

T.C.  
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGÂR TÜRBİNİ GÜÇ EĞRİLERİ İÇİN ETKİN AYKIRI DEĞER TESPİTİ

Tezi Hazırlayan  
Abdullah Emin OFLAZ

Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Mehmet YEŞİLBUDAK

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi

TEMMUZ 2023



T.C.  
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGÂR TÜRBİNİ GÜÇ EĞRİLERİ İÇİN ETKİN AYKIRI DEĞER TESPİTİ

Tezi Hazırlayan  
Abdullah Emin OFLAZ

Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Mehmet YEŞİLBUDAK

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi

Temmuz 2023

Doç. Dr. Mehmet YEŞİLBUDAK danışmanlığında Abdullah Emin OFLAZ tarafından hazırlanan "**Rüzgâr Türbini Güç Eğrileri için Etkin Aykırı Değer Tespiti**" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

12/07/2023

## **JÜRİ**

Başkan : Prof. Dr. Erdal IRMAK

Üye : Doç. Dr. Mehmet YEŞİLBUDAK

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Göksel GÖKKUŞ

## **ONAY:**

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun ..... tarih ve ..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

.../.../2023

Doç. Dr. Cemal ÇARBOĞA  
Enstitü Müdürü

## TEZ BİLDİRİM SAYFASI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada yer alan bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Abdullah Emin OFLAZ



## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam süresince tüm bilgilerimi benimle paylaşmaktan kaçınmayan, her türlü konuda desteğini benden esirgemeyen ve tezimde büyük emeği olan, aynı zamanda kişilik olarak da bana çok şey katan Sayın Hocam Doç. Dr. Mehmet YEŞİLBUDAK'a ve maddi ve manevi olarak her zaman desteklerini hissettiren değerli AİLEME teşekkür ederim.



# RÜZGÂR TÜRBİNİ GÜÇ EĞRİLERİ İÇİN ETKİN AYKIRI DEĞER TESPİTİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Abdullah Emin OFLAZ

NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2023

## ÖZET

Enerji, toplumların refah düzeyinin artmasında önemli bir faktördür. Enerji üretiminde yaygın olarak kullanılan fosil yakıtlar her geçen gün azalmaktadır. Bu durum, gelecekte fosil yakıt rezervlerinin tükeneceğini göstermekte olup, yenilenebilir enerji kullanımının artmasına yol açmaktadır. Rüzgâr enerjisi, yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Orta ve uzun vadeli kullanım istikrarı ve düşük çevresel etkisi nedeniyle çoğu coğrafi alanda öne çıkmaktadır. Rüzgâr türbini güç eğrileri, rüzgâr enerji değerlendirmesi, şebeke planlaması ve sorun giderme için oldukça önemlidir. Bununla birlikte, güç eğrilerinde bulunan anormal verilerin, güç çıkışını doğru bir şekilde modellemek için temizlenmesi gerekir. Bu tez çalışmasında, öncelikle, bulanık c-ortalamalar algoritması kullanılarak hem ham güç eğrileri birden fazla kümeye bölünmüş hem de mevcut veri noktalarının birden fazla kümeye ait olma durumları değerlendirilmiştir. Bu sayede, anormal veriler daha kapsamlı analiz edilmiştir. Sonrasında, kümelenmiş ham güç eğrileri için Mahalanobis uzaklıkları hesaplanarak hem anormal veriler çok değişkenli olarak değerlendirilmiş hem de mevcut veri noktaları anormallik düzeyine göre renklendirilmiştir. Bu sayede, anormal veriler daha etkin temizlenmiştir. Ayrıca, 12 ay süresince 10 dakika aralıklarla toplanan ve mevsimsel etkileri içeren veri setlerinden yararlanılmıştır. Sonuç olarak, uygulanan anormal veri tespit yaklaşımı, rüzgâr türbini güç eğrileri için güvenilir ve verimli sonuçlar sağlamıştır.

*Anahtar kelimeler: Rüzgâr Türbini, Güç Eğrisi, Bulanık C-Ortalamalar Algoritması, Mahalanobis Uzaklığı, Aykırı Değer Tespiti.*

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet YEŞİLBUDAK**  
**Sayfa Adeti: 55**

**EFFECTIVE OUTLIER DETECTION FOR WIND TURBINE POWER  
CURVES  
(M. Sc. Thesis)**

**Abdullah Emin OFLAZ**

**NEVSEHIR HACI BEKTAS VELİ UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**July 2023**

**ABSTRACT**

Energy is an important factor in increasing the welfare level of societies. Fossil fuels, which are widely used in energy production, are decreasing day by day. This condition indicates that fossil fuel reserves will be depleted in the future, and leads to an increase in the use of renewable energy. Wind energy is a renewable energy source. It stands out in most geographical areas due to its medium- and long-term usage stability and low environmental impact. Wind turbine power curves are crucial for wind energy assessment, grid planning and troubleshooting. However, abnormal data found in the power curves needs to be cleaned in order to accurately model the power output. In this thesis, first of all, by using fuzzy c-means algorithm, both the raw power curves were partitioned into more than one cluster and the status of belonging to more than one cluster of existing data points were evaluated. Thus, abnormal data were analyzed more comprehensively. Afterwards, by computing the Mahalanobis distances for the clustered raw power curves, both abnormal data were evaluated as multivariate and available data points were colorized according to the level of abnormality. Thus, abnormal data were cleaned more effectively. In addition, the datasets, which were collected at 10-min intervals for 12 months and included seasonal effects, were used. As a result, the applied abnormal data detection approach provided reliable and efficient results for wind turbine power curves.

***Keywords: Wind Turbine, Power Curve, Fuzzy C-Means Algorithm, Mahalanobis Distance, Outlier Detection.***

**Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet YEŞİLBUDAK  
Page Number: 55**



## İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI .....	i
TEZ BİLDİRİM SAYFASI .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
TABLOLAR LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	x
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ.....	xi
1.BÖLÜM	
GİRİŞ .....	1
2. BÖLÜM	
RÜZGÂR ENERJİSİ .....	6
2.1. Rüzgâr Oluşumu .....	7
2.2. Rüzgâr Enerjisinin Üstünlükleri .....	7
2.3. Rüzgâr Türbini ve Bileşenleri.....	8
2.4. Rüzgâr Türbininin Teorik Gücü.....	9
2.5. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması.....	10
2.5.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri.....	10
2.5.2. Düşey eksenli rüzgâr türbinleri.....	11
2.5.3. Eğik eksenli rüzgâr türbinleri.....	12

2.6.	Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemleri.....	12	
2.7.	Rüzgâr Türbini Güç Eğrisi.....	13	
2.8.	Dünya’da ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi .....	15	
3. BÖLÜM			
BULANIK C-ORTALAMALAR KÜMELEME YÖNTEMİ.....			18
3.1.	Yapay Zekâ .....	18	
3.2.	Kümeleme Analizi .....	20	
3.2.1.	Klasik ve Bulanık Kümeler.....	21	
3.2.2.	Kümeleme Analizinde Uzaklık Ölçüleri.....	21	
3.3.	Bulanık Mantık .....	23	
3.3.1.	Bulanık Mantık İlkeleri.....	23	
3.3.2.	Bulanık Mantık Kullanımı ve Avantajları .....	24	
3.3.3.	Bulanık Mantıkta Üyelik Fonksiyonları .....	25	
3.4.	Bulanık C-Ortalamalar Algoritması .....	26	
4. BÖLÜM			
AYKIRI DEĞER TESPİTİ VE TEMİZLENMESİ.....			29
4.1.	1. Rüzgâr Türbini Güç Eğrisindeki Aykırı Değerlerin Analizi.....	30	
4.1.1.	1. Rüzgâr türbini güç eğrisinin kümeleneşmesi .....	30	
4.1.2.	1. Rüzgâr türbini güç eğrisindeki aykırı değerişlerin tespiti .....	33	
4.1.3.	1. Rüzgâr türbini güç eğrisindeki aykırı değerişlerin temizlenmesi.....	36	
4.2.	2. Rüzgâr Türbini Güç Eğrisindeki Aykırı Değerlerin Analizi.....	38	

4.2.1.	2. Rüzgâr türbini güç eğrisinin kümelenmesi .....	38
4.2.2.	2. Rüzgâr türbini güç eğrisindeki aykırı değerlerin tespiti .....	41
4.2.3.	2. Rüzgâr türbini güç eğrisindeki aykırı değerlerin temizlenmesi .....	44
5.	BÖLÜM .....	46
	SONUÇLAR .....	46
	KAYNAKÇA .....	49
	ÖZGEÇMİŞ .....	55

## TABLULAR LİSTESİ

Tablo 4.1. 1. Rüzgâr türbini güç eğrisi için küme sayısına göre işlem süreleri.....	31
Tablo 4.2. 1. Rüzgâr türbini güç eğrisi için küme merkezleri.....	32
Tablo 4.3. 1. Rüzgâr türbini için 1. kümedeki elemanların üyelik dereceleri.....	32
Tablo 4.4. 1. Rüzgâr türbini güç eğrisi için aykırı veri sayıları ve yüzdeleri.....	37
Tablo 4.5. 2. Rüzgâr türbini güç eğrisi için küme sayısına göre işlem süreleri.....	39
Tablo 4.6. 2. Rüzgâr türbini güç eğrisi için küme merkezleri.....	40
Tablo 4.7. 2. Rüzgâr türbini için 1. kümedeki elemanların üyelik dereceleri.....	40
Tablo 4.8. 2. Rüzgâr türbini güç eğrisi için aykırı veri sayıları ve yüzdeleri.....	45

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Rüzgâr türbinlerinin bileşenleri .....	8
Şekil 2.2. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri.....	11
Şekil 2.3. Düşey eksenli rüzgâr türbinleri.....	12
Şekil 2.4. Eğik eksenli rüzgâr türbinleri.....	12
Şekil 2.5. Değişken hızlı rüzgâr türbin sistemi .....	13
Şekil 2.6. Bir rüzgâr türbininin karakteristik güç eğrisi.....	14
Şekil 2.7. Bir rüzgâr türbini güç eğrisi için aykırı değer türleri.....	15
Şekil 2.8. Küresel rüzgâr enerjisi kapasiteleri ve yıllık kapasite eklemeleri .....	16
Şekil 2.9. Türkiye’de 100m yükseklik için yıllık ortalama rüzgâr hızı dağılımı .....	17
Şekil 3.1. Üyelik fonksiyonlarına ait grafiksel gösterimler .....	26
Şekil 4.1. 1. Rüzgâr türbininin ham güç eğrisi.....	30
Şekil 4.2. 1. Rüzgâr türbininin kümelenmiş güç eğrisi .....	31
Şekil 4.3. 1. Rüzgâr türbini güç eğrisindeki kümelerin Mahalanobis uzaklıkları.....	34
Şekil 4.4. 1. Rüzgâr türbini için temizlenmiş güç eğrisi .....	37
Şekil 4.5. 2. Rüzgâr türbininin ham güç eğrisi.....	38
Şekil 4.6. 2. Rüzgâr türbininin kümelenmiş güç eğrisi .....	39
Şekil 4.7. 2. Rüzgâr türbini güç eğrisindeki kümelerin Mahalanobis uzaklıkları.....	42
Şekil 4.8. 2. Rüzgâr türbini için temizlenmiş güç eğrisi .....	45

## SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

$\rho$	Hava yoğunluğu
$A$	Süpürülen alan
$V$	Rüzgâr hızı
$C_p$	Kapasite faktörü
$\eta$	Mekanik verim
$\lambda$	Kanat uç hız oranı
$v_1$	Devreye girme rüzgâr hızı
$v_2$	Anma rüzgâr hızı
$v_3$	Devreden çıkma rüzgâr hızı
<b>kW</b>	Kilovat
<b>MW</b>	Megavat
<b>GW</b>	Gigavat
<b>m</b>	metre
<b>s</b>	saniye
<b>m/s</b>	metre/saniye
<b>BIRCH</b>	Hiyerarşileri kullanarak dengeli iteratif azaltma ve kümeleme
<b>CHAMELEON</b>	Dinamik modelleme kullanarak hiyerarşik kümeleme
<b>CLARA</b>	Büyük uygulamaları kümeleme
<b>CLARANS</b>	Rastlantısal aramaya dayalı büyük uygulamaları kümeleme

**CURE**            Temsilcileri kullanarak kümeleme

**PAM**             Ortancalar etrafında bölümeleme

**ROCK**            Bağlantıları kullanarak güvenilir kümeleme



## 1.BÖLÜM

### GİRİŞ

Dünya nüfusundaki artış ve teknolojik gelişmeler enerji talebini her geçen gün arttırmaktadır [1]. Enerji, toplumların refah seviyesinin yükselmesi açısından önemli bir etkidir. Enerji üretiminde yaygın olarak kullanılan fosil yakıt rezervleri (kömür, petrol, doğalgaz vb.) günden güne azalmaktadır. Fosil yakıtlar üzerine yapılan bir araştırma sonucunda, Dünya'daki enerji tüketim hızının fosil yakıtların oluşum hızının 300 bin katı olduğu sonucuna ulaşılmıştır [2]. Bu durum, gelecekte fosil yakıt rezervlerinin tükeneceğini göstermekte olup, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimin artmasına neden olmuştur.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan rüzgâr enerjisi, çoğu coğrafyada bulunabilmesi, orta ve uzun vadede istikrarlı olması ve çevreye etkisinin minimum seviyede olmasıyla ön plana çıkmaktadır. Zararlı gazlar yayan fosil yakıtların ve radyoaktif atıklar üreten nükleer enerjinin aksine, rüzgâr enerjisi temiz, çevre dostu ve sonsuz bir enerji kaynağıdır [3]. Aynı zamanda, mevcut fosil enerji kaynaklarının yerini alarak hava kirliliğinin azaltılmasına yardımcı olur [4]. Buna karşın, rüzgâr enerji santrallerinde daha verimli enerji üretimi, ortaya çıkabilecek sorunların öngörülmesi ve bakım-onarım işlemleri için rüzgâr türbinlerinin güç eğrilerinin incelenmesi ve oluşan aykırı değerlerin tespit edilerek temizlenmesi gerekmektedir. Literatürde bu konuda pek çok çalışma yer almaktadır.

Liang ve çalışma arkadaşları, 30 MW ve 25,5 MW kurulu güce sahip iki rüzgâr enerji santralinin 10 dakika aralıklarla kaydedilen verilerini kullanmışlardır. 1. rüzgâr enerji santrali için 30723 veri elde edilirken, 2. rüzgâr enerji santrali için 91402 veri elde edilmiştir. Aykırı değerleri tespit etmek için farklılık ve belirsizliğe dayalı enerjinin minimizasyonu tabanlı görüntü eşikleme yöntemi, değişim noktası gruplama ve çeyreklik algoritmalarının birleşimi, görüntü tabanlı algılama ve temizleme algoritması, uyarlanabilir güven sınırı modellenmesi, yerel aykırı değer faktör algoritması ve k-ortalamalar algoritmasından yararlanmışlardır. Farklılık ve belirsizliğe dayalı enerjinin



minimizasyonu tabanlı görüntü eşikleme yöntemi 0,97'lik doğruluk oranı ile en iyi sonucu vermiştir [5].

