288x^2 p} \\ L_{1/1000}(x, y, p, q) &= \frac{2003001q^2 x^2 y^{1/1000}}{2000000x^2 p}. \end{aligned} \quad (5.21)$$

Hesaplanan spray katsayıları ise Denklem 5.22'de gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} G_{1/2}^1 &= G_{11/12}^1 = G_{1/1000}^1 = 0 \\ G_{1/2}^2 &= \frac{q^2}{8y} \\ G_{11/12}^2 &= \frac{11q^2}{48y} \\ G_{1/1000}^2 &= \frac{q^2}{4000y}. \end{aligned} \quad (5.22)$$

Denklem 5.22'de ki spray katsayılarını geodezikleri veren Denklem 5.20'de ki Euler denklemlerinde yerine yazarsak K , n 'e bağlı bulunan katsayı olmak üzere y 'nin x 'e göre ikinci dereceden diferansiyel denklemi Denklem 5.23'de ki gibi elde edilir.

$$y'' = K \frac{y'^2}{y} \quad (5.23)$$

$n=1/2$, $11/12$ ve $1/1000$ için, sırasıyla, $K=-1/4$, $-11/24$ ve $-1/2000$ değerlerindedir. Bu durumda, n ile K arasındaki ilişkinin $K=-\frac{1}{2}n$ olduğu kolaylıkla görülebilir. Tüm negatif olmayan rasyonel sayılarda, Denklem 5.23'de verilen diferansiyel denklem çözülürse Denklem 5.24 elde edilir.

$$y = \left(C_2 x + \frac{2}{n+2} C_1 \right)^{\frac{2}{n+2}} \quad (5.24)$$

Burada C_1 ve C_2 integrasyon sabitleridir. Denklem 5.24, Denklem 5.14'de yerine koyulduğunda iki parametrelili yeni kümülatif fonksiyon Denklem 5.25'de ki gibi hesaplanmış olur.

$$F_{Finsler}(v; C_1, C_2) = 1 - e^{-\frac{2}{n+2} v^{C_2} e^{\frac{2}{n+2} C_1}} \quad (5.25)$$

Burada $a = \frac{2}{n+2}$ değişkeni atandığında Denklem 5.26 elde edilir.

$$F_{Finsler}(v; C_1, C_2) = 1 - e^{-a v^{C_2} e^{a C_1}}. \quad (5.26)$$

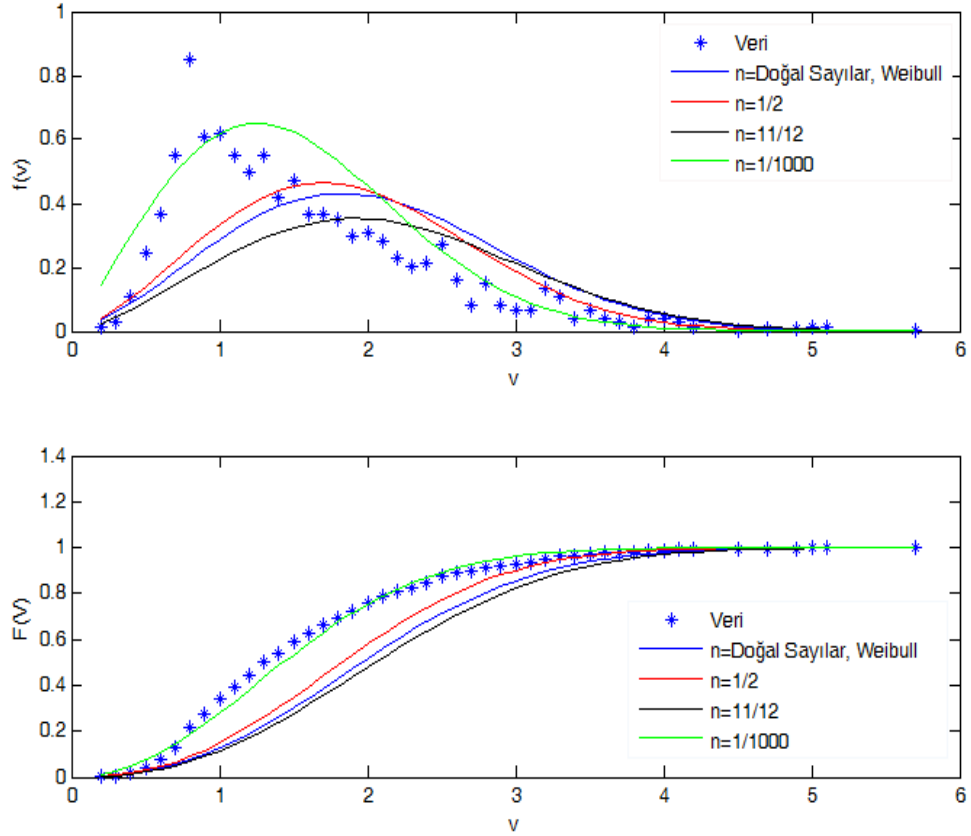
$f_{Finsler} = \frac{dF_{Finsler}}{dv}$ ilişkisinden olasılık yoğunluk fonksiyonu Denklem 5.27'de ki gibi hesaplanmış olur.

$$f_{finsler}(v; C_1, C_2) = a C_2 e^{a(C_1 - v^{C_2} e^{a C_1})} v^{C_2 - 1}. \quad (5.27)$$

n keyfi değerinde negatif olmayan tam sayılar kullanılarak elde edilen diferansiyel denklemin çözümü iki parametrelili Weibull fonksiyonu ile aynı geodezikleri verirken, n negatif olmayan rasyonel sayılarda tanımlı yeni fonksiyon, iki boyutlu eğri ailesi için hesaplanmıştır.

Yeni fonksiyonda, C_1 ve C_2 parametreleri gözlem değerlerine göre belirlenerek gerçek dünya problemlerinde modelleme alt yapısını bizlere sunabileceği öngörülmektedir. Bu kapsamda Finsler geometri tabanlı elde edilen geodezikler, lineer olmayan rüzgar hızı modellemesi gibi gerçek dünya problemi üzerinden ilk aşama için

örneklendirilirse; Şekil 5.1'de Bilecik ili rüzgar hızı verileri kullanılarak Weibull ve Finsler metrik tabanlı bulunan yeni eğri ailelerine ilişkin fonksiyon değerlerindeki parametreler, sınır değer problemi ile belirlenip farklı n değerleri için karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Farklı bölgelere ait detaylı analizler ve parametre sonuçları bir sonraki bölümde ele alınacaktır.



Şekil 5.1. Yeni fonksiyon ile Weibull fonksiyonun farklı n değerleri için karşılaştırılması.

n sayısının negatif olmayan tam sayı olarak belirlendiğinde, Weibull fonksiyonu ile aynı olasılık ve kümülatif olasılık yoğunluk fonksiyonlarını verdiğini daha önceden ifade edilmişti. Farklı negatif olmayan rasyonel sayılarda tanımlı n değerleri için Şekil 5.1'de görüleceği üzere gözlem değerlerine ait olasılık ve kümülatif olasılık yoğunluk fonksiyonuna n 'nin sıfıra yakın değerlerinde yakınsadığı görülmektedir.

Farklı gerçek dünya problemleri üzerinden de yeni fonksiyon değeri için n keyfi değeri seçimi ve parametre tahminleri gerçekleştirilerek en uygun modelleme lineer olmayan yapılarda hassas şekilde uygulanabileceği söylenebilir.

Sonuç olarak yapılan bu çalışma kapsamında iki parametrelili eğri ailesine sahip olan Weibull dağılım fonksiyonuna ait Finsler metrikleri elde edilmiştir.

İki parametrelili Weibull dağılım fonksiyonları ailesine ait Finsler metriğinin elde edilmesi için keyfi fonksiyon $H(z, y-zx) = \beta^n$ şeklinde seçilmiştir. Bu seçim sonucunda farklı negatif olmayan n değerleri için elde edilen geodezikler incelendiğinde iki parametrelili yeni bir kümülatif dağılım fonksiyonu elde edilmiştir. Bu yeni Finsler metrik tabanlı bulunan fonksiyon yapısının, rüzgar hızı modellemesi gibi bir çok gerçek dünya problemine uygulanabileceği düşünülmektedir. Bu modelleme ile ilgili yapılabilecek analizlerin literatüre yeni bir yaklaşım getireceği öngörülmektedir.

5.3. Geliştirilen Finsler Geometri Tabanlı Yaklaşım ile Karşılaştırmalı Analizler ve Uygulamalar

Tez çalışmasının bu bölümünde, Finsler geometrisi kullanılarak elde edilen Finsler metrikleri ve geodezikleri ile hesaplanmış olasılık yoğunluk ve kümülatif olasılık yoğunluk fonksiyonları için Bozcaada, Gökçeada ve Bilecik ili rüzgar hızı verileri kullanılarak modellemeler yapılmıştır. Bu kapsamda oluşturulan modeller Weibull ve Rayleigh gibi rüzgar hızı modellemelerinde sıklıkla kullanılan olasılık dağılım fonksiyonları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen rüzgar hızı dağılımları kullanılarak bölgelerin rüzgar enerji yoğunlukları tüm modeller için hesaplanmış ve karşılaştırmalı olarak rüzgar hızı yoğunluklarının yüzde hata değerleri yorumlanmıştır.

Zaman serisi formatında yer alan rüzgar hızı verileri istatistiksel analizleri için genellikle belirli bir frekans aralığında belirlenmelidir. Bu sebeple mevcut zaman serisi verileri frekans dağılımı biçimine çevrilmesi gerekir. Bu süreçte örnek bir ay için Bozcaada Temmuz ayı verilerinin dağılımı Çizelge 5.1.'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.1'de rüzgar hızı ikinci sütunda verilen sınıflara göre gruplandırılır. Ortalama rüzgar hızı her hız sınıfı aralığı için hesaplanır. Üçüncü sütun (f_i) her hız sınıfının oluşma sıklığını göstermektedir. Olasılık yoğunluk dağılımı ($f(v_i)$) dördüncü sütunda gösterilmiştir. Önceki bölümlerde ele alınan Weibull, Rayleigh ve Finsler geometry tabanlı geliştirilen olasılık fonksiyonlarına ait dağılım değerleri sırasıyla $f_w(v_i)$, $f_r(v_i)$ ve $f_f(v_i)$ olarak gösterilerek her hız aralığı için bu fonksiyonlara denk gelen olasılıklar hesaplanmıştır.

Çizelge 5.1. Ölçülen saatlik örnek zaman serisi verisinin Bozcaada Temmuz ayı için frekans dağılım biçiminde düzenlenmesi ve Weibull $f_w(v_i)$, Rayleigh $f_r(v_i)$, ve Finsler $f_f(v_i)$ fonksiyonlarından hesaplanan olasılık yoğunluk dağılımları.

i	v_i	f_i	$f(v_i)$	$f_w(v_i)$	$f_r(v_i)$	$f_f(v_i)$
1	0-1	11	0.0147	0.0163	0.0386	0.0134
2	1-2	54	0.0725	0.0513	0.1072	0.0451
3	2-3	51	0.0685	0.0825	0.1529	0.0754
4	3-4	72	0.0967	0.1059	0.1693	0.0996
5	4-5	82	0.1102	0.1190	0.1593	0.1149
6	5-6	97	0.1303	0.1215	0.1318	0.1202
7	6-7	64	0.0860	0.1148	0.0975	0.1160
8	7-8	66	0.0887	0.1013	0.0651	0.1045
9	8-9	74	0.0994	0.0840	0.0395	0.0883
10	9-10	63	0.0846	0.0657	0.0218	0.0702
11	10-11	38	0.0510	0.0486	0.0110	0.0528
12	11-12	40	0.0537	0.0341	0.0051	0.0375
13	12-13	17	0.0228	0.0226	0.0021	0.0252
14	13-14	5	0.0067	0.0143	0.0008	0.0160
15	14-15	2	0.0026	0.0086	0.0003	0.0097
16	15-16	6	0.008	0.0049	0.0001	0.0055
17	16-17	1	0.001	0.0026	0.0000	0.0030
18	17-18	1	0.001	0.0013	0.0000	0.0015

Rüzgar hızı verilerinden elde edilen her bir modelin aylık analizinde parametre tahmini yapılarak hata performans kriterleri hataların karesinin ortalamalarının karekökü (RMSE) ile karşılaştırılmıştır.

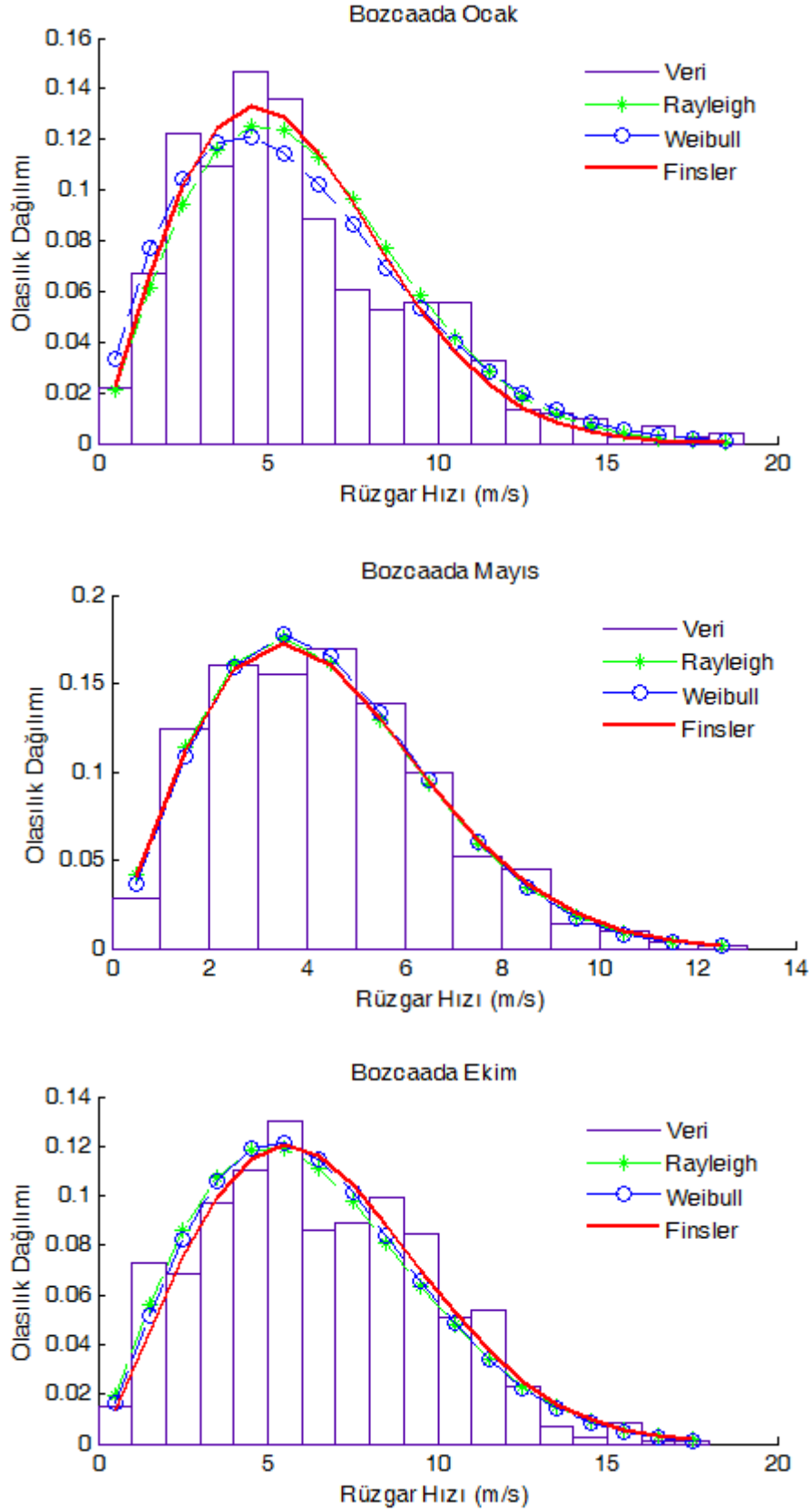
Ekim 2015-Eylül 2016 Bozcaada verileri için modellere ait hesaplanan aylık parametre değerleri ve hata performans kriteri sonuçları Çizelge 5.2'de gösterilmektedir (Dokur vd., 2017 d). Hata performans kriterleri karşılaştırıldığında Çizelge 5.2'den de görülebileceği gibi Finsler ve Weibull, Rayleigh dağılım fonksiyonuna göre rüzgar hızı

verilerine daha iyi uyum sağlamaktadır. Finsler ve Weibull dağılımları yakın hata oranlarına sahip olsada tüm aylar bazında Finsler geometrisi ile elde edilen yaklaşımın diğer modellere göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmektedir.

Çizelge 5.2. Bozcaada aylık analiz ve hata performans sonuçları.

Aylar	<u>BOZCAADA</u>								
	<u>Weibull</u>			<u>n</u>	<u>Finsler</u>			<u>Rayleigh</u>	
	k	c	RMSE		C₁	C₂	RMSE	c	RMSE
Ocak	1.8045	6.6332	0.0130	11/12	-4.9712	2.0236	0.0140	4.8133	0.0283
Şubat	1.6015	6.1985	0.0173	1/2	-3.0812	1.4494	0.0172	4.6698	0.0245
Mart	1.7867	5.8550	0.0149	11/12	-4.1565	1.8521	0.0148	4.2631	0.0186
Nisan	1.6364	4.1676	0.0238	11/12	-3.0125	1.6354	0.0237	3.1097	0.0342
Mayıs	2.0583	4.9181	0.0090	11/12	-4.0956	1.9919	0.0088	3.4576	0.0090
Haziran	1.6549	5.5660	0.0184	1/2	-3.0917	1.4573	0.0152	4.1143	0.0247
Temmuz	2.5944	7.0754	0.0177	11/12	-6.4527	2.4017	0.0166	4.8267	0.0286
Ağustos	2.7271	7.7120	0.0131	11/12	-6.9527	2.4717	0.0128	5.2297	0.0240
Eylül	2.0247	5.8461	0.0129	1/2	-3.8117	1.8073	0.0126	4.1237	0.0128
Ekim	2.0730	7.2087	0.0129	11/12	-5.6927	2.1317	0.0126	5.0618	0.0128
Kasım	1.6233	5.7244	0.0321	1/2	-3.3561	1.5973	0.0321	4.2814	0.0399
Aralık	1.9482	6.8862	0.0156	11/12	-4.9927	1.9017	0.0153	4.8969	0.0163

Finsler geometrisi yaklaşımından ve Weibull, Rayleigh dağılım modellerinden elde edilen örnek aylar için rüzgar hızı dağılımlarının grafiksel gösterimi Şekil 5.2'de sunulmuştur.



Şekil 5.2. Bozcaada örnek aylar için dağılım fonksiyonlarının grafiksel değişimi.