Luo ve çalışma arkadaşları, 3 MW, 2 MW ve 13,5 MW kurulu güce sahip üç rüzgâr enerji santralının sırasıyla 9 gün, 1 yıl ve 3 ay boyunca 0,5 saniye, 10 dakika ve 1 dakika aralıklarla toplanan verilerini kullanmışlardır. Anormal değerleri temizlemek için değişim noktası gruplama ve çeyreklik algoritmalarının birleşimi, mekanizma analizine dayalı sezgisel kurallar metodu, yerel aykırı değer faktör algoritması, parçalı kümeleme tabanlı algoritma ve görüntü tabanlı algorithmadan faydalanmışlardır. %16,71 ila %45,01 arasındaki veri temizleme oranı ile en iyi sonucu mekanizma analizine dayalı sezgisel kurallar metodu sağlamıştır [6].

Sun ve çalışma arkadaşları, 6 MW kurulu güce sahip bir rüzgâr enerji santralının yaklaşık 3 ay boyunca 10 dakika aralıklarla kaydedilen verilerini kullanmışlardır. Aykırı değerleri temizlemek için yoğunluk-ızgara tabanlı kümeleme yöntemi ile yığılmış gürültü giderici tabanlı otomatik kodlayıcının birleşimi ve yerel aykırı değer faktör algoritmasından yararlanmışlardır. Yoğunluk-ızgara tabanlı kümeleme yöntemi ile yığılmış gürültü giderici tabanlı otomatik kodlayıcının birleşimi yaklaşık %98'lik doğru sınıflandırma oranı ile en iyi sonucu vermiştir [7].

Wang ve çalışma arkadaşları, 25,5 MW ve 30 MW kurulu güce sahip iki rüzgâr enerji santralının 10 dakika aralıklarla toplanan verilerini kullanmışlardır. Anormal değerleri temizlemek için yerel aykırı değer faktör algoritması, matematiksel morfoloji işlemi ve görüntü işleme yönteminden faydalanmışlardır. 1. rüzgâr türbini için %35,88 ve 2. rüzgâr türbini için %38,10 veri temizleme oranları ile görüntü işleme yöntemi en iyi sonucu sağlamıştır [8].

Shen ve çalışma arkadaşları, 2 MW kurulu güce sahip bir rüzgâr enerji santralının 12 ay boyunca 10 dakika aralıklarla kaydedilen verilerini kullanmışlardır. Aykırı değerleri temizlemek için değişim noktası gruplama tabanlı çeyreklik algoritması, çeyreklik tabanlı değişim noktası gruplama algoritması ve yerel aykırı değer faktör algoritmasından yararlanmışlardır. Değişim noktası gruplama tabanlı çeyreklik algoritması %21,04'lük veri temizleme oranı ile en iyi sonucu vermiştir [9].

Wang ve çalışma arkadaşları, 2 MW kurulu güce sahip bir rüzgâr enerji santralının 2 ay boyunca 10 dakika aralıklarla toplanan verilerini kullanmışlardır. Anormal değerleri temizlemek için Gauss karışım kopula modeli, Frank kopula modeli ve Gauss karışım modelinden faydalanmışlardır. 110597'lik Bayes bilgi kriteri değeri ile Gauss karışım kopula modeli en iyi sonucu sağlamıştır [10].

Yan ve çalışma arkadaşları, 48 MW ve 49,5 MW kurulu güce sahip iki rüzgâr enerji santralının 12 ay boyunca 10 dakika aralıklarla kaydedilen verilerini kullanmışlardır. Yoğunluk tabanlı mekânsal kümeleme ve sezgisel kuralların birleşiminden yararlanarak 1. rüzgâr türbini için %38,94 ila %59,32 arasında ve 2. rüzgâr türbini için %40,97 ila %64,03 arasında normal operasyonel veri belirlemiştir [11].

Wang ve çalışma arkadaşları, 1,5 MW kurulu güce sahip bir rüzgâr enerji santralının 3 ay boyunca 5 dakika aralıklarla toplanan verilerini kullanmışlardır. Anormal değerleri temizlemek için lineer karışım tabanlı öz-düzenlemeli ağlar ve öz-düzenlemeli ağlardan faydalanmışlardır. %15'lik hata oranı ile lineer karışım tabanlı öz-düzenlemeli ağlar en iyi sonucu vermiştir [12].

Jing ve çalışma arkadaşları, üç rüzgâr enerji santralının sırasıyla 3 ay, 5 ay ve 9 ay boyunca 10 dakika aralıklarla kaydedilen verilerini kullanmışlardır. Aykırı değerleri tespit etmek için çeyreklik regresyonuna dayalı lojistik fonksiyonlar, yoğunluk tabanlı mekânsal kümeleme ve Gauss süreç regresyonundan yararlanmışlardır. Çeyreklik regresyonuna dayalı 5-parametrelili lojistik fonksiyon en iyi sonucu vermiştir [13].

Morrison ve çalışma arkadaşları, iki rüzgâr enerji santralının sırasıyla 24 ay ve 18 ay boyunca 10 dakika aralıklarla toplanan verilerini kullanmışlardır. Anormal değerleri temizlemek için yerel aykırı değer faktör algoritması, k-en yakın komşu algoritması, Gauss karışım modeli ve izolasyon ormanı yönteminden faydalanmışlardır. %27,47'lik aykırı değer yüzdesi ile en iyi sonucu izolasyon ormanı yöntemi sağlamıştır [14].

Lin ve çalışma arkadaşları, 7 MW kurulu güce sahip bir rüzgâr enerji santralının 12 ay boyunca 1 saniye aralıklarla kaydedilen verilerini kullanmışlardır. Aykırı değerleri tespit etmek için eliptik zarf yöntemi ve izolasyon ormanı yönteminden yararlanmışlardır. İzolasyon ormanı yöntemi daha yüksek doğruluk sağlamıştır [15].

Ye ve çalışma arkadaşları, toplamda 3,5 GW kurulu güce sahip iki rüzgâr enerji santralının 15 ay boyunca 15 dakika aralıklarla toplanan verilerini kullanmışlardır. Olasılıksal rüzgâr çiftliği güç eğrisi ve aykırı değer türlerinin birleşiminden faydalanarak toplam verinin %10,21'ini anormal değer olarak temizlemişlerdir [16].

Zhao ve çalışma arkadaşları, 40 MW kurulu güce sahip bir rüzgâr enerji santralının verilerini 10 dakika aralıklarla kaydederek 15000 adet veri elde etmişlerdir. Yoğunluk tabanlı kümeleme ve çeyreklik algoritmasının birleşiminden yararlanarak toplam verinin %17,88'ni aykırı değer olarak tespit etmişlerdir [17].

Manobel ve çalışma arkadaşları, 2 MW kurulu güce sahip bir rüzgâr enerji santralının verilerini 10 dakika aralıklarla toplayarak 52560 adet veri elde etmişlerdir. Gauss süreç regresyonundan faydalanarak toplam verinin %8,27'sini anormal değer olarak temizlemişlerdir [18].

Paiva ve çalışma arkadaşları, 1,8 MW kurulu güce sahip bir rüzgâr enerji santralının verilerini 10 dakika aralıklarla kaydederek 50444 adet veri elde etmişlerdir. Betz limiti, çeyreklik kriteri ve histogram analizinin birleşiminden yararlanarak 3009 adet aykırı değer tespit etmişlerdir [19].

Taslimi-Renani ve çalışma arkadaşları, 1,5 MW kurulu güce sahip bir rüzgâr enerji santralının verilerini 5 dakika aralıklarla toplayarak 1954 adet veri elde etmişlerdir. Değiştirilmiş hiperbolik tanjant modelinden faydalanarak 258 adet anormal veri temizlemişlerdir [20].

Zhang ve çalışma arkadaşları, 7 MW kurulu güce sahip bir rüzgâr enerji santralının verilerini 1 saat aralıklarla kaydederek 744 adet veri elde etmişlerdir. İzolasyon ormanı metodundan yararlanarak %14'lük aykırı değer oranı bulmuşlardır [21].

Bu çalışmalara ilaveten, kısmi en küçük kareler regresyonuna dayalı genetik algoritma ile geri yayımlı sinir ağlarının birleşimi [22], otomatik kümeleme ile  $T^2$  testinin birleşimi [23], k-ortalamalar, Tukey testi ve eşik limitinin birleşimi [24], yinelemeli regresyon süreci [25], sağlam güven aralıkları [26] vb. yaklaşımlar rüzgâr türbinlerinin güç eğrilerindeki anormal verilerin analizi için kullanılmışlardır.

Literatürdeki çalışmalarda, rüzgâr türbini güç eğrilerindeki aykırı değerlerin tespiti için farklı veri kayıt aralıkları ve periyotları ile birlikte farklı değerlendirme ölçeklerinin kullanıldığı görülmektedir. Bu tez çalışmasında, mevsimsel etkileri içermek amacıyla 12 aylık bir süre boyunca 10 dakika aralıklarla kaydedilen veri setleri kullanılmıştır. Sonuçların değerlendirilmesinde ise, yaygın olarak kullanılan aykırı veri yüzdesinden yararlanılmıştır. Bunlara ilaveten, ham güç eğrilerinin kümelenmesinde, klasik kümeleme yöntemleri yerine bulanık bir kümeleme yöntemi olan bulanık c-ortalamar algoritması tercih edilmiştir. Bu sayede, güç eğrisindeki veri noktalarının, farklı üyelik dereceleriyle birden fazla kümeye ait olma durumu analiz edilmiş ve kümeleme hassasiyeti artırılmıştır. Üretilen kümelerdeki aykırı değerlerin temizlenmesinde ise, tek değişkenli aykırı değer tespit yöntemleri yerine çok değişkenli bir aykırı değer tespit yöntemi olan Mahalanobis ölçütü kullanılmıştır. Böylece, güç eğrisindeki anormal veri noktaları daha etkin bir şekilde belirlenmiştir. Sonuç olarak, temizlenmiş rüzgâr türbini güç eğrileri rüzgâr enerji potansiyelinin değerlendirilmesi, rüzgâr enerji santrallerinde sistem kararlılığı, güç kaynağı güvenliği, enerji ticareti, çevrimiçi izleme, arıza teşhisi, önceden uyarı, işletme ve bakım maliyetleri açısından faydalı olacaktır.

Bu tez çalışması 5 bölümden oluşmaktadır. Bu bölümde rüzgâr türbini güç eğrilerinde aykırı değerlerin tespiti ve temizlenmesi ile ilgili literatür taraması sunulmuştur. 2. Bölümde rüzgâr enerjisinin üstünlükleri, rüzgâr türbini ve bileşenleri, rüzgâr türbininin teorik gücü, rüzgâr türbinlerinin sınıflandırılması, rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri ve rüzgâr türbini güç eğrisi hakkında başlıca bilgiler verilmiştir. 3. Bölümde yapay zekâ, kümeleme analizi, uzaklık ölçüleri, bulanık mantık, üyelik fonksiyonları ve bulanık c-ortalamar algoritması ele alınmıştır. 4. Bölümde, öncelikle, bulanık c-ortalamar algoritması kullanılarak rüzgâr türbinlerinin ham güç eğrileri kümelenmiştir. Sonrasında, kümelenmiş ham güç eğrilerine Mahalanobis uzaklığı uygulanarak aykırı değerlerin tespiti ve temizliği anlatılmıştır. 5. Bölümde ise, sonuçlar ve önerilere yer verilmiştir.

## 2. BÖLÜM

### RÜZGÂR ENERJİSİ

Enerji, insanlık tarihi boyunca yaşam faaliyetlerinin gelişimi için her zaman ihtiyaç olmuştur. İlk zamanlar barınma, ısınma ve yeme-içme ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılan enerji, nüfusun hızla artması, yeni icatlar keşfedilmesi, sanayileşmenin çoğalması ve teknolojik araç-gereçlerin gün geçtikçe fazlalaşması sonucunda her geçen gün daha çok talep edilmektedir [27].

Enerji kaynakları, herhangi bir yöntemle enerji üretilmesini sağlayan kaynaklardır. Gelecek, ekonomi, refah seviyesi, sosyal kalkınma, güvenlik ve birçok açıdan oldukça öneme sahiptirler. Enerji kaynakları, oluşumlarına bağlı olarak fosil enerji kaynakları ve yenilenebilir enerji kaynakları olarak sınıflandırılır. Petrol, doğalgaz, taş kömürü, linyit, uranyum, toryum ve asfaltit fosil enerji kaynakları arasında bulunurken, hidrolik, güneş, rüzgâr, jeotermal, biyokütle, hidrojen ve deniz kökenli enerjiler yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer almaktadır [1, 28].

Günümüzde kullanılan enerjinin çoğu fosil yakıtlardan karşılanmaktadır fakat fosil yakıt kullanımının birtakım olumsuzlukları vardır. Oluşumları uzun zaman aldığından yenilenemeyen yapıdadırlar. Gelecekteki rezerv miktarları bilinmediğinden fiyatları giderek artmaktadır. Ham petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtların taşınmaları sürecinde sızıntı olması önemli çevresel sorunlara sebep olur. Yakıldıklarında hava kirliliğine neden olurlar. Ayrıca, fosil yakıtlardan çok fazla yararlanılması sonucunda, atmosferde sera gazlarının salınımı artmakta ve artan sera etkisi nedeniyle dünyanın ortalama sıcaklığı da yükselmektedir. Küresel ısınmaya bağlı iklim değişikliği sebebiyle kuraklık, erozyon, çölleşme, deniz seviyesinin yükselmesi, doğal dengenin bozulması vb. olumsuz etkiler görülmektedir [29, 30].

Fosil yakıtların olumsuzluklarına karşın, yeryüzünde ve doğada çoğunlukla herhangi bir üretim işlemine ihtiyaç duyulmadan temin edilebilen yenilenebilir enerjinin kullanımı küresel ölçekte yaygınlaşmaktadır. Çevreye zararı ve etkisi çok daha düşük olan

yenilenebilir enerji kaynakları pek çok üstünlüğe sahiptir. Sürdürülebilir kalkınma için vazgeçilmezdir. Kaynak çeşitlendirmesiyle arz güvenliği sağlar. Dışa bağımlılığı azaltır. Yeni üretim tesislerinin kurulumuyla doğrudan ve dolaylı olarak istihdamı artırır. Kırsal bölgelerin elektrifikasyonunu sağlar. İletim ve dağıtım şebeke yatırımları açısından sermaye tasarrufu sağlar [31, 32]. Ayrıca, fosil yakıtların kullanımından kaynaklanan karbon emisyonlarının ve hava kirliliğinin artmasını engeller, yaşam dengesini korur. Günümüzde, yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan rüzgâr enerjisinin kullanımı, enerji sektöründe sıklıkla tercih edilmektedir.