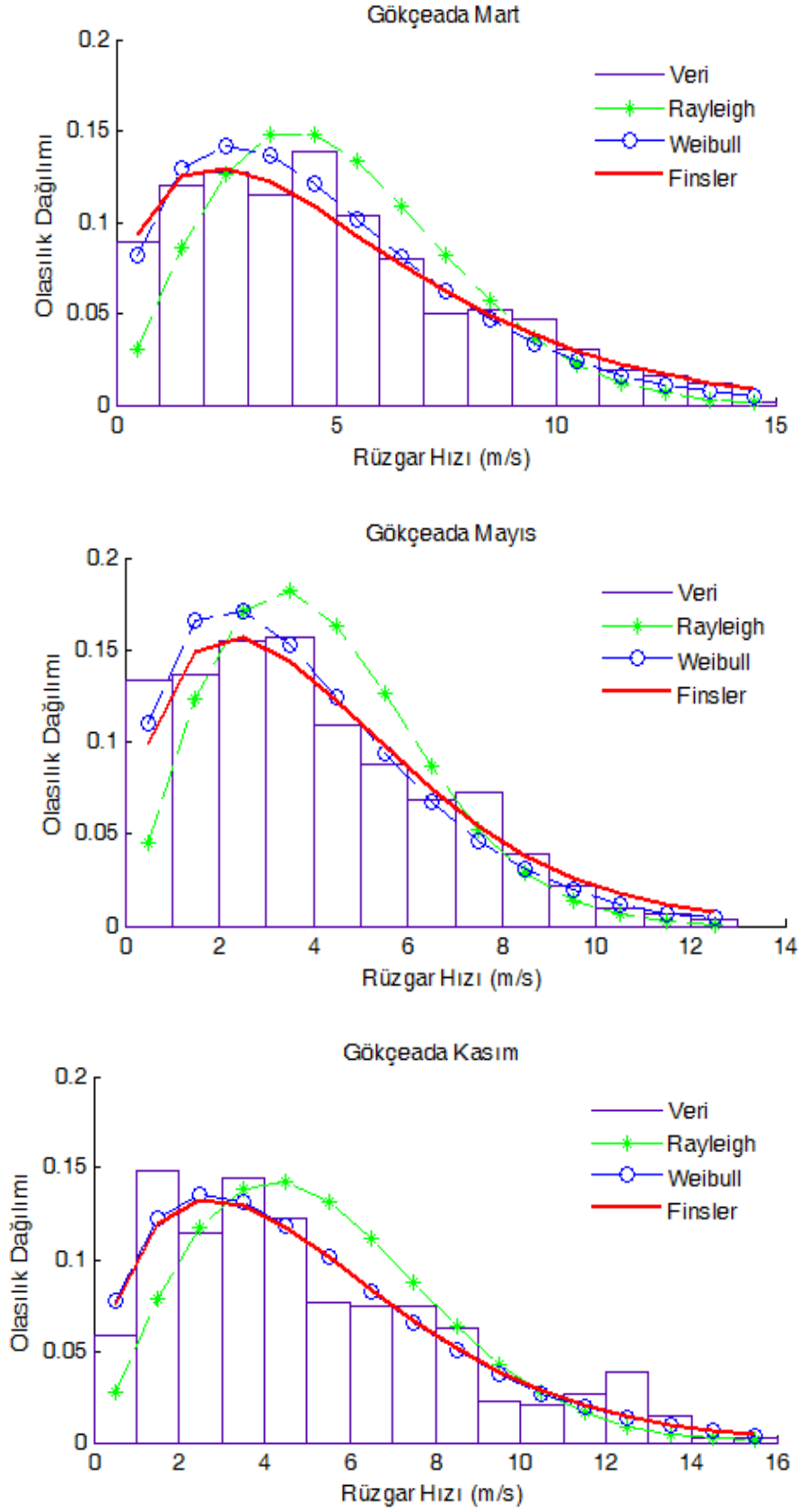
Özellikle Bozcaada verileri dikkate alındığında Finsler geometrisi, dağılımın aşım noktalarının (over shooting) modelleme konusunda iyi sonuçlar verdiği söylenebilir. Ocak verisinin hata performans kriterleri referans alındığında Finsler geometrisi Weibull dağılımına göre hata oranı düşük olsa da Şekil 5.2.'den de görülebileceği üzere tepe değerlerinde ki yaklaşımı diğer modellere göre daha hassastır.

Ülkemizde rüzgar hızı potansiyeli yüksek olan diğer bir bölge olan Gökçeada için Finsler geometrisi ile elde edilen yaklaşımın diğer modellere göre performans sonuçları ve aylık parametre kestirimleri Çizelge 5.3'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.3. Gökçeada aylık analiz ve hata performans sonuçları.

<u>GÖKCEADA</u>									
Aylar	<u>Weibull</u>			n	<u>Finsler</u>		<u>Rayleigh</u>		
	k	c	RMSE		C₁	C₂	RMSE	c	RMSE
Ocak	1.3428	5.0590	0.0118	1/1000	-2.1908	1.3021	0.0115	4.1057	0.0383
Şubat	1.3051	5.5598	0.0223	1/1000	-2.2118	1.1552	0.0184	4.4978	0.0460
Mart	1.5189	5.2773	0.0102	1/1000	-2.3991	1.3851	0.0099	4.0362	0.0244
Nisan	1.2784	3.9648	0.0324	1/1000	-1.5512	1.0564	0.0238	3.2268	0.0638
Mayıs	1.5118	4.3269	0.0143	1/2	-2.6435	1.5010	0.0130	3.3112	0.0329
Haziran	1.5583	3.9031	0.0320	1/2	-2.5541	1.5058	0.0286	2.9463	0.0405
Temmuz	2.0412	4.0798	0.0645	11/12	-4.1512	2.1210	0.0564	2.8753	0.0650
Ağustos	2.2721	4.7470	0.0396	11/12	-4.6235	2.1502	0.0363	3.2937	0.0454
Eylül	2.0404	4.0454	0.0397	11/12	-4.2025	2.1500	0.0322	2.8505	0.0401
Ekim	1.7396	4.7091	0.0267	1/2	-2.9210	1.5558	0.0264	3.4331	0.0280
Kasım	1.5134	5.5156	0.0150	1/2	-2.9896	1.5156	0.0150	4.2350	0.0279
Aralık	1.1198	3.7053	0.0362	1/1000	-1.3400	0.9021	0.0280	3.2546	0.0838

Gökçeada verilerinin aylık analiz sonuçlarına bakıldığında Finsler geometri yaklaşımıyla yapılan analizlerin diğer modellere göre daha az hata oranına sahip olduğu görülmektedir. Şekil 5.3'de örnek bazı aylar için model sonuçlarının grafiksel değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Gökçeada örnek aylar için dağılım fonksiyonlarının grafiksel değişimi.

Ortalam 2-3 m/sn rüzgar hızı profillerinde modellerin performansını karşılaştırmak amacıyla Bilecik ili rüzgar hızı verileri kullanılmıştır. Bu kapsamda Çizelge 5.4'de Bilecik ili için modellere ait aylık parametre kestirim sonuçları ve hata performans kriterleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Çizelge 5.4. Bilecik aylık analiz ve hata performans sonuçları.

BİLECİK									
Aylar	Weibull			n	Finsler			Rayleigh	
	k	c	RMSE		C₁	C₂	RMSE	c	RMSE
Ocak	1.6461	1.9157	0.0185	1/2	-0.9987	1.5107	0.0137	1.4372	0.0458
Şubat	1.8733	1.8738	0.0232	1/2	-1.2015	1.8301	0.0225	1.3470	0.0289
Mart	1.9676	2.0109	0.0192	11/12	-1.6305	2.1350	0.0187	1.4274	0.0177
Nisan	1.9534	1.8862	0.0155	11/12	-1.3408	2.0707	0.0147	1.3414	0.0134
Mayıs	2.0486	1.8816	0.0202	11/12	-1.3415	2.0751	0.0197	1.3234	0.0230
Haziran	2.1354	2.0912	0.0088	11/12	-1.7519	2.1101	0.0086	1.4590	0.0196
Temmuz	2.6047	2.2152	0.0261	11/12	-2.2104	2.4307	0.0225	1.5039	0.0561
Ağustos	2.3304	2.0004	0.0454	1/2	-1.6310	2.2815	0.0447	2.0004	0.0624
Eylül	2.2881	1.8204	0.0119	11/12	-1.5595	2.3511	0.0108	1.2556	0.0457
Ekim	2.3304	1.5460	0.0273	1/2	-1.1058	2.2815	0.0145	1.0632	0.0528
Kasım	1.8810	1.5050	0.0189	1/2	-0.8621	1.9210	0.0169	1.0814	0.0184
Aralık	1.9703	1.6487	0.0245	1/2	-0.8681	1.7923	0.0204	1.1699	0.0262

Çizelge 5.4.'den de görülebileceği gibi düşük rüzgar hızı rejimine sahip bir bölgede de Finsler geometrisi ile elde edilen modelin diğer modellere göre daha hassas yaklaşımda sonuçlar verdiği söylenebilir. Mart ve Nisan ayı dışında ki tüm aylarda Rayleigh dağılım modelinin hata oranının Weibull ve Finsler ile elde edilen sonuçlara göre yüksek olduğu görülmektedir.

Bu bölüm kapsamında enerji yoğunluklarının karşılaştırılması da ayrıca ele alınmıştır. Bu kapsamda modellere ilişkin hesaplanan denklem yapıları sunulacaktır. Literatürde yer alan Weibull ve Rayleigh için güç yoğunluğu hesabı doğrudan verilirken, Finsler yaklaşımı ile hesaplanan rüzgar gücü yoğunluğunda kullanılacak

denklem yapısı diğer modellerde de olduğu gibi olasılık yoğunluk fonksiyonundan hesaplanmıştır.

Bölüm 4'te de ele aldığımız, Denklem 4.5'de verilen rüzgar gücüne ilişkin güç denklemi, birim alan başına düşen enerji cinsinden yazıldığında Denklem 5.28 elde edilir.

$$\frac{P(v)}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (5.28)$$

Ölçülen saatlik rüzgar hızı verilerinden elde edilen olasılık yoğunluk dağılımı için rüzgar gücü hesaplanması, Çizelge 5.1'de gösterilen örnek bir ay için ele alınan değişimlerde göz önünde bulundurulduğunda referans rüzgar enerji yoğunluğu (P_{ref}) olarak Denklem 5.29'da ki gibi hesaplanabilir.

$$P_{Ref} = \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^n v_i^3 f(v_i) \quad (5.29)$$

Ortalama rüzgar enerjisi yoğunluğunun hesaplanması için genel formül Denklem 5.30'da gösterilmiştir.

$$P_{ort} = \int_0^{\infty} P(v) f(v) dv \quad (5.30)$$

Bununla birlikte, ortalama rüzgar enerjisi yoğunluğu ortalama rüzgar hızından yola çıkılarak, Denklem 5.31'den elde edilen eşitlik ile de doğrudan hesaplanabilmektedir.

$$P_{ort}(v) = \frac{1}{2} \rho (v^3)_{ort} \quad (5.31)$$

Olasılık dağılım fonksiyonu bilinen bir model için ortalama rüzgar hızının küpünün ortalaması Denklem 5.32'den belirlenebilir.

$$(v^3)_{ort} = \int_0^{\infty} v^3 f(v) dv \quad (5.32)$$

Hesaplamalar yapıldığında Weibull dağılım fonksiyonu için ortalama güç yoğunluğu ifadesi Denklem 5.33'de hesaplanmıştır.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} v^3 f(v) dv = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) \quad (5.33)$$

Burada gamma fonksiyonu Γ ile ifade edilmiş olup Denklem 5.34'de gösterilmiştir.

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt \quad (5.34)$$

Parametreleri hesaplanmış Rayleigh dağılımı için ortalama güç yoğunluğu için elde edilmiş sonuç Denklem 5.35'de gösterilmiştir (Abdulkarim vd., 2015).

$$P_R = \frac{3}{\pi} \rho c^3 \sqrt{\frac{\pi}{4}} \quad (5.35)$$

Finsler geometrisi ile elde edilen yaklaşımın, enerji yoğunluğu için hesaplanan yapısı Denklem 5.36'da ki gösterilmiştir.

$$P_{Finsler} = \frac{1}{2} \rho (ae^{aC_1})^{(-3/C_2)} \Gamma \left(\frac{3}{C_2} + 1 \right) \quad (5.36)$$

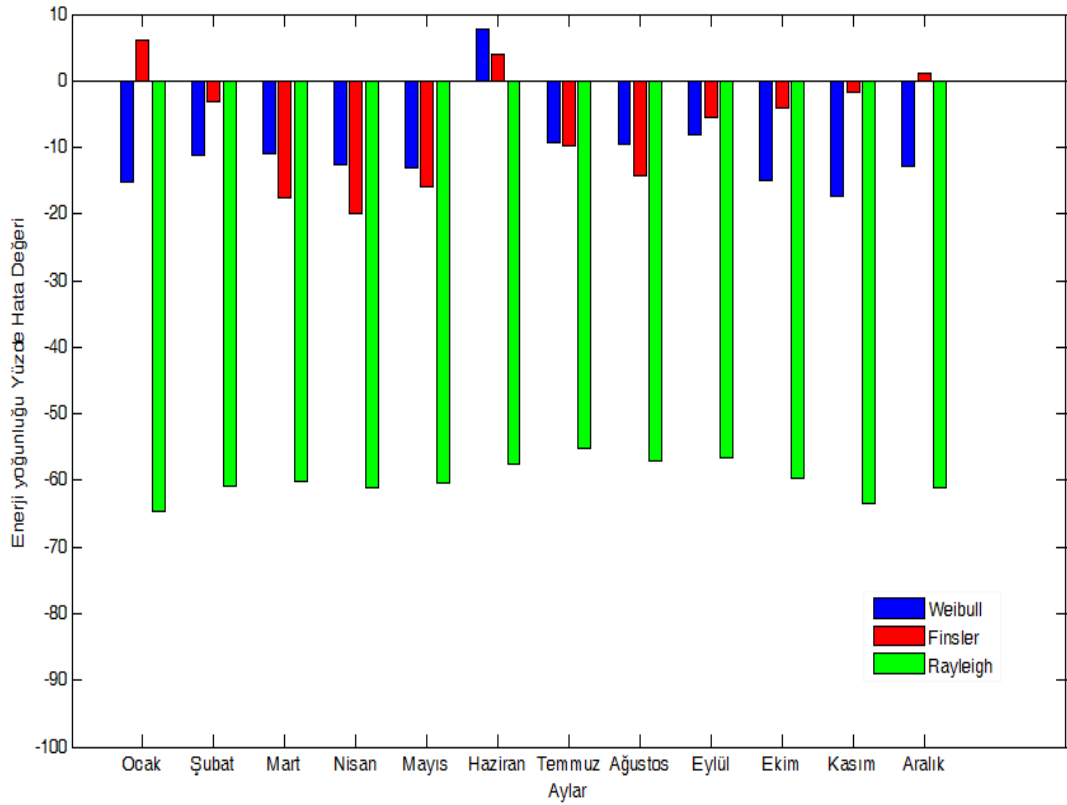
Burada a ifadesi $2/(n+2)$ 'i ifade ederken, C_1 ve C_2 Denklem 5.27'de verilen Finsler yaklaşımının parametrelerini ifade etmektedir.

Tüm bu denklem akışlarında da görülebileceği gibi rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesinde ki en önemli faktör rüzgar hızı olasılık dağılım fonksiyonun modellenenbilmesidir. Bu sebeple bir bölge için enerji potansiyeli açısından yapılacak her bir değerlendirme de rüzgar hızı olasılık dağılımı modelinin önemi görülmektedir.

Modeller için rüzgar enerji potansiyellerinin karşılaştırılmasında Denklem 5.37'de gösterilen güç yoğunluğu yüzde hata değeri (PDE) kullanılmıştır.

$$PDE = \left(\frac{P_{model} - P_{Ref}}{P_{Ref}} \right) * 100 \quad (5.37)$$

Modellerin aylık bazda hesaplanan güç değerlerine ilişkin Bilecik ili verileri kullanılarak hata değerleri üzerinden karşılaştırmalı sonuçları Şekil 5.4'de gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Modellerin enerji yoğunluğu yüzde hata değerleri.

Şekil 5.4'de gösterilen güç yoğunluklarının yüzde hata değişimlerine bakıldığında aylık bazda genel olarak Finsler geometri yaklaşımı ile elde edilen hata yüzdelерinin Weibull ve Rayleigh modellerine göre daha az olduğu görülmektedir. Finsler geometri metodunda görülen en yüksek güç yoğunluğu hata değeri % 19.8 değeri ile Nisan ayında gözlemlenmektedir. Rüzgar güç yoğunluklarında en düşük hata değeri Finsler yaklaşımında % 1.1 değeri ile Aralık ayında görülmektedir. Yapılan analizler Rayleigh dağılımının rüzgar güç yoğunluğu açısından % 50 hata oranının üzerinde yaklaşıma sahip olduğu görülmektedir. Mart ve Ağustos gibi bazı aylarda Weibull dağılım modelinin Finsler geometri yaklaşımına göre daha iyi sonuç verdiği görülsede genel olarak Finsler geometri tabanlı geliştirilen modelin ortalama 2-3 m/s düşük rüzgar hızlarında ki güç yoğunluklarını modelleme konusunda diğer modellere göre daha iyi sonuç verdiği söylenebilir.

Ortalama 5-6 m/s civarındaki rüzgar hızlarına sahip bölgelerdeki güç yoğunluklarını modelleme konusunda Weibull dağılımının daha hassas modelleme yeteneğine sahip olduğu görülmektedir. Örnek olarak, Bozcaada Mayıs ayı 2016 yılı

verilerinin analizinde Weibull yaklaşımında % 1.61 değerinde hata gözlemlenirken, Finsler ve Rayleigh de sırasıyla % 3.73 ve % 55.17 güç yoğunluğu hata değerleri hesaplanmıştır. Benzer şekilde Gökçeada Kasım ayı 2015 verileri analiz edildiğinde Weibull dağılım modelinin %1.00 hata değerine sahip olduğu görülürken, Finsler ve Rayleigh modellerinden elde edilen sonuçların sırasıyla % 6.22 ve % 60.67 olduğu gözlemlenmiştir. Tüm aylar baz alındığında Gökçeada ve Bozcaada bölgelerindeki güç yoğunluğu analizlerinde Weibull yaklaşımının diğer yöntemlere göre daha az hata oranlarında modelleme imkanı sunduğu görülmüştür.

Sonuç olarak bir önceki bölümde Finsler metrikleri ve bunlara ilişkin geodeziklerin hesaplanması ile elde edilen yeni modelin ortalama 2-3 m/s ve 5-6 m/s rüzgar rejimlerine sahip farklı bölgelerdeki performansları analiz edilmiştir. Bu kapsamda literatürde rüzgar hızı dağılımında sıklıkla kullanılan Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonları ile yeni yaklaşım uygulamalı olarak sunulmuştur. Elde edilen analiz sonuçlarında gerek ortalama 2-3 m/s rüzgar hızlarında gerekse ortalama 5-6 m/s yüksek rüzgar hızlarının olasılık dağılım fonksiyonlarını modelleme konusunda Finsler geometri yaklaşımının diğer modellere göre üstünlükleri model performans kriterleri de referans alındığında görülmektedir. Rüzgar hızının olasılık dağılımının modellenmesinde Finsler geometri yaklaşımının düşük hata değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Rüzgar gücü yoğunluğu açısından ise Rayleigh dağılımının farklı rüzgar hızı bölgelerinde hata oranının çok yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Finsler geometrisi ile geliştirilen yaklaşımın ise Weibull dağılımına göre ortalama 2-3 m/s rüzgar hızına sahip bölgelerde ki güç yoğunluklarını modelleme konusunda sahip olduğu düşük hata oranı, ortalama 5-6 m/s rüzgar hızına sahip bölgelerde gözlenememiştir.