## **2.1. Rüzgâr Oluşumu**

Rüzgâr, atmosfer içerisindeki havanın dünya yüzeyine yakın olan doğal hareketidir. Isınmaya bağlı olarak hava kütleleri yer değiştirirler. Isınarak yükselen hava kütlesi alçak basıncı oluştururken, soğuyarak ağırlaşan hava kütlesi yüksek basıncı oluşturur. Alçak basınç bölgesinde yükselen hava kütlelerinin boşalttığı yere, yüksek basınç bölgesinde ağırlaşan hava kütleleri hızla hareket eder. Alçak ve yüksek basınç bölgeleri arasındaki bu hava akımı rüzgârdır. Basınç farkının büyük olması durumunda rüzgâr hızı da artar. Ayrıca, rüzgârın, yönü, hızı ve frekansı olmak üzere üç belirgin özelliği bulunmaktadır [33, 34].

## **2.2. Rüzgâr Enerjisinin Üstünlükleri**

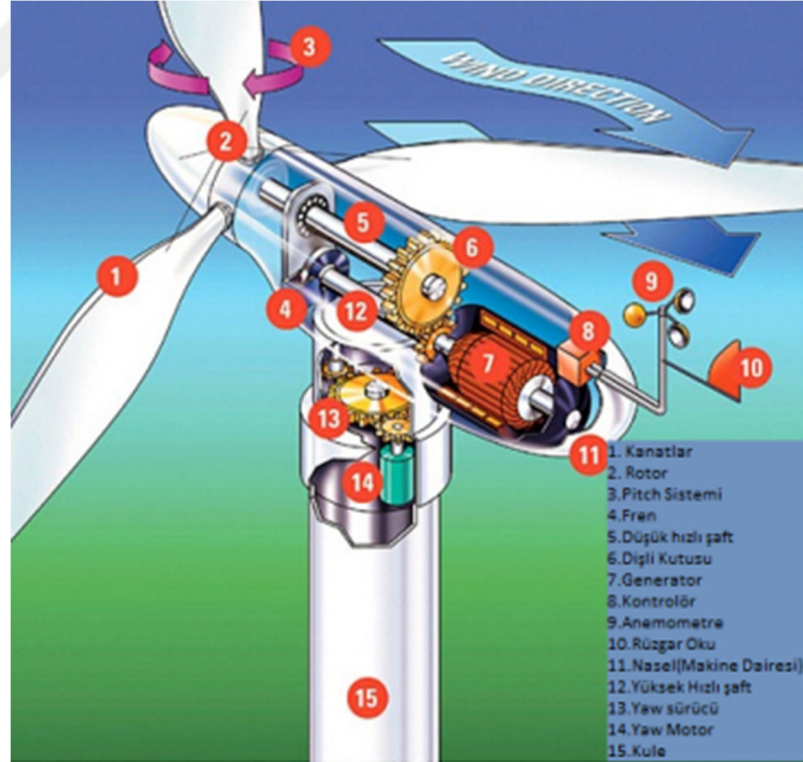
Rüzgâr enerjisi kullanımının pek çok avantajı vardır. Rüzgâr enerjisi tükenmeyen, yenilenebilir, temiz ve çevreyi kirletmeyen bir enerji kaynağıdır. Hammadde rüzgârdır ve atmosferde bol miktarda bulunmaktadır. Elektrik enerjisinin üretimi için çok yüksek teknoloji gerektirmemektedir. Rüzgâr türbini teknolojisine yıldan yıla artarak yapılan yatırımlar, rüzgâr enerjisinden elektrik üretim maliyetini düşürmüş ve fosil yakıtlarla rekabet edebilir hale getirmiştir [35, 36]. Rüzgâr türbinlerinin karada ve açık denizde kurulumları yapılabilmekte ve ticari boyutu giderek genişlemektedir.

İnşası, diğer santrallere göre daha hızlıdır. Rüzgâr çiftliği yatırımına karar verildikten sonra kısa süre içerisinde inşası tamamlanıp üretime geçilebilir. Uzun vadede yatırım maliyetleri düşüktür. Rüzgâr türbinleri arasındaki alan, tarım arazisi olarak kullanılabilir [37]. Ulusal enerji portföyünü çeşitlendirir. Tasarım, imalat, inşaat,

nakliye, kurulum, bakım, işletim, vb. alanlarda iş imkânları sunar. Ayrıca, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır, havayı ve suyu kirletmez, atık oluşturmaz ve sera gazı emisyonunun önlenmesine yardımcı olur. Küçük, orta ve büyük ölçekli olarak birçok farklı uygulamada kullanılabilir [37, 38].

### 2.3. Rüzgâr Türbini ve Bileşenleri

Rüzgâr enerjisinden faydalanma işlemi, yel değirmenlerinden modern rüzgâr enerji santrallerine kadar gelişen teknolojik bir süreçtir. Rüzgâr türbini, esen rüzgârın doğrusal kuvvetini kanatları aracılığıyla dönme kuvvetine dönüştürür ve üretilen mekanik enerji, kanatların bağlı olduğu jeneratör yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülür [39]. Rüzgâr yön ölçer, anemometre, kanatlar, göbek, rotor, dişli kutusu, frenleme düzeni, jeneratör, kontrol sistemi, pitch ve yaw sistemleri, türbin ve kule bir rüzgâr türbinini oluşturan başlıca bileşenler arasında yer almaktadır [34]. (Bkz. Şekil 2.1)



Şekil 2.1. Rüzgâr türbininin bileşenleri [40]

Rüzgâr yön ölçer ve anemometre aracılığıyla ölçülen rüzgâr istikameti ve rüzgâr şiddeti bilgileri kontrol sistemine iletilir. Kanatlar, rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürür. Türbinlerin çoğu 2 veya 3 kanatlı olarak tasarlanmaktadır.

Rotor, dönme mekanik enerjisini, diğer ucunda bir elektrik jeneratörüne bağlı olan mile aktarır. Dişli kutusu, rotorun bağlı olduğu düşük hızlı şafttan gelen yüksek torku, jeneratörün bağlı olduğu yüksek hız şaftı için düşük torka dönüştürür. Dişli kutularının ağır olması, kule ömrünü olumsuz etkiler. Frenleme düzeni hidrolik, elektriksel veya mekanik olarak uygulanan bir disk ile rotorun dönüşünü durdurur [39, 41].

Jeneratör, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren makinadır. Kontrol sistemi, belli bir rüzgâr hızında dönme hareketini başlatan, bu hareketi yöneten ve yüksek rüzgâr hızlarında türbini durduran bileşendir. Pitch sistemi, çok düşük ve çok yüksek rüzgâr hızlarında kanatların dönmesini kontrol eder. Yaw sistemi, rüzgâr yönü ve şiddetine göre rotorun doğrultusunu ayarlar. Türbin, kule üzerine yerleştirilen montaj platformudur. Kapasitesine göre içerisinde tamirat yapılabilecek kadar serbest alana sahiptir. Kule ise, konik çelik boru veya çelik kafes olarak tasarlanan, üzerine türbin gövdesinin yerleştirildiği yapıdır. Konik çelik boru şeklindeki kuleler daha güvenliken, çelik kafes kuleler daha maliyetlidir [39, 41].

#### 2.4. Rüzgâr Türbininin Teorik Gücü

Rüzgâr, kütlesi belirli olan bir havanın hareketidir. Rüzgârdaki teorik güç, yüksekliğe bağlı olarak değişen hava yoğunluğuna ( $\rho$ ), kanatlar tarafından süpürülen alana ( $A$ ) ve rüzgâr hızına ( $V$ ) bağlı olmak üzere aşağıdaki eşitlikle hesaplanır [37, 39]. Bu eşitlikten görüldüğü üzere, rüzgârın taşıdığı enerji, hızının küpü ile doğru orantılı olup ekonomik potansiyelini gösterir. Deniz seviyesinde hava yoğunluğu  $1,225 \text{ kg/m}^3$ 'tür.

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^3 \quad (2.1)$$

Uygulamada, rüzgâr türbini tarafından rüzgârdaki teorik gücün tamamı elektrik enerjisine dönüştürülemez. Rüzgârdan elde edilebilecek gücün en fazla %59,3'ünü kullanmak mümkündür. Bu orana Betz limiti adı verilir ve büyük rüzgâr türbinleri için en fazla %45'tir. Bu durumda,  $C_p$  kapasite faktörü olmak üzere rüzgâr türbini tarafından rüzgârdan kazanılabilecek güç aşağıdaki eşitlikle hesaplanır [33, 37].

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^3 \times C_p \quad (2.2)$$



Rüzgâr türbini tarafından rüzgârdan sağlanabilecek güç miktarını veren Eşitlik 2.2, türbinin mekanik verimine ( $\eta$ ) bağlı olarak Eşitlik 2.3'teki gibi yeniden düzenlenebilir [37, 39]. Üretilen enerji miktarı, türbinin gücü ve çalışma süresi kullanılarak hesaplanır.

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^3 \times C_p \times \eta \quad (2.3)$$

## 2.5. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgâr türbinleri için farklı sınıflandırmalar yapılmaktadır. Genellikle, dönme eksenlerine, güçlerine, kanat kontrol sistemlerine ve rüzgâr ile kanat etkileşimine göre değerlendirilmektedir. Yatay eksenli, düşey eksenli ve eğik eksenli rüzgâr türbinleri dönme eksenlerine göre yapılan sınıflandırmalar iken, mikro, küçük, büyük ve çok büyük rüzgâr türbinleri güçlerine göre yapılan sınıflandırmalardır. Kanat kontrol sistemleri açısından derece kontrollü, yavaşlatıcı kontrollü ve aktif yavaşlatıcı kontrollü rüzgâr türbinleri mevcuttur. Rüzgâr ile kanat etkileşimi açısından kaldırma temelli ve sürüklenme temelli rüzgâr türbinleri vardır [39].

### 2.5.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin dönme eksenleri rüzgâr yönüne paraleldir. Kanat uç hız oranına göre rotor kanatlarının sayısı değişir. Kanat uç hız oranı ( $\lambda$ ), rotor kanadının uç kısmındaki çevresel hızın, rotora gelen rüzgâr hızına bölünmesi ile elde edilir. Eğer  $\lambda=1-5$  ise çok kanatlı rotor,  $\lambda=6-8$  ise üç kanatlı rotor,  $\lambda=9-15$  ise iki kanatlı rotor ve  $\lambda>15$  ise tek kanatlı rotor tasarımı yapılır. Yaygın olarak, üç kanatlı ve rüzgârı önden alan yatay eksenli türbinler kullanılır [39, 42]. Şekil 2.2'de yatay eksenli rüzgâr türbinleri görülmektedir.



Şekil 2.2. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri [42]

Rüzgârı önden alan türbinler kulenin oluşturduğu rüzgâr gölgelenmesinden etkilenmezler. Rüzgârı arkadan alan türbinlerde ise, kanadın kuleden geçmesi esnasında meydana gelen güç dalgalanması türbine daha çok zarar verir. Diğer taraftan, rüzgârı önden alan türbinlerde rotoru rüzgâr yönüne döndürmek için dümen sistemine gereksinim varken, rüzgârı arkadan alan türbinler ise yaw mekanizmasına ihtiyaç duymazlar [39, 42].

### 2.5.2. Düşey eksenli rüzgâr türbinleri

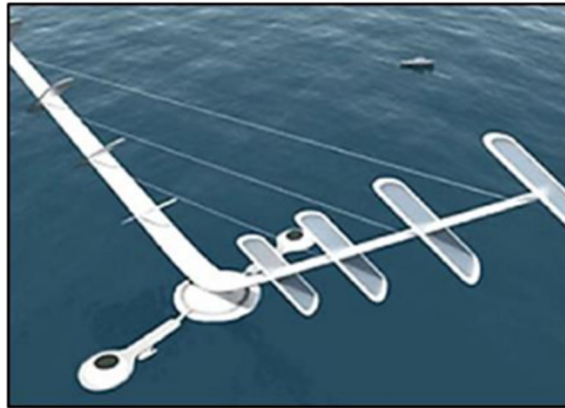
Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinde dönme eksenleri rüzgâr yönüne diktir. Rüzgârı her yönden yakalayabilme avantajına sahiptirler. Daha sessiz çalışırlar. Türbin aksamı yere yerleştirildiği için kuleye ihtiyaç duymazlar. Diğer taraftan, ilk harekete geçişleri güvenli değildir. Düşük rüzgâr hızlarında çalıştıkları için daha az güç sağlarlar ve daha düşük verimliliğe sahiptirler. Ticari kullanımları fazla değildir. Savonius, Darrieus ve H-Darrieus rüzgâr türbinleri düşey eksenli olarak mevcuttur [39, 43]. Şekil 2.3'te düşey eksenli rüzgâr türbinleri görülmektedir.



Şekil 2.3. Düşey eksenli rüzgâr türbinleri [44]

### 2.5.3. Eğik eksenli rüzgâr türbinleri

Eğik eksenli rüzgâr türbinlerinin dönme eksenleri düşey ile rüzgâr yönünde bir açı yapar. Başka bir ifadeyle, kanatları ile dönme eksenleri arasında belli bir açı vardır. Geniş bir uygulama alanına sahip değildir. Şekil 2.4'te eğik eksenli bir rüzgâr türbini görülmektedir.

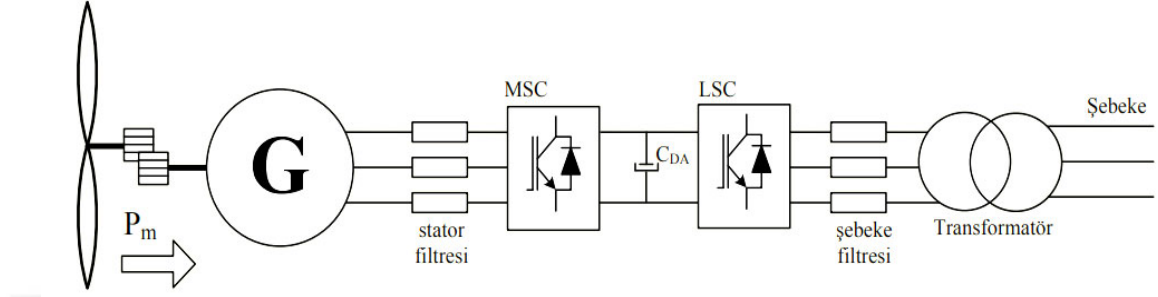


Şekil 2.4. Eğik eksenli rüzgâr türbinleri [45]

### 2.6. Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemleri

Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinde rüzgârdan optimum seviyede enerji elde etmek ve elde edilen enerjiyi istenilen şekle dönüştürmek amacıyla güç elektroniği devrelerinden yararlanır. Türbin hızı ve üretilen gerilimin frekansı açısından değişken hız-değişken

frekans dönüşüm sistemleri, değişken hız-sabit frekans dönüşüm sistemleri ve sabit hız-sabit frekans dönüşüm sistemleri mevcuttur [46]. Şekil 2.5'te değişken hızlı bir rüzgâr türbin sisteminin şebeke bağlantısı görülmektedir.