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışması, yenilenebilir enerji alanında; rüzgar enerji sistemleri çalışmalarında kullanılmak üzere hem rüzgar hızı tahmini hem de rüzgar hızı modellemeleri konularında gerçekleştirilmiş özgün yaklaşımları içermektedir.

Rüzgar enerji sistemlerinden elde edilecek güç miktarını belirleyen en önemli parametrelerin başında rüzgar hızı gelmektedir. Bu sebeple rüzgar enerjisi dönüştürme sistemlerinin şebekeye entegrasyonunda rüzgar hızı tahmini büyük öneme sahiptir. Bu tez çalışması kapsamında rüzgar hızı tahmini üzerine ilk aşamada zaman serisi analizleri gerçekleştirilmiş olup SARIMA modelleri kullanılmıştır. Çalışmanın akışında farklı istatistiksel testler kullanarak hem durağanlık analizleri gerçekleştirilmiş hem de modellerin anlamlılıkları test edilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, SARIMA (1,0,0)(0,1,1)₁₂ modelinin RMSE, MSE ve MAPE hata performans kriterlerine göre sırasıyla 0.1829, 0.0334 ve 8.0003 değerleri gözlenmiş ve diğer modellere göre daha hassas yaklaşımda tahmin yeteneği elde edilmiştir. Rüzgar hızı tahmini üzerine gerçekleştirilen ikinci çalışmada, akıllı sezgisel yaklaşımlardan yapay sinir ağı modelleri kullanılarak farklı zaman periyotları için rüzgar hızı tahminleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde elde edilen sonuçlar doğrultusunda ileri beslemeli yapay sinir ağlarının (FFNN) saatlik, günlük, haftalık ve aylık analizlerde MSE değerleri eğitimde sırasıyla 0.0179, 0.0175, 0.0260 ve 0.0247 olarak gözlenirken, testte 0.0246, 0.0252 ve 0.0610 olarak elde edilmiştir. Jordan Elman (JENN) yapay sinir ağlarının ise yine eğitimde 0.0180, 0.0175, 0.0250 ve 0.0279 olarak, testte ise 0.0247, 0.0248, 0.0380 ve 0.0314 hata performans kriterleri elde edilmiştir. FFNN ve JENN yapay sinir ağı yapılarının kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağı yapısına göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Önceki çalışmalarda, zaman serisi analizleri ve yapay sinir ağlarının sıklıkla tahmin metodları olarak kullandığı gözlemlense de akıllı sezgisel yaklaşımlar ile oluşturulan modellerin farklı yapıdaki yöntemler ile hibrit yaklaşımların tahmin çalışmalarında ülkemizde çok fazla kullanılmadığı düşünüldüğünde bu tez çalışması kapsamında kullanılan Görgül Kip Ayrışımı rüzgar hızı tahmininde önemli bir açılım sağlamıştır. Görgül Kip Ayrışım metodu kullanılarak rüzgar hızı serileri farklı frekans ve yapıdaki bileşenlerine ayrıştırılmış ve farklı yapıdaki yapay sinir ağları ile hibrit bir yapı oluşturularak kısa dönemli rüzgar hızı modellemeleri gerçekleştirilmiştir. Sadece

FFNN ile oluşturulan modelde MSE ve MAE değerleri sırasıyla 0.2871 ve 0.4037 olarak gözlemlenirken, FFNN-GKA hibrit modelinde 0.0879 ve 0.2185 değerlerine düştüğü görülmüştür. Bu kapsamda elde edilen benzetim sonuçlarına göre, Görgül Kip Ayırışımı ve FFNN ile gerçekleştirilen hibrit modelin sadece yapay sinir ağı ile gerçekleştirilen modele göre daha iyi sonuç verdiği model performans kriteri sonuçlarına göre görülmüştür.

Tezin ana konusunu içeren rüzgar hızı modellemesinde ise; bir bölgeye rüzgar enerjisi dönüştürme sistemi kurulmadan önce o bölgenin rüzgar enerji potansiyeli belirlenme probleminden yola çıkılmıştır. Bu kapsamda rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesindeki en önemli etken rüzgar hızının modellenmesi ve karakteristiğinin çıkarılmasıdır. Dünya üzerindeki çalışmalarda rüzgar hızı modellemelerinde; Weibull, Rayleigh ve farklı dağılım fonksiyonları kullanıldığı görülse de bu yöntemlerin farklı bölgelerdeki modelleme yeteneklerinin birbirlerine göre değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Aynı zamanda bu modellerin parametrelerinin tahmin edilmesi de bir başka çalışma alanı olarak literatürde yer almaktadır. Bu amaç doğrultusunda tezin ikinci aşamasında rüzgar hızı verileri iki parametrelili Weibull dağılımı kullanılarak aylık, yıllık ve mevsimsel olarak analiz edilmiştir. 2016 yılında mevsimsel rüzgar hızı modellenmesi için önerilen Ters Weibull dağılımı, bu tez çalışmasında farklı olarak aylık dönemde analiz edilmiş ve Bilecik, Sakarya, Yalova, Bandırma, Gökçeada ve Bozcaada verileri kullanılarak altı farklı bölge için iki farklı model ile karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda aylık analizlerde sekiz aylık periyotta Yalova bölgesi için Ters Weibull dağılımının Weibull ve Rayleigh dağılımlarına göre daha uyumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Mevsimsel analizlerde TWD Sakarya için kış mevsiminde ve Yalova için yaz mevsiminde RMSE değerleri 0.0759 ve 0.1418 olarak gözlemlenmiş, diğer metotlara göre daha uyumlu olduğu görülmüştür. Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen en önemli yeniliklerden biri olan Riemann geometri tabanlı yeni bir parametre tahmini iki parametrelili Weibull dağılımı için uygulanmıştır. Bu kapsamda matematiğin yeni bir bilim dalı olarak gelişen bilgi geometrisi kullanılarak parametre tahmin metodu oluşturulmuş ve Riemann geometri tabanlı hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Yeni yaklaşım ile hesaplanmış parametre tahmin sonuçları, literatürde yer alan farklı parametre kestirim yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarına göre, geniş veri kümesine sahip

analizlerde Riemann geometri tabanlı gerçekleştirilen bilgi geometrisi metodunun diğer yöntemlere göre iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bilgi geometrisi metodunun aylık bazlı enerji potansiyeli analizlerinde en iyi % 1.1587 ve en kötü % 8.0470 hata değerleri görülmüştür. Yeni yaklaşımın aylık analizlerde güç yoğunluğu metoduna göre aynı performansı sağlayamadığı ama diğer yöntemlere göre üstün olduğu gözlemlenmiştir.

Tez çalışmasının son bölümünde gerçekleştirilen en önemli yeni yaklaşım; uygulamalı matematikte kullanılmamış fakat teoride var alan Finsler geometrinin uygulamalı bilimler açısından kullanımı için yeni teknikler geliştirilmesi ve hesaplamaların yapılmasıdır. İki boyutlu uzayda, iki parametrelili eğri aileleri için Finsler metrikleri ve bunlara ilişkin geodezikler tanımlanmıştır. Dünyada ilk kez, iki parametrelili Weibull dağılımı için Finsler metrikleri hesaplanmış ve bunlara ait geodezikler uygulamalı bilimler açısından kullanılabilirliği gösterilmiştir. Finsler metriklerinden yararlanılarak yeni bir olasılık ve kümülatif olasılık dağılımı önerilmiştir. İki parametrelili Weibull dağılımına göre modelleme yeteneği daha hassas olması beklenen bu yeni yaklaşımın rüzgar enerji sistemlerinde de kullanılabilirliği gösterilmiştir. Bu kapsamda en son bölümde; Finsler geometri tabanlı geliştirilen bu yeni yaklaşım, rüzgar hızı modellemesinde sıklıkla kullanılan Weibull ve Rayleigh dağılımları ile karşılaştırılmış ve benzetim sonuçları yorumlanmıştır. Rüzgar hızı için geliştirilen model Bilecik, Gökçeada ve Bozcaada bölgelerinden saatlik olarak ölçülüp kaydedilmiş olan yıllık veriler üzerinde gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, enerji potansiyeli açısından Finsler geometrisinin en düşük hata değerinin % 1.1 ve en yüksek hata değerinin ise % 19.8 gözlemlenmiştir. Ancak, Finsler tabanlı geliştirilen modelleme yöntemi bölgeden ve veriden bağımsızdır. Başka bir ifadeyle, bu modeller parametrelerinin değiştirilmesi sayesinde dünyadaki tüm bölgelerde rüzgar verileri için kullanılabilir niteliktedir.