Şekil 2.5. Değişken hızlı rüzgâr türbin sistemi

Değişken hızlı dönüşüm sistemlerinin, sabit hızlı dönüşüm sistemlerine göre birtakım avantajları vardır. Rüzgâr türbinlerinin çıkardığı gürültü azalır. Güç kalitesi artırılarak güçteki salınımlar azaltılır. Türbin, aniden çok şiddetli bir rüzgâra maruz kaldığında şebekeye aktarılan güç sabit kalır. Türbin üzerindeki mekanik baskılar azalır. Üretilen yıllık enerji miktarı artar. Diğer taraftan, yüksek maliyeti ve gereksinim duyulan güç elektroniği dönüştürücülerinin karmaşık yapısı dezavantajları arasındadır [39, 47].

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan üç tip jeneratör vardır. Bunlar; asenkron jeneratör, senkron jeneratör ve doğru akım dinamosudur. Küçük güçlü rüzgâr türbinlerinde, geçmişte sıklıkla kullanılan doğru akım dinamosu yerini asenkron ve senkron jeneratörlere bırakmıştır. Büyük güçlü rüzgâr enerji santrallerinde senkron jeneratör veya çift beslemeli asenkron jeneratörlerden faydalanırken, küçük ve orta güçlü rüzgâr enerji santrallerinde sabit mıknatıslı senkron jeneratör veya sincap kafesli asenkron jeneratör kullanılır [39, 47].

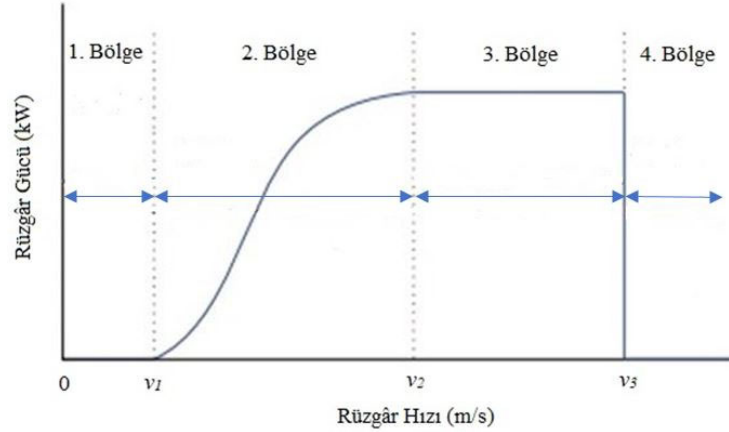
## 2.7. Rüzgâr Türbini Güç Eğrisi

Rüzgâr türbini güç eğrisi, üretilen ortalama güç ile ortalama rüzgâr şiddetini ilişkilendirir ve rüzgâr türbininin farklı rüzgâr hızlarında ürettiği gücü gösterir [48].

Rüzgâr enerjisi uygulamalarında güç eğrileri pek çok fayda sağlar. Bir bölgenin rüzgâr hızı, rüzgâr güç yoğunluğu ve rüzgâr enerji potansiyeli açısından değerlendirilmesi,

uygun santral kurulum alanlarının tespiti için yapılır. Bu süreçte, mevcut rüzgâr verileri ve rüzgâr türbini güç eğrisi kullanılarak üretilen enerji tahmin edilir. Hedef bir sahadaki türbin çıkış gücünün tahmini sistem tasarımı, boyutlandırma ve maliyet optimizasyonu için önem arz eder. Bir rüzgâr türbininin güç eğrisi modellenerek kapasite faktörü tahmin edilir. Türbin kapasite faktörü aracılığıyla potansiyel sahalarda sıralaması ve optimum türbin-saha eşleştirmesi yapılır. Rüzgâr türbinlerin güç eğrileri karşılaştırılarak mevcut türbin modelleri arasında sahanın rüzgâr rejimine uygun seçim yapılmasına yardımcı olur. Aynı zamanda, rüzgâr türbinlerin güç eğrileri gerçek zamanlı türbin performansının izlenmesi amacıyla da kullanılabilir [48, 49].

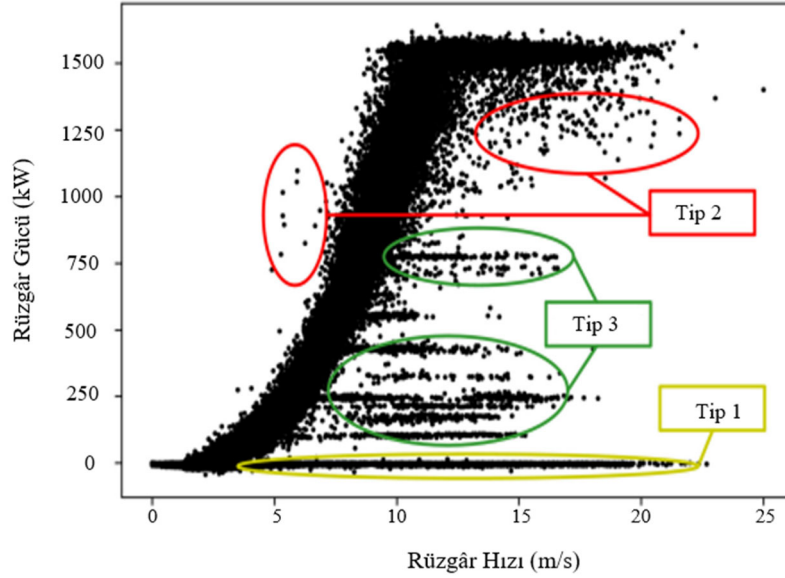
Bir rüzgâr türbininin karakteristik güç eğrisi başlıca dört bölgeden oluşur. (Bkz. Şekil 2.6) 1. Bölgede rüzgâr hızı, türbinin devreye girme hızından ( $v_1$ ) düşüktür. Türbin rotoru dönmediği için güç çıkışı gözlenmez. Türbinin devreye girme hızı ve anma rüzgâr hızı ( $v_2$ ) arasındaki 2. Bölgede, türbin elektrik üretmeye başlar ve artan rüzgâr hızıyla orantılı olarak üretilen güçte de hızlı bir artış olur. Anma rüzgâr hızı ve türbinin devreden çıkma hızı ( $v_3$ ) arasındaki 3. Bölgede, aktif veya pasif kontrol mekanizmaları ile sabit bir güç çıkışı üretilir. Türbinin devreden çıkma hızından sonraki 4. Bölgede, rüzgâr türbini ve bileşenlerini şiddetli rüzgârlardan korumak için türbin devre dışı bırakılır ve sıfır güç çıkışı gözlenir [9, 48].



Şekil 2.6. Bir rüzgâr türbininin karakteristik güç eğrisi

Rüzgâr türbini üreticileri standart hava yoğunluğu, spesifik rüzgâr profili, ideal topografik yapı vb. nominal koşullar altında güç eğrilerini oluştururlar. Ancak, operasyonel güç eğrileri, SCADA sisteminden gerçek zamanlı olarak toplanan ham verilerden oluşturulur

ve bu ham veriler, çeşitli faktörlerden dolayı birçok aykırı değer içerir [9, 16]. Şekil 2.7'den görüldüğü üzere, operasyonel güç eğrisindeki bu aykırı değerler negatif anormal veriler, dağınık anormal veriler ve yığılmış anormal veriler olmak üzere üç farklı türde kategorize edilir [50].



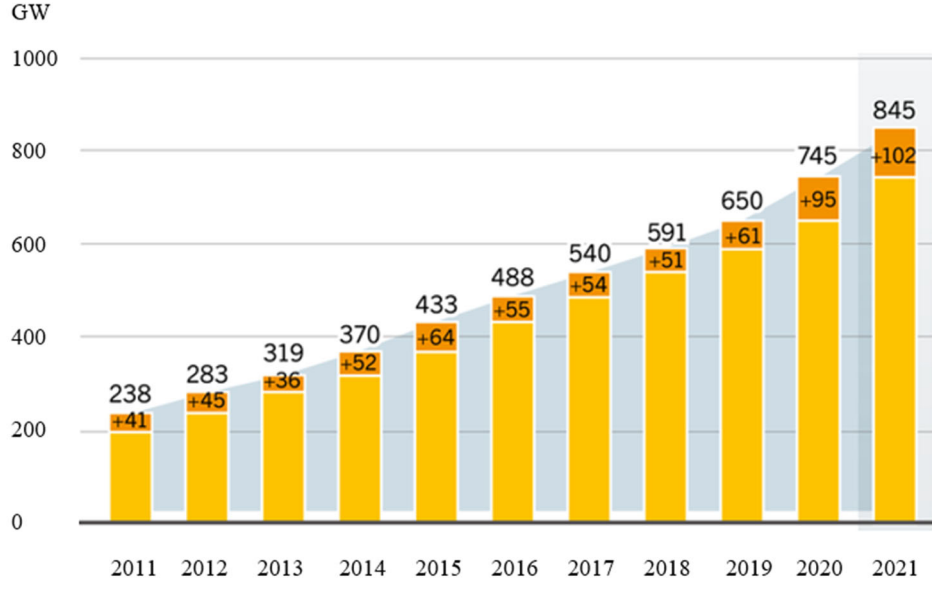
Şekil 2.7. Bir rüzgâr türbini güç eğrisi için aykırı değer türleri [50]

Tip I anormal veriler, rüzgâr hızının devreye girme hızından büyük ve üretilen gücün sıfırın altında olduğu negatif anormal verilerdir. Tip I anormal verileri üreten nedenler arasında plansız bakım, rüzgâr türbini arızası ve rüzgâr kesintisi bulunmaktadır. Tip II anormal veriler, normal eğrilik etrafında rastgele dağılmış, süreksiz ve tahmin edilemez görünürler. Tip II anormal verileri üreten sebepler arasında sensör arızası, sensör gürültüsü ve bazı kontrolsüz rastlantısal faktörler yer almaktadır. Tip III anormal veriler ise genellikle ardışık bir zaman periyodunda ortaya çıkar ve güç eğrisinde bir satırda yığılır. Tip III anormal verilere rüzgâr kesintisi komutu veya haberleşme arızaları neden olur [9, 50].

## 2.8. Dünya’da ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi

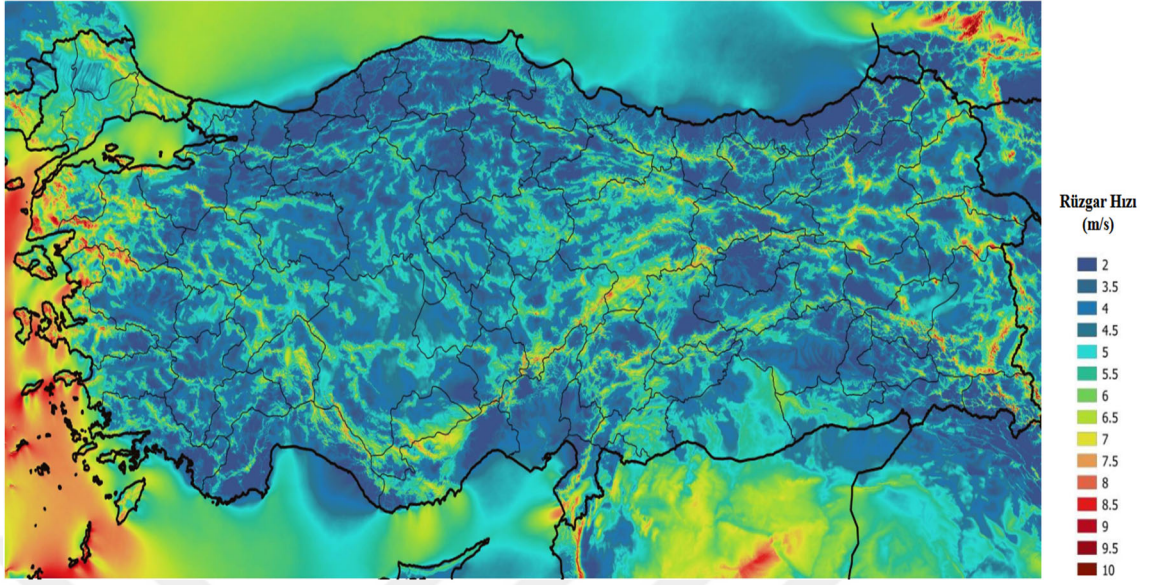
Yenilenebilir Enerji Küresel Durum Raporuna göre [51], dünya çapında 2021 yılında yaklaşık olarak 83 GW’ı karada ve 19 GW’ı açık denizde olmak üzere 102 GW rüzgâr enerjisi kapasitesi kuruldu. Toplam kapasite eklemesi, 2020 yılına göre yaklaşık %7 artarak en yüksek seviyeye ulaştı. Toplam küresel rüzgâr enerjisi kapasitesi, yaklaşık

olarak 791 GW'ı karada ve 54 GW'ı açık denizde olmak üzere 2020 yılına göre %13,5 artarak 2021 yılında 845 GW'a ulaştı. Şekil 2.8'te yıllara göre küresel rüzgâr enerjisi kapasiteleri ve yıllık kapasite eklemeleri görülmektedir. İlgili yılın mevcut kapasitesini sarı sütunlar gösterirken, yeni eklenen kapasiteyi turuncu sütunlar göstermektedir.



Şekil 2.8. Küresel rüzgâr enerjisi kapasiteleri ve yıllık kapasite eklemeleri [51]

Orta ölçekli sayısal hava tahmin ve mikro ölçekli rüzgâr akış modellerinden yararlanılarak oluşturulan Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlasına göre; yer seviyesinden 50 m yükseklikte ve 7,5 m/s üzeri yıllık ortalama rüzgâr hızlarına sahip kullanılabilir alanlarda km<sup>2</sup> başına 5 MW gücünde rüzgâr enerji santrali kurulabileceği belirlenmiştir. Ülkemizde kurulabilecek rüzgâr enerji santrallerinin toplam kapasitesinin 47.849,44 MW olduğu değerlendirilmiştir. Haziran 2022 itibariyle, rüzgâr enerji santrallerinin kurulu gücü 10.976 MW seviyesine ulaşırken, toplam kurulu güç içerisindeki oranı %10,81 olmuştur [52]. Şekil 2.9'da Türkiye'de 100 m yükseklik için yıllık ortalama rüzgâr hızı dağılımı görülmektedir.



Şekil 2.9. Türkiye’de 100 m yükseklik için yıllık ortalama rüzgâr hızı dağılımı [53]



### 3. BÖLÜM

#### BULANIK C-ORTALAMALAR KÜMELEME YÖNTEMİ

##### 3.1. Yapay Zekâ

İnsan nüfusunun artması ile birlikte teknolojinin kullanımını her alanda artmış ve teknolojik aletler yaşadığımız dünyanın birer parçası haline gelmişlerdir. Yaşam alanlarımızda kullandığımız pek çok cihaz bilgisayar tabanlı işlem yapmaktadır. Bu durum, insanlar ile cihazlar arasındaki etkileşimin iç içe olmasını kaçınılmaz bir hale getirmiştir. Bütün bu gelişmeler, gün geçtikçe, teknolojiye ve yapay zekâya olan merakın artmasına neden olmuştur. Dolayısıyla, zekâ ve yapay zekâ olgularının doğru anlaşılması oldukça önemlidir [54].

Zekâ, bilgiyi edinme ve tutma yeteneği, deneyimden öğrenme veya anlama yeteneği ve yeni bir durumda hızlı ve başarılı bir şekilde problem çözme yeteneği olarak tanımlanır [55]. Öğrenme, öğretme, uygulama, bilgi ve deneyim ve deneyime dayalı beceriler yoluyla zekâ geliştirilebilir. Zekânın, yazılım ile taklit edildiği durum ise; yapay zekâ olarak açıklanmaktadır [56]. İnsan yapımı cihazların programlanarak zeki durumlar sergileyebilmesi, yapay zekânın uygulanabilirliği olarak karşımıza çıkar. Yapay zekâ olgusunun temelinde öğrenebilme yeteneği yatmaktadır. Çünkü bir insan bir işi yapmadan önce nasıl öğrenip tecrübe etmesi gerekiyorsa, yapay zekânın da tecrübe edip öğrenmesi gerekmektedir. Yapay zekânın bizlere sunacağı avantaj; öğrendiklerini çok hızlı bir şekilde uygulamaya koyması olacaktır [54].

Tüm disiplinlerde kendine uygulama alanı bulan yapay zekânın temelleri geçmişe dayanmaktadır. 1822’de Charles Babbage, akıllı davranış sergileyen mekanik bir makine üzerinde çalışmıştır. 1950’de Claude Shannon, bilgisayarların satranç oynayabileceği fikrini ortaya sürerken, Alan Turing tarafından bir makinenin zeki olup olmadığını belirlemek için test geliştirilmiştir. 1956 yılında Dartmouth Üniversitesi’nde düzenlenen bir konferansta yapay zekâ üzerine ilk oturum yapılmıştır [57].

1957 yılında John McCarthy tarafından yapay zekâ için işlevsel bir programlama dili geliştirilmiştir. 1970-1975 yılları arasında yapay zekânın gelişimi hız kazanmış, hastalıkların teşhisi için sistemler geliştirilmiş ve günümüzdeki temelleri atılmıştır. 1975-1980 yılları arasında yapay zekânın psikoloji, dil gibi diğer bilim dallarında da kullanılabileceği fikri sunulmuştur. 1980'li yıllarda yapay zekâ, pratik uygulamalarla birlikte büyük ölçekli projelerde kullanılmaya başlanmıştır [57].

Son yıllarda, yapay zekânın bulanık mantık, yapay sinir ağları, uzman sistemler ve derin öğrenme gibi alt alanları geniş bir araştırma ve uygulama alanı bulmuştur. Bulanık mantık, bulanık küme teorisine dayalı matematiksel bir disiplindir. Uzun-kısa, soğuk-sıcak ve hızlı-yavaş yerine biraz uzun, az soğuk, çok yavaş vb. ara değerleri içerir. Yapay sinir ağları, insan beynindeki sinir ağlarını taklit eden bilgisayar programlarıdır. Bir olayla ilgili örnekler kullanılarak yapay sinir ağları eğitilir. Örnekler aracılığıyla ortaya çıkan özelliklerden genellemeler yapılarak hiç karşılaşılmayan olaylar için çözümler elde edilir [56].

Uzman sistem, temel olarak insan düşüncelerini uygulamak için bir bilgisayar tarafından işlenen yazılımdır. Uzman sistem geliştirmenin amacı, uzmanların belirli bir konudaki bilgi ve deneyimlerini bilgisayara aktarmaktır [56]. Derin öğrenme ise, nesneyi tanıma, konuşulanı anlama, doğal dil işleme gibi alanlarda çok katmanlı yapay sinir ağlarını kullanan; makine öğrenmesi türlerinden biridir. Geleneksel makine öğreniminden farklı olarak, kodlanmış kuralları öğrenmek yerine, resimlerdeki, videolardaki, seslerdeki ve metinlerdeki bilgileri otomatik olarak öğrenir. Esnek yapıya sahip oldukları için ham görüntü veya metin verilerinden de öğrenebilirler. Artan veri miktarıyla birlikte tahmin doğrulukları da arttırılabilir [58].

Yapay zekâ tekniklerinin kullanılmasıyla, yakın gelecekte, insanların yaşam kalitesini artıracak pek çok uygulamanın geliştirilmesi ve pek çok ticari yapay zekâ uygulamasının kullanıma sunulması beklenmektedir. Doğal dil işleme ve ses tanıma sistemleri sayesinde, geleceğin bilgisayarları daha etkileşimli iletişim kurulabilen cihazlara dönüşecektir. Bu sayede, bilgisayarlarla işlem yapma süreleri kısalacak ve verimlilik artacaktır. Özellikle gelişen teknolojiyle birlikte, robotlara yapılan yatırımlar yüksek seviyede artış göstermiş ve üretim sistemlerinde insanların yerini alan robotlar aktif olarak kullanılmaya başlanmıştır. 21. Yüzyıl içerisinde yapay zekâ tabanlı, çeşitli düzeylerde zeki davranışlar

sergileyebilen ve karar verme süreçlerinde inisiyatif kullanabilen robotların geliştirilmesi öngörülmektedir [59].

### 3.2. Kümeleme Analizi

Gözlenen bir olay sonucunda karar değişkenine atanan olasılıkların toplamını içeren gruba küme denir. Bir olayın veya olaylar dizisinin sonunda ortaya çıkabilecek her bir olasılığa ise küme ögesi denir [60].

Kümeleme analizi, denetimsiz öğrenmeye dayanır ve birbirlerine benzeyen öğeleri gruplandırır. Kümeleme analizinde kümeler arası benzerlik minimum yapılırken, küme içi benzerlik maksimum yapılır [61]. Başka bir ifadeyle, küme öğeleri, söz konusu değişkenler açısından küme içerisinde olabildiğince homojen olup birbirlerine çok yakın, kümeler arasında olabildiğince heterojen olup birbirlerine çok uzaktırlar [62]. Kümeleme yöntemleri, genel olarak bulanık yöntemler, şebeke tabanlı yöntemler, yoğunluk tabanlı yöntemler, parçalı yöntemler ve hiyerarşik yöntemler olarak sınıflandırılır [63, 64].

Bulanık c-ortalamar algoritması, Gustafson-Kessel algoritması ve Gath-Geva algoritması bulanık yöntemler arasında bulunmaktadır. WaveCluster (dalgacık dönüşümü kullanarak kümeleme) ve STING (istatistiksel bilgi kılavuzu) şebeke tabanlı yöntemler arasında yer almaktadır. OPTICS (kümeleme yapısını tanımlamak için noktaları sıralama) ve DBSCAN (gürültülü uygulamaların yoğunluğa dayalı mekânsal kümelemesi) yoğunluk tabanlı yöntemler arasında bulunmaktadır. Ayrıca, hem şebeke tabanlı hem de yoğunluk tabanlı CLIQUE (araştırmalı kümeleme) yöntemi vardır [63].

CLARANS (rastlantısal aramaya dayalı büyük uygulamaları kümeleme), CLARA (büyük uygulamaları kümeleme), PAM (ortancalar etrafında bölümeleme), k-ortalamar ve k-ortancalar algoritmaları parçalı yöntemler arasında yer almaktadır. Ayrıca, CHAMELEON (dinamik modelleme kullanarak hiyerarşik kümeleme), ROCK (bağlantıları kullanarak güvenilir kümeleme), CURE (temsilcileri kullanarak kümeleme) ve BIRCH (hiyerarşileri kullanarak dengeli iteratif azaltma ve kümeleme) hiyerarşik yöntemler arasında mevcuttur [63].

### 3.2.1. Klasik ve Bulanık Kümeler

Klasik kümelerde bir öğeden diğerine geçiş, aniden değişen ve keskin üyelik dereceleri biçimindedir. Bu geçiş, bulanık kümeler için sürekli ve yumuşak üyelik dereceleri şeklinde olmaktadır. Dolayısıyla, bir bulanık kümenin, farklı üyelik derecelerine sahip öğeleri olan bir topluluk olduğu düşünülebilir. Bulanık kümelemede bütün öğelerin değişik üyelik dereceleriyle kümeye ait olmaları mümkünken, klasik kümelemede bir nesnenin kümeye ait olabilmesi için üyelik derecesinin 1 olması gerekir. Ayrıca, aynı değişken özelliği açısından bir bulanık küme elemanı, başka bir kümenin de elemanı olabilir [60].

Örneğin; bir ortam 25 °C sıcaklığında olmasına rağmen, artan nem nedeniyle aynı derece, daha sıcak bir ortamı temsil eden başka bir kümenin de üyesi olabilir. Böylece, küme öğeleri ile üyelik seviyeleri arasında uyumluluk vardır. Klasik bir  $C$  kümesinin  $c_1, c_2, \dots, c_n$  elemanlarından oluştuğu varsayıldığında,  $F$  bulanık kümesi aşağıdaki gibi olacaktır [60, 65]. Burada,  $F$  bulanık kümesinin öğelerini  $c_i$  temsil ederken,  $c_i$ 'nin  $[0,1]$  aralığında değişen üyelik derecelerini  $\mu_F(c_i)$  temsil eder. Ayrıca, toplam işareti, küme öğelerinin topluluğunu gösterirken; bölme işareti, üstteki üyelik derecesine alttaki küme öğesinin denk geldiğini belirtir.

$$F = \left\{ \frac{\mu_F(c_1)}{c_1}, \frac{\mu_F(c_2)}{c_2}, \dots, \frac{\mu_F(c_n)}{c_n} \right\} = \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{\mu_F(c_i)}{c_i} \right\} \quad (3.1)$$

### 3.2.2. Kümeleme Analizinde Uzaklık Ölçüleri

Kümeleme analizinde öğelerin farklılıkları veya benzerlikleri esas alınarak kümeler oluşturulur. Söz konusu farklılıkları veya benzerlikleri belirlemek için bir takım uzaklık ölçüleri kullanılır. Bunlardan en sık kullanılanları; Manhattan uzaklığı, Öklid uzaklığı, karesel Öklid uzaklığı, Minkowski uzaklığı, Mahalanobis uzaklığı, Pearson korelasyon uzaklığı ve Spearman korelasyon uzaklığıdır.

$m \times n$  boyutlu  $Y$  veri matrisinde  $a$  ve  $b$  öğeleri arasındaki uzaklık  $u(a, b)$  olmak üzere bahsedilen uzaklık ölçülerine ait eşitlikler aşağıda verilmiştir [63, 66, 67]. Bu eşitliklerde  $Cv$  kovaryans matrisini,  $\bar{y}_a$ ,  $y_{ai}$  değerlerinin ortalamasını,  $\bar{y}_b$ ,  $y_{bi}$  değerlerinin

ortalamasını,  $r_a$  ve  $r_b$ ,  $y_a$  ve  $y_b$ 'nin koordinat bazında sıra vektörlerini temsil etmektedir. Ayrıca, Minkowski uzaklık ölçüsünde  $m$  değeri 2 olarak atandığında Öklid uzaklık ölçüsü bulunurken,  $m$  değeri 1 olarak atandığında Manhattan (City Block) uzaklık ölçüsü elde edilmektedir.

$$u(a, b)_{Manhattan} = \sum_{i=1}^n |y_{ai} - y_{bi}| \quad (3.2)$$

$$u(a, b)_{Öklid} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{ai} - y_{bi})^2} \quad (3.3)$$

$$u(a, b)_{Karesel Öklid}^2 = \sum_{i=1}^n (y_{ai} - y_{bi})^2 \quad (3.4)$$

$$u(a, b)_{Minkowski} = \sqrt[m]{\sum_{i=1}^n |y_{ai} - y_{bi}|^m} \quad (3.5)$$

$$u(a, b)_{Mahalanobis}^2 = (y_a - y_b) C v^{-1} (y_a - y_b)' \quad (3.6)$$

$$u(a, b)_{Pearson} = 1 - \frac{(y_a - \bar{y}_a)(y_b - \bar{y}_b)'}{\sqrt{(y_a - \bar{y}_a)(y_a - \bar{y}_a)'} \sqrt{(y_b - \bar{y}_b)(y_b - \bar{y}_b)'}} \quad (3.7)$$

$$u(a, b)_{Spearman} = 1 - \frac{(r_a - \bar{r}_a)(r_b - \bar{r}_b)'}{\sqrt{(r_a - \bar{r}_a)(r_a - \bar{r}_a)'} \sqrt{(r_b - \bar{r}_b)(r_b - \bar{r}_b)'}} \quad (3.8)$$

Mahalanobis uzaklığı, istatistiksel teoriye dayanmaktadır. Bir veri noktası ile verilerin dağılımı arasındaki bir ölçüdür [68, 69]. Mahalanobis uzaklığı, benzer veri noktaları arasındaki mesafenin küçük olması için verilerin geometrik dağılımını değerlendirir. Mahalanobis mesafesi ne kadar büyükse, veri noktası merkezden o kadar uzaklaşır [57, 69].

Mahalanobis uzaklığının, ham verilerin ortalamalarıyla birlikte standart sapmalarını da değerlendirmesi ve ortalamadan yüksek ölçüde değişkenlik gösterme durumu varsa, bu

durumun standart sapmaya göre ne kadarlık bir seviyede gerçekleştiğini analizi etmesi aykırı değer analizi için oldukça faydalıdır [70]. Bu özelliklerinden dolayı, Mahalanobis uzaklığı, mevcut veri setlerinde çok değişkenli aykırı değer analizi, tespiti ve temizlenmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır.

### **3.3. Bulanık Mantık**

Klasik mantık iyi/kötü, evet/hayır, doğru/yanlış vb. tanımlamalarının kesinlikle birbirinden ayrılmasına dayanır [71]. Ancak insanların “biraz daha yavaş”, “çok sıcak” veya “yoğun sisli” gibi karar vermek için her zaman bilişsel yeteneklerini kullandıkları tanımlamalarda bulanıklık vardır [72].