Bu çalışmada geliştirilen Finsler geometri tabanlı modelde farklı parametre kestirim yöntemlerinin de gelecek çalışmalarda kullanılabileceği düşünülmektedir. Aynı zamanda Riemann geometri tabanlı geliştirilen parametre tahmin yaklaşımında farklı optimizasyon yöntemlerinin de kullanımı ve karşılaştırılmalı analizlerinin yapılabileceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdulkarim, A., Abdelkader, S. M., and Morrow, D. J., "Statistical analyses of wind and solar energy resources for the development of hybrid microgrid", *In 2nd International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials (ENEFM2014)*, Springer International Publishing, 9-14 (2015).
- Akdağ, S.A., "Rüzgar enerjisi potansiyeli ve ekonomik analizinde Weibull dağılımının kullanımı", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2008).
- Akdağ, S. A. and Güler, Ö., "Calculation of Wind Energy Potential and economic analysis by using weibull distribution—a case study from turkey. Part 1: determination of weibull parameters", *Energy Sources, Part B*, 4(1): 1-8 (2009).
- Akdağ, S. A., and Güler, Ö., "Wind characteristics analyses and determination of appropriate wind turbine for Amasra—Black Sea region, Turkey", *International Journal of Green Energy*, 7(4): 422-433 (2010).
- Akdağ, S. A. and Güler, Ö., "Weibull Dağılım Parametrelerini Belirleme Metodlarının Karşılaştırılması", *VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*, (2008).
- Akdağ, S. A., and Dinler, A., "A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications", *Energy Conversion and Management*, 50(7): 1761-1766 (2009).
- Akgül, F. G., Şenoğlu, B. and Arslan, T. "An alternative distribution to Weibull for modeling the wind speed data: Inverse Weibull distribution", *Energy Conversion and Management*, 114: 234-240 (2016)
- Akinci, T. C., "Short term wind speed forecasting with ANN in Batman, Turkey", *Elektronika ir Elektrotehnika*, 107(1): 41-45 (2015).
- Amari, S. I., "Differential geometrical methods in statistics", *Springer Lecture Notes in Statistics*, 28. Springer-Verlag, Berlin, (1985).

- Amari, S. I, Nagaoka H., "Methods of information geometry", **American Mathematical Society**, Oxford University Press, Oxford, (2000).
- Antonelli, P. L., Bona, A. and Slawinski M. A., "Seismic rays as Finsler geodesics," **Nonlinear Analysis: Real World Applications**, 4(5): 711–722 (2003).
- Arwini, K., Dodson, C., T., J., "Alpha-geometry of the Weibull manifold", **In: Second Basic Science Conference**, Tripoli,(2007).
- Bardsley, W. E., "Note on the use of the inverse Gaussian distribution for wind energy applications" **Journal of Applied Meteorology**, 19(9): 1126-1130 (1980).
- Baseer, M. A., Meyer, J. P., Rehman, S. and Alam, M. M., "Wind power characteristics of seven data collection sites in Jubail, Saudi Arabia using Weibull parameters", **Renewable Energy**, 102: 35-49 (2017).
- Bassyouni, M, Gutub, S. A, Javaid U., Awais, M., Rehman, S., Hamid SS, Abdel-Aziz M. H., Abouel-Kasem, A. and Shafeek, H. "Assessment and analysis of wind power resource using weibull parameters", **Energy Exploration & Exploitation**, 33(1): 105-22 (2015).
- Brano, V. L., Orioli, A., Ciulla, G. and Culotta, S., "Quality of wind speed fitting distributions for the urban area of Palermo, Italy", **Renewable Energy**, 36(3): 1026-1039 (2011).
- Bao, D., Robles, C. and Shen Z., "Zermelo navigation on Riemannian manifolds", **Journal of Differential Geometry**, 66(3): 377–435, 2004.
- Ceyhan S. ve Çivi G., "Bazı özel kropina uzayları ve kropina metrik dönüşümleri", **Türkiye Alim Kitapları**, (2014).
- Cadenas, E. and Rivera, W., "Short term wind speed forecasting in La Venta, Oaxaca, México, using artificial neural networks", **Renewable Energy**, 34(1): 274-278 (2009).

- Carta, J. A., Ramirez, P. and Velazquez, S., "A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis: Case studies in the Canary Islands", ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, 13(5): 933-955 (2009).
- Catalão, J. P. D. S., Pousinho, H. M. I. and Mendes, V. M. F., "An artificial neural network approach for short-term wind power forecasting in Portugal", ***In Intelligent System Applications to Power Systems, 2009. ISAP'09. 15th International Conference on IEEE***, 1-5 (2009).
- Celik, A. N., "A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey", ***Renewable Energy***, 29(4): 593-604 (2004).
- Dokur, E., and Kurban, M., "Wind Speed Potential Analysis Based on Weibull Distribution", ***Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering***, 3(4):231-235 (2015 a).
- Dokur, E., Kurban, M., Ceyhan S., "Hybrid Model for Short Term Wind Speed Forecasting Using Empirical Mode Decomposition and Artificial Neural Network", ***International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO 2015)***, 26-28 November 2015, Bursa,Turkey, (2015 b).
- Dokur, E. ve Kurban, M., "Bilecik İli Rüzgar Hızı Potansiyeli Analizi", ***Ulusal Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu (UMAS 2015)***, 10-12 Eylül 2015, Düzce, (2015 c).
- Dokur, E., Kurban, M. ve Ceyhan, S., "Bilecik İli Rüzgar Enerjisi Potansiyel Analizinde Weibull Dağılım Parametrelerini Belirleme Metotlarının Karşılaştırılması", ***Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu (YEKSEM 2015)***, 15-16 Ekim 2015, Adana, (2015 d).
- Dokur, E., Ceyhan, S. and Kurban, M., "Wind Speed Modelling Using Inverse Weibull Distribution: A Case Study for Bilecik, Turkey", ***International Journal of Energy Applications and Technologies***, 3(2):35-39 (2016 a).

- Dokur, E., Kurban, M. and Ceyhan S. "Emprical Mode Decomposition and Elman-Jordan Neural Networks Based Hybrid Wind Speed Forecasting", ***International Multidisciplinary Congree of Eurasia (IMCOFE 2016)***, 11-13 July 2016, Odessa, Ukraine, (2016 b).
- Dokur, E., Kurban, M. and Ceyhan, S. "Assessment of Wind Speed Forecasting Models for Wind Energy Conversion System", ***International Conference on Engineering and Natural Science***, 24-28 May 2016, Sarejevo, Bosnia Herzegovina, (2016 c).
- Dokur, E., Kurban M., Ceyhan S., "Wind Speed Modeling Using Two-Parameter Weibull Distribution for Potential Analysis", ***International Conference on Engineering and Natural Science***, 24-28 May 2016, Sarejevo, Bosnia Herzegovina, (2016 d).
- Dokur, E., Kurban M. and Ceyhan S., "Short Term Forecasting of Wind Speed Using SARIMA Models with Statistical Tests", ***8th International Ege Energy Symposium and Exhibition***, 11-13 May 2016, Afyon, Turkey, (2016 e)
- Dokur, E., Kurban, M. and Ceyhan, S., "Hybrid Forecasting Model for Wind Speed Using Wavelet and Artificial Neural Network", ***8th International Ege Energy Symposium and Exhibition***, 11-13 May 2016, Afyon, Turkey, (2016 f).
- Dokur E., Kurban M., Karakuzu C., "Artificial Neural Network Models for Different Time Periods of Wind Speed Prediction", ***The International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences (ICETAS2016)***, 21-22 April 2016, Afyon, Turkey, (2016 g).
- Dokur, E., Ceyhan, S. and Kurban, M., "Finsler Geometry for Two-Parameter Weibull Distribution", ***Mathematical Problems in Engineering***, (2017 a).
- Dokur, E., Kurban, M. and Ceyhan, S., "Finsler Geometri Tabanlı Rüzgar Hızı Modellemesi için Yeni Bir Metrik Tanımlama", ***The International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences (ICETAS2017)***, 20-21 April 2017, Baia Mare, Romania, 38-41 (2017 b).

- Dokur, E., Kurban, M. and Ceyhan S., "İki Parametrelili Ters Weibull Dağılımının Rüzgar Hızı Modellemesinde Kullanımı", *The International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences (ICETAS 2017)*, 20-21 April 2017, 42-46, Baia Mare, Romania, (2017 c).
- Dokur, E., Ceyhan, S. and Kurban M., "Using a New Method Based on Finsler Geometry for Wind, Speed Modelling", *5th International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT 2017)*, Bahcesehir University, May 9-12, 2017, İstanbul, (2017 d).
- Galanis, G., Chu, P. C., Kallos, G., Kuo, Y. H. and Dodson, C. T. J., "Wave height characteristics in the north Atlantic ocean: a new approach based on statistical and geometrical techniques", *Stochastic Environment Research and Risk Assessment*, 26(1): 83-103 (2012).
- Garcia, A., Torres, J. L., Prieto, E. and De Francisco A., "Fitting wind speed distributions: a case study", *Solar Energy*, 62(2): 139-144 (1998).
- Guo, Z., Zhao, W., Lu, H. and Wang, J., "Multi-step forecasting for wind speed using a modified EMD-based artificial neural network model", *Renewable Energy*, 37(1): 241-249 (2012).
- Gülbiç, G., "Enerji sistemlerine erişimin önemi ve enerji sistemlerine erişememenin sosyal etkileri: bir Yalova değerlendirmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Yalova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yalova, (2016).
- GWEC, "Global Wind Report 2016", <http://www.gwec.net/publications>, (2016).
- Hu, J., Wang, J. and Zeng, G., "A hybrid forecasting approach applied to wind speed time series", *Renewable Energy*, 60: 185-194 (2013).
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q. and Liu, H. H., "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis" *In Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences The Royal Society*, 454(71): 903-995 (1998).