#### **3.3.1. Bulanık Mantık İlkeleri**

Bulanık mantık, ikili mantık yerine yani, sadece 0 ve 1 bilgilerinin kullanılması yerine ara değerlerin de alınabilmesini içerir. Bulanık mantık teorisinde üyelik derecesi kavramı geliştirilmiştir. Örneğin; yaşlılar kümesine, 80 yaşına gelmiş bir insan %90 üye olabiliyorken, 50 yaşına gelmiş birisi %25 üye olabilir. Bu şekilde bir değerlendirme, olaylara esneklik kazandırmakla birlikte sorunların çözümüne katkı sağlar [73].

Bulanık mantık, verilerden bulanık bir bölüm oluşturmamıza imkân veren denetimsiz bir kümeleme algoritmasıdır. Çözümün bulanıklık derecesine karşılık gelen parametreye bağlıdır. Bu parametre, algoritmayı bulanıklaştırır ve tüm öğeler tüm kümelere ait olma eğilimine girer. Çok boyutlu verileri kümelemek için kullanıldığında, her bir veri noktasına, her bir küme merkezi için %0 ila %100 arasında bir üyelik verir. Bunun, her veri noktasına net, kesin bir etiketin atandığı geleneksel sabit kümelemeye kıyasla daha güçlü olduğu söylenebilir. Başka bir ifadeyle, küme merkezi ile veri noktası arasındaki mesafe temelinde her bir küme merkezi açısından her bir veri noktasına üyelik atayarak çalışır. Veri küme merkezine ne kadar yakınsa, belirli küme merkezine üyeliği o kadar fazladır. Kısaca, her veri noktasının üyelik toplamı 1'e eşit olur [74].

Bulanık c-ortalamlar algoritması ile k-ortalamlar algoritması karşılaştırıldığında, bulanık c-ortalamlar algoritması k-ortalamlar algoritmasına göre daha iyi sonuç verebilir. Çünkü veri noktasının tek bir küme merkezine ait olması gereken k-ortalamlar algoritmasından farklı olarak, bulanık c-ortalamlar algoritması tarafından veri noktasına,

her bir küme merkezi için üyelik atanır, bunun sonucunda veri noktası birden fazla küme merkezine ait olabilme niteliği taşır. Diğer taraftan, bulanık c-ortalamlar algoritması, daha fazla işlem yaptığı için k-ortalamlar algoritmasından daha yavaş çalışma eğilimi gösterebilir. Çünkü her nokta, her küme ile değerlendirilir ve her değerlendirmede daha fazla işlem yapılır [75].

### **3.3.2. Bulanık Mantık Kullanımı ve Avantajları**

1920'lerde Jan Lukasiewicz tarafından sunulan üç değerli mantık fikri, 1965 yılında Lotfi A. Zadeh tarafından bir kümenin tüm öğelerini içerecek şekilde genişletilmiştir. Bu yeni bulanık kümeler yaklaşımı, 1974 yılında İbrahim Mamdani tarafından geliştirilerek pratik kontrol sistemlerinde kullanılmıştır.

Bulanık mantık, Japonya'da binlerce süreç kontrol sisteminde başarıyla kullanılmıştır. Bulanık sistemlere önemli bir örnek olarak, Japonya'nın Sendai kentinde bulunan metro sistemi verilebilir. Geliştirilen bulanık kontrol sistemi, trenlerin raylar üzerinde hızlı hareket etmesini, düzgün hızlanmasını ve yavaşlamasını, tam zamanında istasyona varmasını ve durmasını ve seyahat süresince yolcuları sarsmamasını sağlamıştır [76]. Endüstriyel kontrol sistemlerinde, akıllı binalarda, evsel cihazlarda, otomobillerde, asansörlerde, iklimlendirme sistemlerinde, karar destek sistemlerinde vb. yerlerde yaygın olarak bulanık mantık kullanılmaktadır [71].

Bulanık mantık uygulamaları pek çok avantaja sahiptir. Tasarımları kolay olduğu için geleneksel kontrol sistemlerinden daha verimli ve ucuzdur. Geleneksel kontrolden daha kararlı ve hassastır. Sistem tasarımcısı çalışma öncesinde sistem ilgili her şeyi öğrenmek zorunda değildir. Bu sayede, problemlerin çözümünü ve prototiplemeyi kolaylaştırır. Sayısal olmayan değişkenlerden faydalanır. Çok sayıda gözlemlenebilir değişkeni değerlendirebilir. Az sayıda karar, kural ve değere ihtiyaç duyulur. Bilgi kazanımını artırır ve sunumunu kolaylaştırır. Bunlara avantajlara karşın, bulanık sistemler üzerinde daha çok simülasyonlara ve daha ince ayarlamalara ihtiyaç duyulması ve bulanık bir sistem modeli geliştirmenin zor olması dezavantajları arasında yer almaktadır [76].

### 3.3.3. Bulanık Mantıkta Üyelik Fonksiyonları

Üyelik fonksiyonu,  $X$  evrensel kümesine dâhil olan  $A$  bulanık kümesi için bir  $x$  elemanın aitlik derecesini ifade eder. Başka bir deyişle, üyelik fonksiyonları, bir kümedeki mevcut bulanıklığı somutlaştırır [77]. Bunlardan en sık kullanılanları; üçgen üyelik fonksiyonu, yamuk üyelik fonksiyonu, Gaussian üyelik fonksiyonu, genelleştirilmiş Bell üyelik fonksiyonu ve sigmoidal üyelik fonksiyonudur.  $\forall x \in X, \mu_A \in [0,1]$  olmak üzere bahsedilen üyelik fonksiyonlarına ait eşitlikler aşağıda verilmiştir [71, 78].

$$\mu_{A,\text{Üçgen}}(x; \alpha, \beta, \delta) = \begin{cases} 0, & x < \alpha \\ \frac{x - \alpha}{\beta - \alpha}, & \alpha \leq x \leq \beta \\ \frac{\delta - x}{\delta - \beta}, & \beta \leq x \leq \delta \\ 0, & x > \delta \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\mu_{A,\text{Yamuk}}(x; \alpha, \beta, \delta, \theta) = \begin{cases} 0, & x < \alpha \\ \frac{x - \alpha}{\beta - \alpha}, & \alpha \leq x \leq \beta \\ 1, & \beta \leq x \leq \delta \\ \frac{\theta - x}{\theta - \delta}, & \delta \leq x \leq \theta \\ 0, & x > \theta \end{cases} \quad (3.10)$$

$$\mu_{A,\text{Gaussian}}(x; m, \sigma) = e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.11)$$

$$\mu_{A,\text{Bell}}(x; a_1, a_2, a_3) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - a_3}{a_1} \right|^{2a_2}} \quad (3.12)$$

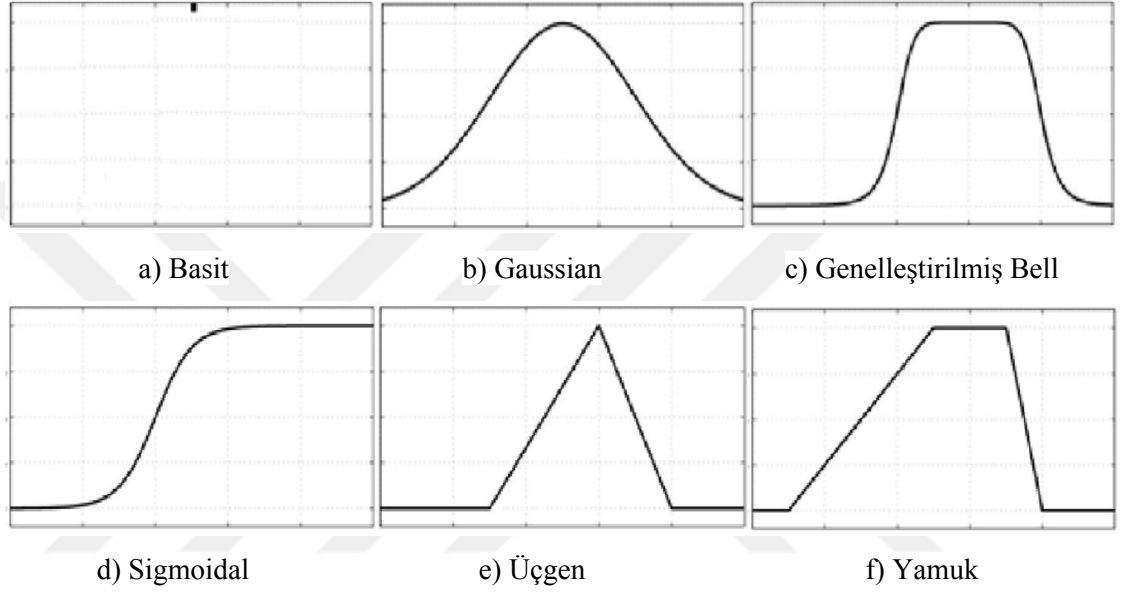
$$\mu_{A,\text{Sigmoidal}}(x; a_1, a_2) = \frac{1}{1 + e^{-a_1(x-a_2)}} \quad (3.13)$$

Üçgen üyelik fonksiyonu üç parametre ile tanımlanırken, yamuk üyelik fonksiyonu dört parametre ile tanımlanır. Gaussian üyelik fonksiyonunda  $\sigma$  fonksiyonun genişliğini ve  $m$  fonksiyonun merkezini temsil eder. Genelleştirilmiş Bell üyelik fonksiyonunda  $a_3$  fonksiyonun merkezini,  $a_2$  fonksiyonun eğimini ve  $a_1$  fonksiyonun genişliğini temsil eder. Sigmoidal üyelik fonksiyonunda  $a_2$  geçiş noktasını ve  $a_1$  geçiş noktasındaki eğimi



temsil eder. Ayrıca, bulanık mantıkta basit olarak adlandırılan üyelik fonksiyonu da bulunmaktadır.

Basit üyelik fonksiyonu, Gaussian üyelik fonksiyonu, genelleştirilmiş Bell üyelik fonksiyonu, sigmoidal üyelik fonksiyonu, üçgen üyelik fonksiyonu ve yamuk üyelik fonksiyonuna ait grafiksel gösterimler Şekil 3.1’de yer almaktadır.



Şekil 3.1. Üyelik fonksiyonlarına ait grafiksel gösterimler [79]

#### 3.4. Bulanık C-Ortalamalar Algoritması

Geleneksel kümelemede, temel olarak, bir varlık kümesini uygun bir benzerlik ölçüsüne göre birkaç homojen kümeye ayırma işlemi yapılır. Geleneksel kümeleme ile bulanık kümeleme arasındaki temel fark; kesin kümelemede bir eleman yalnızca bir kümeye ait olurken, bulanık kümelemede elemanların, farklı üyelik dereceleriyle birden fazla kümeye ait olmasına izin verilir. Üyelik dereceleri, veri noktalarının küme merkezlerine olan yakınlıklarına bağlıdır. Örneğin; bir kümenin merkezine yakın olan bir veri noktası o kümede daha yüksek derecede bir üyeliğe sahipken, aynı küme merkezinden uzakta bulunan başka bir veri noktası o kümeye daha düşük derecede bir üyeliğe sahip olmaktadır [69, 80].

Günümüzde en çok kullanılan bulanık kümeleme algoritması, 1973 yılında Dunn tarafından sunulan ve 1981 yılında Bezdek tarafından geliştirilen bulanık c-ortalamalar

algoritmasıdır [81]. Bulanık c-ortalama algoritması, uygulama kolaylığı sağlaması, hızlı çalışması ve güvenilir olması özelliklerinden dolayı astronomi, tıp, fen bilimleri, mühendislik, ekonomi, finans, eğitim, vb. birçok alanda uygulanmaktadır [81, 82]. Bulanık c-ortalama algoritması, denetimsiz örüntü tanımlamaya dayanır ve her veri noktasının bir üyelik derecesi ile belirtilen bir dereceye kadar mevcut kümelere ait olduğu veri kümeleme tekniğidir [83].

$N$  veri noktalarının sayısını ve  $C$  küme sayısını temsil etmek üzere,  $N$  satırlı bir veri noktaları dizisi  $x_j$  ve  $C$  satırlı bir küme merkezleri dizisi  $c_i$  aşağıdaki gibi olacaktır. Ayrıca,  $x_j$  ve  $c_i$  dizilerinin sütun sayısı veri boyutuna eşittir. Bu durumda, bulanık c-ortalama algoritması şu adımları gerçekleştirir [83, 84]:

$$x_j = [x_{j1} \ x_{j2} \ \dots \ x_{jn}]^T, \quad 1 \leq j \leq N \quad (3.14)$$

$$c_i = [c_{i1} \ c_{i2} \ \dots \ c_{in}]^T, \quad 1 \leq i \leq C \quad (3.15)$$

1. Başlangıçtaki küme üyelik değerleri rasgele oluşturulur.
2. Aşağıdaki denklem kullanılarak küme merkezleri hesaplanır. Bu denklemde  $\mu_{ij}$ ,  $i$ . kümedeki  $j$ . veri noktasının üyelik derecesidir. Belirli bir veri noktasının, tüm kümeler için üyelik değerlerinin toplamı 1'dir.

$$c_i = \frac{\sum_{j=1}^N \mu_{ij}^m x_j}{\sum_{j=1}^N \mu_{ij}^m} \quad (3.16)$$

3. Aşağıdaki denklem kullanılarak her bir veri noktasının her bir küme merkezine Öklid uzaklığı hesaplanır. Bu denklemde  $D_{ij}$ ,  $j$ . veri noktasından  $i$ . küme merkezine olan mesafedir.

$$D_{ij} = \sqrt{(x_j - c_i)^T (x_j - c_i)} \quad (3.17)$$

4. Aşağıdaki denklem kullanılarak her veri noktası için üyelik değerleri güncellenir. Bu denklemde  $m$ , bulanıklaştırma katsayısıdır.  $m > 1$  olmak üzere kümeler arasındaki

sınırların ne kadar bulanık olduğunu, yani birden fazla kümede önemli üyeliğe sahip veri noktalarının sayısını ifade eder.

$$\mu_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^N (D_{ij}/D_{ik})^{2/m-1}} \quad (3.18)$$

5. Aşağıdaki denklem kullanılarak amaç fonksiyonu  $J_m$  hesaplanır.

$$J_m = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^N \mu_{ij}^m D_{ij}^2 \quad (3.19)$$

6. Amaç fonksiyonu minimum eşikten daha az iyileşene kadar veya maksimum iterasyon sayısı tamamlanıncaya kadar 2., 3. ve 4. aşamalar tekrarlanır.

## 4. BÖLÜM

### AYKIRI DEĞER TESPİTİ VE TEMİZLENMESİ

Bir rüzgâr türbininin güç eğrisi, rüzgâr hızı ile karşılık gelen güç çıkışı arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi tanımlar ve rüzgâr türbininin üretim performansını gösterir. Rüzgâr enerji potansiyeli tahmininde, rüzgâr gücü tahmininde, rüzgâr türbini seçiminde ve rüzgâr türbin durumunun izlenmesinde önemli roller oynar. Buna karşın, rüzgâr türbinlerinin verimli düzeyde çalışabilmesi ve verilerin daha sağlıklı okunabilmesi açısından güç eğrilerindeki aykırı değerlerin tespit edilmesi ve temizlenmesi gerekir.