- IEA., Key World Energy Statistics, IEA: <https://www.iea.org/publications>., (Ziyaret Edilme Tarihi, 24.03.2017).
- Jaramillo, O. A. and Borja, M. A., "Wind speed analysis in La Ventosa, Mexico: a bimodal probability distribution case", *Renewable Energy*, 29(10):1613-1630 (2004).
- Justus, C.G., Hargraves, W. R. and Yalcin, A., "Nationwide assessment of potential output from wind-powered generators" *Journal of Applied Meteorology* 15(7): 673-678 (1976).
- Moustris, K. P., Zafirakis, D., Alamo, D. H., Medina, R. N. and Kaldellis, J. K., "24-h Ahead Wind Speed Prediction for the Optimum Operation of Hybrid Power Stations with the Use of Artificial Neural Networks", *In Perspectives on Atmospheric Sciences Springer International Publishing*, 409-414 (2017).
- Pishgar-Komleh, S. H., Keyhani, A. and Sefeedpari, P., "Wind speed and power density analysis based on Weibull and Rayleigh distributions (a case study: Firouzkooch county of Iran)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42:313-322 (2015).
- Sharma, K. and Ahmed, M. R., "Wind energy resource assessment for the Fiji Islands: Kadavu Island and Suva Peninsula", *Renewable Energy*, 89: 168-180 (2016).
- Shukur, O. B. and Lee, M. H., "Daily wind speed forecasting through hybrid KF-ANN model based on ARIMA", *Renewable Energy*, 76:637-647 (2015).
- Selcuk, N. H., Akinci, T. C. and Eidukeviciute, M. "Application of artificial neural networks for short term wind speed forecasting in Mardin, Turkey", *Journal of Energy in Southern Africa*, 23(4): 2-7(2012).
- Kaminsky, F. C., "Four probability densities/log-normal, gamma, Weibull, and Rayleigh/and their application to modelling average hourly wind speed", *In International Solar Energy Society Annual Meeting*, 19-6 (1977).

- Kiss, P. and János, I. M., Comprehensive empirical analysis of ERA-40 surface wind speed distribution over Europe", *Energy Conversion and Management*, 49(8): 2142-2151 (2008).
- Kollu, R., Rayapudi, S. R., Narasimham, S. V. L. and Pakkurthi, K. M. "Mixture probability distribution functions to model wind speed distributions" *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 3(1): 27 (2012).
- Kurban, M., Hocaoglu, F. O. and Kantar, Y. M., "The comparative analysis of two different statistical distributions used to estimate the wind energy potential", *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 13(1):103-9 (2007).
- Liu, H., Chen, C., Tian, H. Q. and Li, Y. F. "A hybrid model for wind speed prediction using empirical mode decomposition and artificial neural networks", *Renewable Energy*, 48: 545-556 (2012).
- Liu, X. J., Mi, Z. Q., Bai, L. and Wu, T., "A novel approach for wind speed forecasting based on EMD and time-series analysis", *In Power and Energy Engineering Conference APPEEC 2009. Asia-Pacific IEEE*, 1-4 (2009).
- Luna, R. E. and Church, H. W., "Estimation of long-term concentrations using a "universal" wind speed distribution", *Journal of Applied Meteorology*, 13(8): 910-916 (1974).
- Markvorsen, S., "A Finsler geodesic spray paradigm for wildfirespread modelling", *Nonlinear Analysis: RealWorld Applications*, 28: 208–228 (2016).
- Matsumoto, M., "The inverse problem of variation calculus in two-dimensional Finsler space", *Journal of Mathematics of Kyoto University*, 29(3): 489–496 (1989).
- Matsumoto, M., "Geodesics of two-dimensional Finsler spaces", *Mathematical and Computer Modelling*, 20(4-5): 1–23 (1994).

- Matsumoto, M., "Two-dimensional Finsler spaces whose geodesics constitute a family of special conic sections", *Journal of Mathematics of Kyoto University*, 35(3): 357–376 (1995).
- Mert, A., and Akan, A., "Detrended fluctuation thresholding for empirical mode decomposition based denoising", *Digital Signal Processing*, 32: 48-56 (2014).
- Morgan, E. C., Lackner, M., Vogel, R. M. and Baise, L.G., "Probability distributions for offshore wind speeds", *Energy Conversion and Management*, 52(1): 15-26 (2011).
- Oral, F., "Sakarya-Esentepe yöresi rüzgar enerjisi potansiyelinin yeni bir yaklaşımla belirlenmesi", Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2010).
- Rosen, K., Van Buskirk, R. and Garbesi, K., "Wind energy potential of coastal Eritrea: an analysis of sparse wind data", *Solar Energy*, 66(3): 201-213 (1999).
- Sherlock, R.H., "Analyzing winds for frequency and duration", *In On Atmospheric Pollution American Meteorological Society*, 42-49 (1951).
- Öğüt, V., "Rüzgar hızının sinirsel bulanık yöntemle tahmini", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2014).
- Takle, E. S. and Brown, J. M., "Note on the use of Weibull statistics to characterize wind-speed data", *Journal of Applied Meteorology*, 17(4): 556-559(1978).
- Tureb, Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, "Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu", <http://www.tureb.com.tr/yayinlar> (2017).
- Van, D. A. L, Meyer D. F and Malet, L. M., "The use of the Weibull three-parameter model for estimating mean wind power densities", *Journal of Applied Meteorology*, 19(7): 819-825 (1980).
- Wang, J., "A hybrid wavelet transform based short-term wind speed forecasting approach", *The Scientific World Journal*, (2014).

- Yalçın, N., " Sezgisel algoritma öğrenmeli yapay sinir ağları ile epilepsi hastalığının teşhisi", Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, (2012).
- Yajima T. and Nagahama, H., "Finsler geometry for nonlinear path of fluids flow through inhomogeneous media", *Nonlinear Analysis. RealWorld Applications*, 25:1–8 (2015).
- Kantar, Y. M., Kurban, M. and Hocaoglu, F. O., "Comparison of six different parameter estimation methods in wind power applications", *Scientific Research and Essays*, 6(32): 6594-6604 (2011).
- Zaharim, A., Najid, S. K., Razali, A. M. and Sopian, K., "Analyzing Malaysian wind speed data using statistical distribution", *In Proceedings of the 4th IASME/WSEAS International Conference on Energy & Environment*, Cambridge, UK, (2009).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Emrah Dokur
Doğum Yeri ve Tarihi : İstanbul, 27/07/1987



Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : İstanbul Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans Öğrenimi : İTÜ
Elektrik Mühendisliği Bölümü
Danışman: Prof. Dr. Aydoğan ÖZDEMİR

Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

İş Deneyimi

Stajlar : Sensormatic Güvenlik Sistemleri A.Ş., İstanbul.
Arçelik A.Ş., Çerkezköy, Tekirdağ.

Projeler : 154 kV Geçit İzolatörü Tasarımı, İTÜ YG. Lab.
(Tübitak Projesi, Araştırmacı)

Çalıştığı Kurumlar : Arçelik A.Ş. Çerkezköy Kampüsü Elektrik Motorları ve
Kurutma Makinesi Fabrikası (Üretim Mühendisi)
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü (Arş.Gör.)
(Devam Ediyor)

İletişim

Adres : Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi
Tel : 0228 214 14 18
E-Posta Adresi : emrah.dokur@bilecik.edu.tr

Akademik Çalışmaları

Uluslararası Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. **Dokur E.**, Kurban M., Wind Speed Potential Analysis Based on Weibull Distribution, Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering ISSN:2147-284X, Vol.3 No.4, , DOI: 10.17694/bajece.72748,2015
2. **Dokur E.**, Ceyhan S., Kurban M. Wind Speed Modelling Using Inverse Weibull Distribution: A Case Study for Bilecik, Turkey, International Journal Of Energy Applications and Technologies, Vol. 3, Issue 2, pp. 35 – 39, 2016
3. **Dokur E.**, Ceyhan S., Kurban M. Finsler Geometry for Two-Parameter Weibull Distribution Mathematical Problems in Engineering ISSN: 1024-123X Doi:10.1155/2017/9720946, Volume 2017 (SCI).
4. **Dokur, E.**, Akıl, M., Köksal, Ç., & Kurban, M. Grounding Systems Design with 3D-software for Solar Chimney Power Plant, International Journal Of Energy Applications and Technologies pp 18-27, 2017.
5. **Dokur E.**, Ceyhan S., Kurban M., Monthly Average Forecasting of Wind Speed Using Time Series Models, Journal of Environmental Science, Computer Science and Engineering & Technology, DOI: 10.24214/jecet.C.6.3.26069 pp. 260-269, 2017.