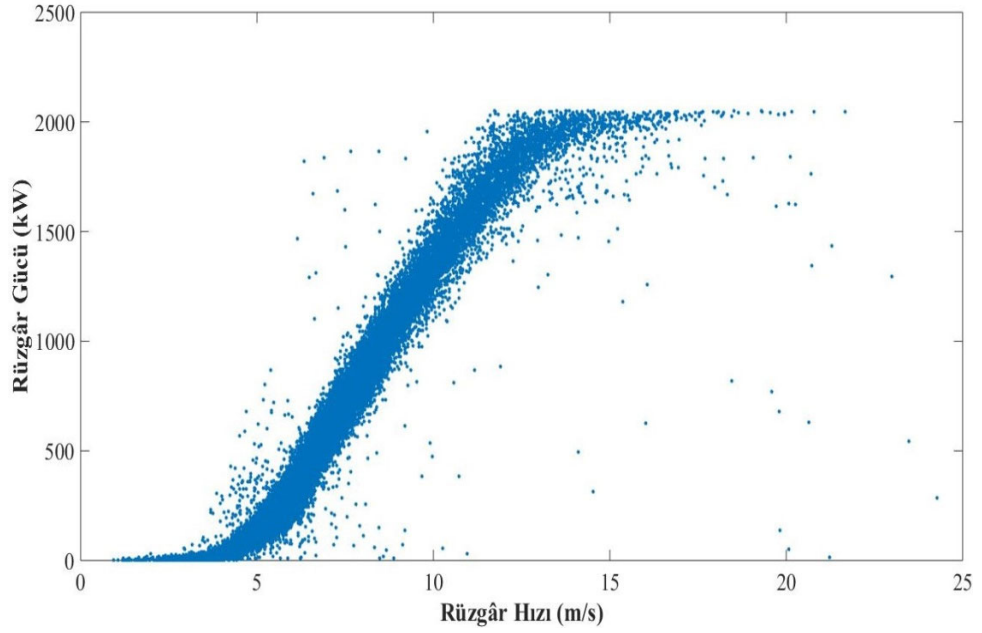
Bu tez çalışmasında kullanılan ham güç eğrisi veri setleri, Fransa'nın Meuse şehrinde bulunan La Haute Borne rüzgâr enerji santraline ait iki rüzgâr türbininden alınmıştır [85]. Veriler 80 m yükseklikte gerçek zamanlı rüzgâr gücü ve rüzgâr hızı ölçümlerinden oluşmaktadır. Rüzgâr gücü ve rüzgâr hızı parametrelerinin birimleri, sırasıyla, kW ve m/s olarak atanmıştır. Her iki rüzgâr türbininin anma güçleri 2,05 MW'tır. Kule yükseklikleri 80 m ve rotor yarıçapları 82 m'dir. Söz konusu rüzgâr türbinlerine ait veri setleri 1 yıl boyunca 10 dakika aralıklarla yapılan ölçümleri içermektedir. Toplam veri setlerinden rüzgâr gücü veya rüzgâr hızının ölçülemediği değerler ile negatif değerler çıkarılmıştır. Dolayısıyla, toplam veri setlerinde 1. rüzgâr türbini için 42573 adet veri bulunurken, 2. rüzgâr türbini için 41728 adet veri yer almaktadır.

Bu tez çalışmasında uygulanan aykırı değer tespit yaklaşımının, bahsedilen iki farklı veri seti üzerinden analizleri yapılarak farklı rüzgâr türbinleri üzerindeki performansı değerlendirilmiştir. Öncelikle, bulanık c-ortalama algoritması kullanılarak mevcut ham güç eğrileri kümelendirilmiştir. Bu kümeleme süreçlerinde, rastlantısal bir şekilde, küme sayısı 15 olarak, bulanıklaştırma katsayısı 2 olarak, sonlandırma kriteri 0,0001 olarak ve iterasyon sayısı 200 olarak atanmıştır. Ardından, kümelendirilmiş ham güç eğrilerindeki her bir kümeye Mahalanobis uzaklığı uygulanarak çok değişkenli aykırı değer tespiti yapılmıştır. Son olarak, Mahalanobis uzaklığı için eşik bir değer belirlenmiş ve ham güç eğrisindeki aykırı değerler temizlenmiştir. Aynı zamanda, ham güç eğrisindeki aykırı olmayan verilerin anormal veri olarak seçilmesinin önüne

geçilmiştir. Bahsedilen bu işlemler, i7 işlemcili 8GB RAM bellek kapasiteli 64-bit grafik tabanlı dizüstü bir bilgisayarda Matlab R2015a kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

#### 4.1. 1. Rüzgâr Türbini Güç Eğrisindeki Aykırı Değerlerin Analizi

1. Rüzgâr türbininin ham güç eğrisi Şekil 4.1’de verilmiştir. Bu güç eğrisinde yatay eksen m/s olarak rüzgâr hızını ve dikey eksen kW olarak rüzgâr gücünü temsil etmektedir. Bu şekilden görüldüğü üzere, ham güç eğrisinde rüzgâr türbininin verimli bir şekilde çalışmasını etkileyen çok sayıda aykırı değer bulunmaktadır. Bu aykırı değerler, güç eğrisinin sağ ve sol tarafında bulunan normal eğrilik etrafında rastgele dağılmış, süreksiz ve tahmin edilemez tipte anormal verilerdir. Bu tip anormal verileri üreten nedenler arasında sensör arızası, sensör gürültüsü ve bazı kontrolsüz rastlantısal faktörler yer almaktadır.



Şekil 4.1. 1. Rüzgâr türbininin ham güç eğrisi

##### 4.1.1. 1. Rüzgâr türbini güç eğrisinin kümeleneşmesi

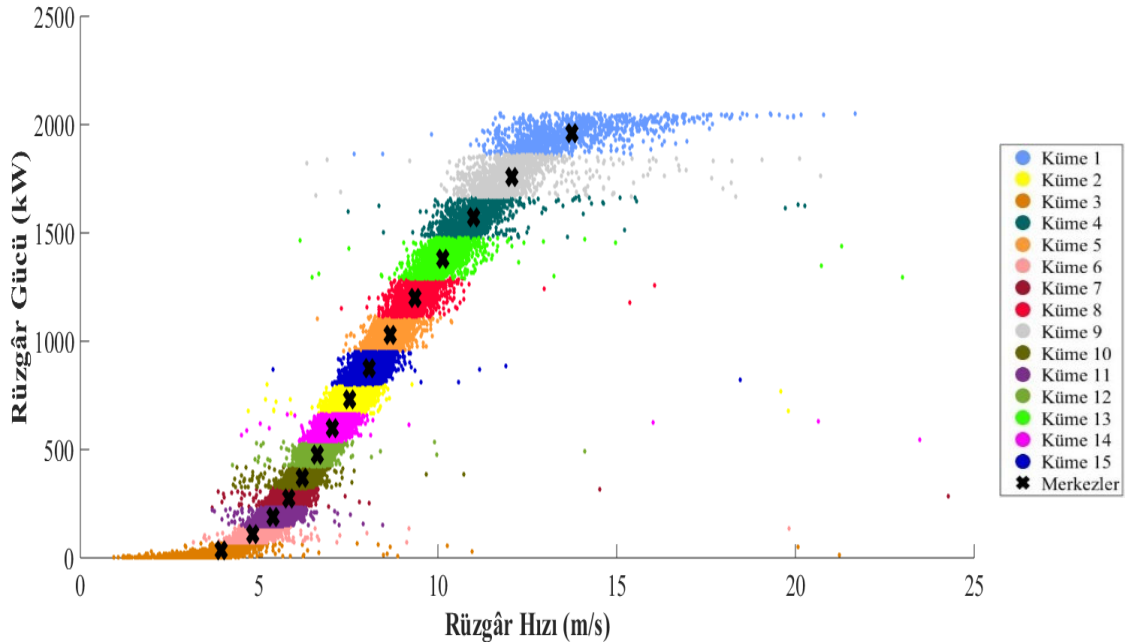
Bulanık c-ortalamlar algoritmasıyla kümeleme yapılırken, seçilen küme sayısının işlem süresini nasıl etkilediğı Tablo 4.1’de sunulmuştur. Bu tabloda, hesaplanan süre saniye cinsinden ifade edilmiştir. Örneğın; bulanık c-ortalamlar algoritması, küme sayısı 9 olarak alındığında 3,29 s’de, küme sayısı 15 olarak alındığında 6,65 s’de ve küme sayısı 21 olarak alındığında 9,65 s’de kümeleme işlemlerini tamamlamıştır. Dolayısıyla, küme

sayısı artırıldığında kümeleme için gereken hesaplama süresinin de arttığı gözlemlenmiştir.

Tablo 4.1. 1. Rüzgâr türbini güç eğrisi için küme sayısına göre işlem süreleri

Küme Sayısı	9	11	13	15	17	19	21
Geçen süre(s)	3,29	4,95	5,87	6,65	7,43	8,51	9,65

Bulanık c-ortalamalar algoritması kullanılarak 15 kümeye bölünmüş güç eğrisi Şekil 4.2’de verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere, üretilen her bir kümeye ait veriler farklı olarak renklendirilmiştir ve küme merkezleri “x” sembolü ile gösterilmiştir. Ayrıca, her bir rengin hangi kümeyi temsil ettiği şeklin sağ tarafındaki göstergede belirtilmiştir. Örneğin; güç eğrisinde açık mavi olarak renklendirilmiş bölge Küme 1’i, kırmızı olarak renklendirilmiş bölge Küme 8’i ve koyu mavi olarak renklendirilmiş bölge Küme 15’i temsil etmektedir.



Şekil 4.2. 1. Rüzgâr türbininin kümelenmiş güç eğrisi

Kümelenmiş güç eğrisindeki küme merkezlerine ait rüzgâr hızı ve rüzgâr gücü değerleri Tablo 4.2’de sunulmuştur. Bu tablodan görüldüğü üzere, örneğin; 1. kümenin merkezini temsil eden veri noktası (13,75844 m/s, 1959,953 kW) iken, 8. kümenin merkezini temsil eden veri noktası (9,350314 m/s, 1197,518 kW)’dır. 15. kümenin merkezi ise (8,074949 m/s, 873,2108 kW) ile temsil edilen veri noktasıdır. Ayrıca, bulanık c-ortalamalar

algoritması tarafından gerçekleştirilen iterasyonlar sonucunda amaç fonksiyonunun minimum değeri  $3,087 \times 10^7$  olarak elde edilmiştir.

Tablo 4.2. 1. Rüzgâr türbini güç eğrisi için küme merkezleri

Küme No	Rüzgâr Hızı (m/s)	Rüzgâr Gücü (kW)
1	13,75844	1959,953
2	7,529343	730,5089
3	3,935994	33,75962
4	11,0022	1571,235
5	8,670321	1029,374
6	4,829373	106,8527
7	5,824036	275,8132
8	9,350314	1197,518
9	12,0637	1760,194
10	6,20443	372,2804
11	5,381836	187,7152
12	6,617747	478,1041
13	10,14041	1379,854
14	7,039278	596,6395
15	8,074949	873,2108

1043 veri noktasına sahip 1. kümenin ilk 30 elemanının 1. kümeye üye olma dereceleri Tablo 4.3'te sunulmuştur. Örneğin; (15,45 m/s, 1997,84 kW) ile ifade edilen 1 nolu veri noktasının 1. kümeye ait olma derecesi 0,46 iken, (11,81 m/s, 1931,53 kW) ile ifade edilen 2 nolu veri noktasının aynı kümeye ait olma derecesi 0,94'dir. 3 nolu (12,9 m/s, 1869,22 kW) veri noktasının üyelik derecesi ise 0,99'dur. Dolayısıyla, 3 nolu veri noktasının 1. kümeye ait olma olasılığı, 1 nolu ve 2 nolu veri noktalarına göre daha yüksektir.

Tablo 4.3. 1. Rüzgâr türbini için 1. kümedeki elemanların üyelik dereceleri

Veri No	Rüzgâr Hızı (m/s)	Rüzgâr Gücü (kW)	Üyelik Dereceleri
1	15,45	1997,84	0,46
2	11,81	1931,53	0,94
3	12,9	1869,22	0,99
4	13,54	1956,6	0,71
5	14,86	2042,13	0,60
6	12,76	1889,58	0,74

Tablo 4.3. 1. Rüzgâr türbini için 1. kümedeki elemanların üyelik dereceleri (Devam)

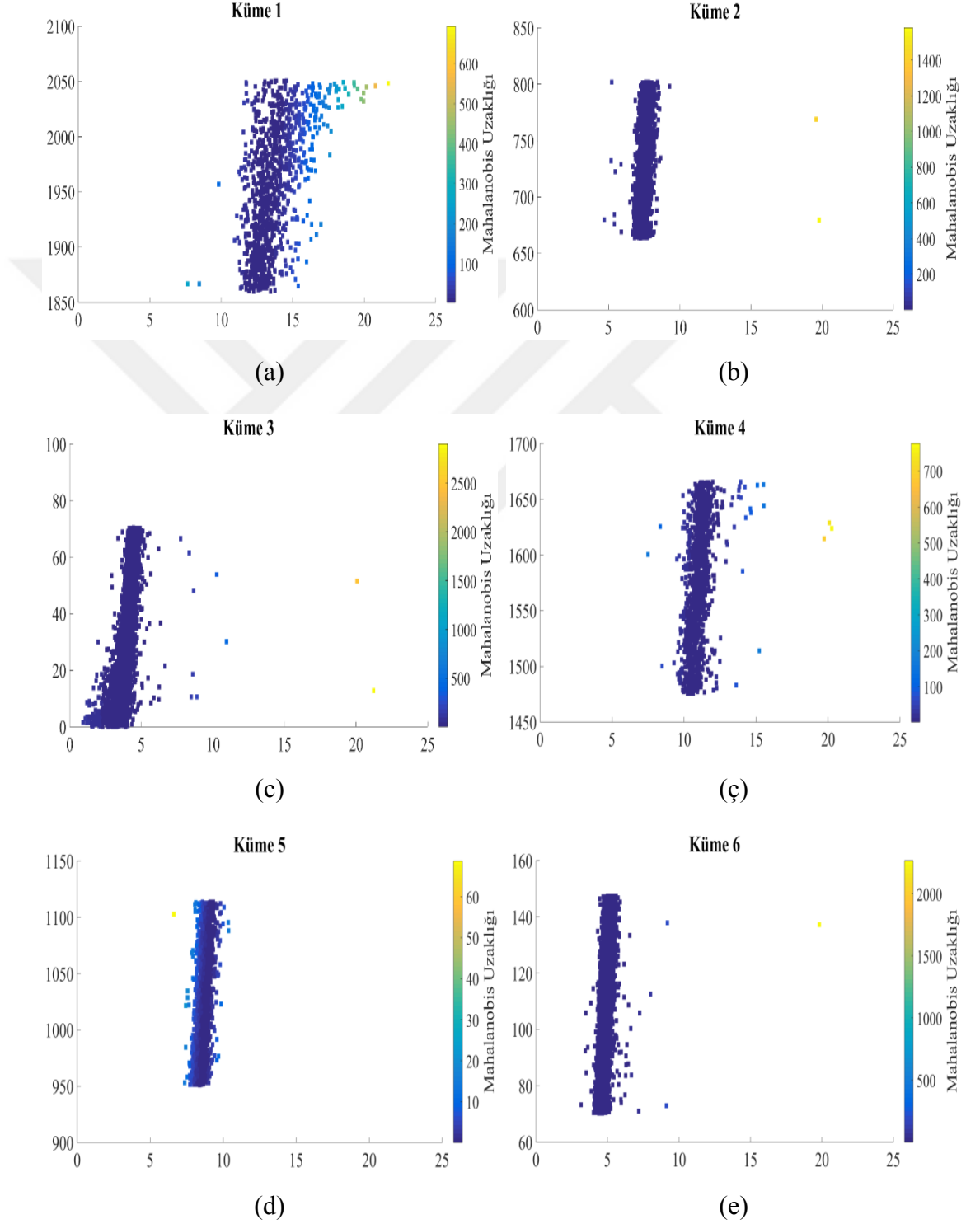
7	14	1944,69	0,42
8	12,79	1899,58	0,57
9	13,99	2011,64	0,98
10	13,4	1993,97	0,88
11	12,95	1950,09	0,99
12	12,73	1868,06	0,54
13	13,53	1974,82	0,79
14	12,41	1890,66	0,44
15	13,18	1978,82	0,95
16	12,72	1883,97	0,99
17	12,97	1958,57	0,91
18	12,58	1879,25	0,89
19	12,54	1883,19	0,57
20	12,5	1949,65	0,65
21	12,78	1962,17	0,89
22	15,83	2025,64	0,85
23	15,14	1981,66	0,99
24	14,28	1930,47	0,66
25	14,29	2009,23	0,42
26	17,25	2035,78	0,92
27	12,17	1950,18	0,94
28	13,04	2049,6	0,97
29	11,86	1924,74	0,82
30	12,79	2013,46	0,98