Ulusal Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. Gökhasan O., Örs O., **Dokur E.**, Kurban M., Ulaşım Sistemlerinde Titreşim Tabanlı Enerji Hasadı ve Uygulamalı Analizi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, ISSN: 2148-2330, Cilt:1, Sayı:1, Sayfa 52-58, 2014,
2. Demiröz E., Kurban M., **Dokur E.**, Güneş Enerji Sistemlerinin Verimlilik Analizi, Bilecik-Kütahya Uygulaması, Journal of Advanced Technology Sciences, ISSN:2147-3455, Cilt:5, Sayı:2, Sayfa 87-100, 2016

Uluslararası Sempozyum / Konferans / Kongre Bildirileri

1. **Dokur E.**, Ozdemir A., Ilhan S., Simulation-Based Optimum High Voltage Bushing Design, IEEE PowerTech 2013, 16-20 June, 2013, Grenoble-FRANCE

-
2. Akıl M., **Dokur E.**, Kurban M. 2014, Güneş Bacası Sistemlerinde Kullanılan Rüzgar Türbinlerinin Karşılaştırmalı Analizi, 2. Uluslararası Mühendislik ve Bilim Alanında Yenilikçi Teknolojiler Sempozyumu,18-20 Haziran 2014 Karabük,Türkiye
-
3. **Dokur E.**, Ozdemir A., Ilhan S., Matlab Gui Based Data Acquisition and Processing of Lightning Impulse Voltages , International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2014), 8-11 September, 2014, Poznan-Poland
-
4. Demir F., **Dokur E.**, Kurban M., Comparative Economic Analysis of HVDC and HVAC Power Network Interconnection: Turkey-Turkish Republic of Northern Cyprus Analysis, International Multidisciplinary Congree of Eurasia (IMCOFE 2015),1-5 September,2015 Skopje, Macedonia
-
5. **Dokur E.**, Kurban M., Electrical Field Analysis of Eccentric Axial 220 kV and 380 kV High Voltage Underground Cable, International Multidisciplinary Congree of Eurasia (IMCOFE 2015),1-5 September,2015 Skopje, Macedonia
-
6. **Dokur E.**, Kurban M., Ceyhan S., 2015, Hybrid Model for Short Term Wind Speed Forecasting Using Empirical Mode Decomposition and Artificial Neural Network, International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO 2015) ,26-28 November 2015, Bursa,Turkey
-
7. **Dokur E.**, Kurban M., Ceyhan S. 2016, Wind Speed Modelling Using Inverse Weibull Distribution: A Case Study for Bilecik, Turkey 3rd International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'16),1-3 September 2016, Konya, Turkey
-
8. **Dokur E.**, Kurban M., Ceyhan S. 2016, Emprical Mode Decomposition and Elman-Jordan Neural Networks Based Hybrid Wind Speed Forecasting International Multidisciplinary Congree of Eurasia (IMCOFE 2016),11-13 July 2016, Odessa, Ukraine
-

-
9. **Dokur E.**, Kurban M., 2016, The Integrated Solar Wall and PV Systems for Energy Based Efficient Building Design, International Multidisciplinary Congree of Eurasia (IMCOFE 2016),11-13 July 2016, Odessa, Ukraine
-
10. **Dokur E.**, Kurban M., 2016, FEMM Based High Voltage Underground Cable Air Gap Effect Analysis , International Multidisciplinary Congree of Eurasia (IMCOFE 2016),11-13 July 2016, Odessa, Ukraine
-
11. **Dokur E.**, Kurban M., 2016, Calculation of Impulse Voltage Generator System Parameters and PSPICE Analysis , International Multidisciplinary Congree of Eurasia (IMCOFE 2016),11-13 July 2016, Odessa, Ukraine
-
12. **Dokur E.**, Kurban M., Ceyhan S., 2016, Assessment of Wind Speed Forecasting Models for Wind Energy Conversion System , International Confence on Engineering and Natural Science,24-28 May 2016, Sarejevo, Bosnia Herzegovina
-
13. **Dokur E.**, Kurban M., Ceyhan S., 2016, Wind Speed Modeling Using Two-Parameter Weibull Distribution for Potential Analysis , International Confence on Engineering and Natural Science,24-28 May 2016, Sarejevo, Bosnia Herzegovina
-
14. **Dokur E.**, Kurban M., Ceyhan S., 2016, Short Term Forecasting of Wind Speed Using SARIMA Models with Statistical Tests, 8th International Ege Energy Symposium and Exhibition,11-13 May 2016, Afyon, Turkey
-
15. **Dokur E.**, Kurban M., Ceyhan S., 2016, Hybrid Forecasting Model for Wind Speed Using Wavelet and Artificial Neural Network, 8th International Ege Energy Symposium and Exhibition,11-13 May 2016, Afyon, Turkey
-
16. **Dokur E.**, Kurban M., Karakuzu C., 2016, Artificial Neural Network Models for Different Time Periods of Wind Speed Prediction, The International
-

Conference on Engineering Technology and Applied Sciences (ICETAS2016),21-22 April 2016, Afyon, Turkey

17. **Dokur E.**, Kurban M., Ceyhan S., Finsler Geometri Tabanlı Rüzgar Hızı Modellemesi için Yeni Bir Metrik Tanımlama , The International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences (ICETAS2017), ISBN: 978-973-0-23973-7, pp. 38-41 20-21 April 2017, Baia Mare, Romania

18. **Dokur E.**, Kurban M., Ceyhan S., İki Parametrelili Ters Weibull Dağılımının Rüzgar Hızı Modellemesinde Kullanımı , The International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences (ICETAS 2017), ISBN: 978-973-0-23973-7, pp. 42-46 20-21 April 2017, Baia Mare, Romania

19. **Dokur E.**, Ceyhan S., and Kurban M., 2017, Using a New Method Based on Finsler Geometry for Wind, Speed Modelling, 5th International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT 2017), Bahcesehir University, May 9-12, 2017, İstanbul.

Ulusal Sempozyum / Konferans / Kongre Bildirileri

1. **Dokur E.**, Köse N.F., Kurban M., Ozdemir A., Simulation Based Electric Field Analysis of Line Post Insulator, Electrical, Electronics and Computer Engineering Symposium ELECO'12, Nov.29-Dec.1 2012, Bursa,(Hava Hattı Mesnet İzolatörü İçin Benzetim Tabanlı Elektrik Alan Dağılımı İncelemesi, Elektrik-Elektronik Ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ELECO 2012, 29 Kasım-2 Aralık 2012,Bursa.

2. Işıksoluğu M., **Dokur E.** ve Kurban M., 2012. Jeotermal Enerji Santrallerinin TürkiyeAçısından Değerlendirilmesi, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO'12),29 Kasım-2 Aralık 2012,Bursa.

3. Hantekin C., **Dokur E.** Kurban M. "Türkiye için Rüzgar ve Katı Atık Depo Gazlı Hibrit Enerji Üretim Sistemleri Yer Durum Tespiti", Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu 2013, YEKSEM 2013,Kıbrıs

-
4. Gökhasan O., Örs O., **Dokur E.**, Kurban M.,2014. Raylı Sistemlerde Hibrit (Güneş Piezoelektrik) Yapıların Kullanılabilirliğine İlişkin Yeni Bir Yaklaşım", IV. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Konferansı, (UGHEK 2014), Eskişehir, 22-23 Mayıs 2014

 5. **Dokur E.**, Kurban M.,2014. Enerji Tabanlı Etkin Bina Tasarımında Güneş Duvarlarının Kullanımı, IV. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Konferansı, (UGHEK 2014), Eskişehir, 22-23 Mayıs 2014

 6. Akıl M., **Dokur E.**, Kurban M.,2014. Güneş Bacalarının Simülasyon Tabanlı 3-Boyutlu Topraklama Sistemi Analizi, IV. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Konferansı, (UGHEK 2014), Eskişehir, 22-23 Mayıs 2014

 7. Bozkurt H., **Dokur E.**, Köksal Ç., 2014, Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Ertuğrulgazi ve Osmangazi Tünelleri İçin Değerlendirilmesi, 1. Karayolu Akıllı Ulaşım Sistemleri Kongre ve Sergisi (KAUS 2014), 26-28 Mayıs 2014, İstanbul

 8. Oguzhan U., Okur İ., Kılıçlı S., **Dokur E.**, Kurban M., 2015, Rüzgar Hızı Kestiriminde Kullanılan Bazı Veri Analiz Yöntemleri Ve Modellerinin Değerlendirilmesi, IV. Yenilenebilir Enerji Sistemleri Kış Okulu, 15-18 Ocak 2015, Afyon (poster)

 9. Örs O. Kurban M. **Dokur E.**, 2015, Piezoelektrik Malzemelerin Kullanım Alanlarına Göre Verimlilik Analizi, Türkiye Elektronik Sanayi ve Elektronik Mühendisliği Kurultayı (TESEM 2015), 22-23 Mayıs 2015, Bursa

 10. Çakmak Ç., Kurban M., **Dokur E.**, 2015, Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemlerinin Ekonomik Analizi, VI. Enerji Verimliliği Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi (EVK 2015),04-06 Haziran2015, Sakarya

 11. **Dokur E.**, Kurban M., 2015, Bilecik İli Rüzgar Hızı Potansiyeli Analizi, Ulusal Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu (UMAS 2015) 10-12 Eylül 2015, Düzce

12. Demiröz E., Kurban M., **Dokur E.**, Güneş Enerji Sistemlerinin Verimlilik Analizi, Ulusal Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu (UMAS 2015) 10-12 Eylül 2015, Düzce

13. **Dokur E.**,Kurban M., Ceyhan S., Bilecik İli Rüzgar Enerjisi Potansiyel Analizinde Weibull Dağılım Parametrelerini Belirleme Metotlarının Karşılaştırılması, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu 2015 (YEKSEM 2015),15-16 Ekim 2015, Adana

14. Köten Ö., **Dokur E.**, Kurban M., 2016, Hibrit (Güneş-Rüzgar) Yenilenebilir Enerji Sistemlerinin Ekonomik Analizi ve Optimizasyonu, V. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi (UGHEK 2016),12-13 Mayıs 2016, Eskişehir

15. Sarı E., **Dokur E.**, Kurban M., 2016, Yazılım Tabanlı Güneş Enerjisi Güç Sistemi Fizibilite Analiz, V. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi (UGHEK 2016),12-13 Mayıs 2016, Eskişehir (Poster)

16. Sarı E., **Dokur E.**, Kurban M., 2016, Lisanssız Güneş Enerjisi Elektrik Üretimi İçin Yasal Adımlar, V. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi (UGHEK 2016),12-13 Mayıs 2016, Eskişehir (Poster)

ÖDÜLLER

1. İstanbul Bahçelievler Lisesi Okul Birinciliği Ödülü

2. En İyi Sunum Ödülü 3rd International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT 2016)

3. En İyi Sunum Ödülü 4rd International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT 2017)

Tarih:15/06/2017