#### 4.1.2. 1. Rüzgâr türbini güç eğrisindeki aykırı değerlerin tespiti

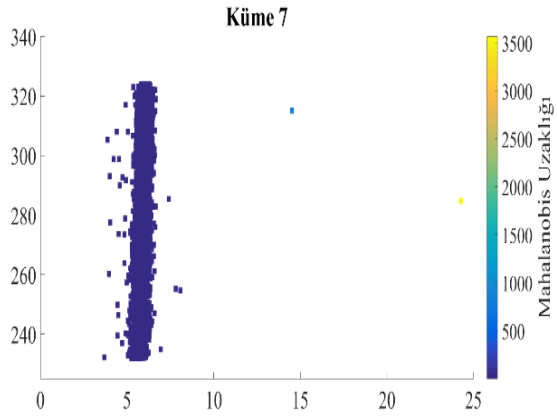
Bulanık c-ortalama algoritması tarafından üretilen 15 farklı güç eğrisi kümesinin Mahalanobis uzaklıkları Şekil 4.3'te verilmiştir. Buradaki her bir şekilde, yatay eksen m/s olarak rüzgâr hızını ve dikey eksen kW olarak rüzgâr gücünü temsil etmektedir. Ayrıca, her bir kümedeki veri noktaları, sahip oldukları Mahalanobis uzaklıklarına göre renklendirilmiş ve bu renklerin karşılık geldiği Mahalanobis değerleri şeklin sağ tarafındaki göstergede belirtilmiştir. Her bir kümede koyu mavi renklendirme, Mahalanobis uzaklık değeri en küçük olan ve merkeze en yakın olan elemanları ifade ederken, açık sarı renklendirme Mahalanobis değeri en yüksek olan ve merkeze en uzak



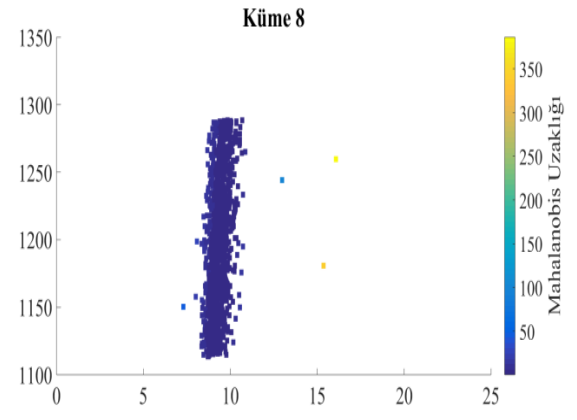
olan yani aykırı değerleri temsil etmektedir. Örneğin; 1. küme, 2. küme ve 3. küme için grafiğin sağ tarafında bulunan ve açık sarı olarak renklendirilmiş veri noktaları potansiyel aykırı değerlerdir.



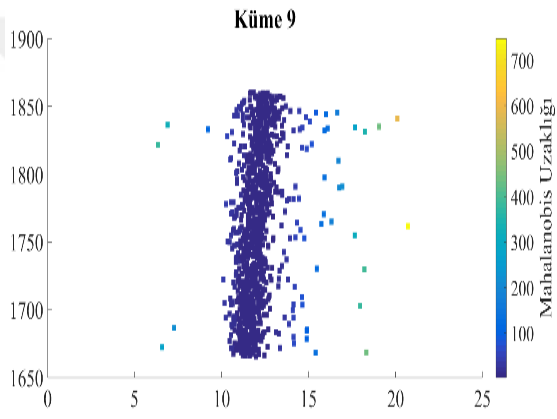
Şekil 4.3. 1. Rüzgâr türbini güç eğrisindeki kümelerin Mahalanobis uzaklıkları



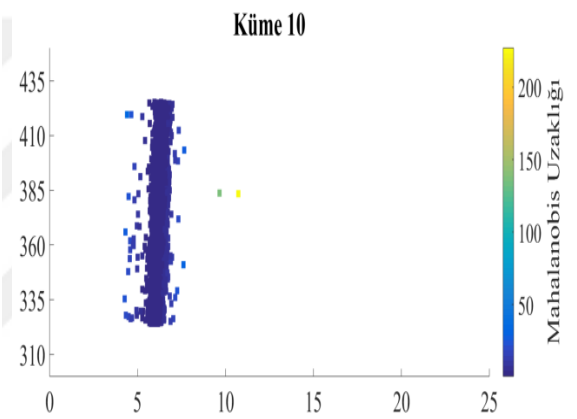
(f)



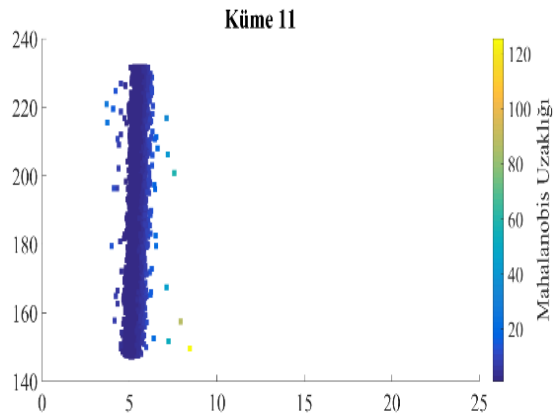
(g)



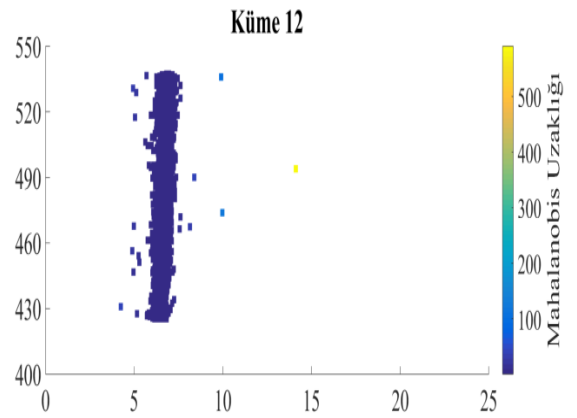
(ğ)



(h)

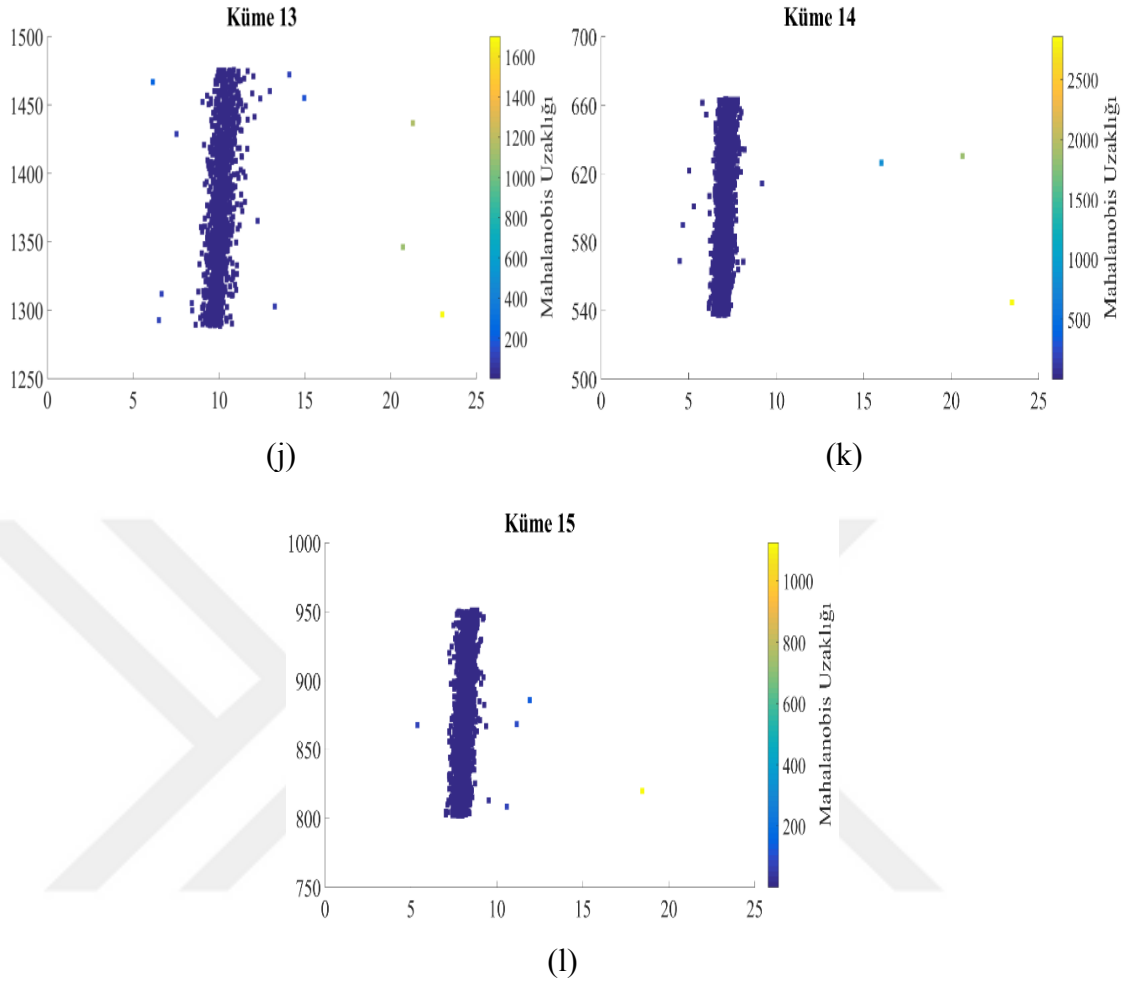


(ı)



(i)

Şekil 4.3. 1. Rüzgâr türbini güç eğrisindeki kümelerin Mahalanobis uzaklıkları (Devam)

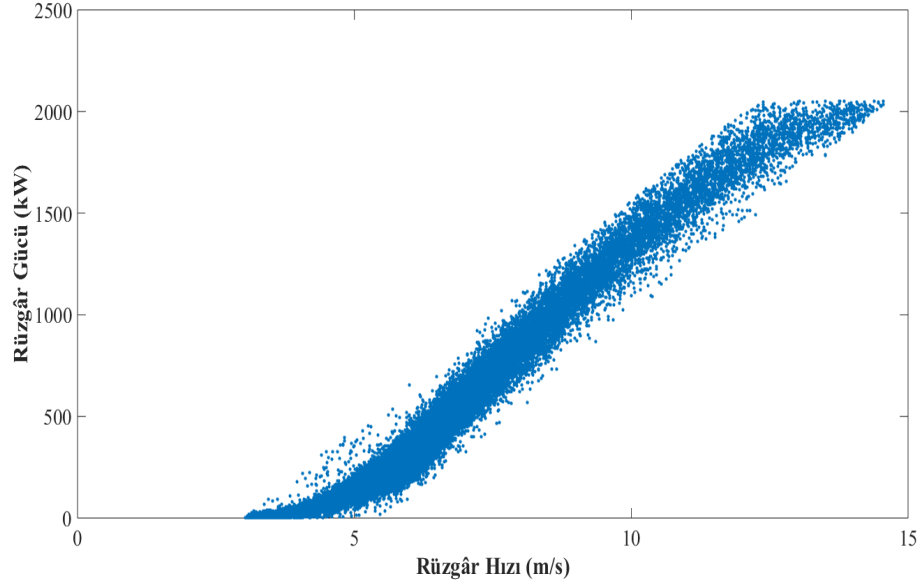


Şekil 4.3. 1. Rüzgâr türbini güç eğrisindeki kümelerin Mahalanobis uzaklıkları (Devam)

#### 4.1.3. 1. Rüzgâr türbini güç eğrisindeki aykırı değerlerin temizlenmesi

Aykırı değerlerin tespitinde eşik Mahalanobis uzaklık değeri 17,664 olarak alınmış ve elde edilen temizlenmiş güç eğrisi Şekil 4.4'te verilmiştir. Ayrıca, her bir küme için tespit edilen aykırı verilerin sayısı ve her bir kümedeki aykırı verilerin yüzdesi Tablo 4.4'te detaylı olarak sunulmuştur. Örneğin, toplamda 1043 adet veriye sahip 1. küme için aykırı değerlerin sayısı 313 olarak bulunmuş ve bu aykırı değer sayısı ilgili kümenin %30,01'ünü oluşturmaktadır. Benzer şekilde, toplamda 1056 adet veriye sahip 9. küme için aykırı değerlerin sayısı 129 olarak bulunmuş ve bu aykırı değer sayısı ilgili kümenin %12,22'sini oluşturmaktadır. Sonuç olarak, toplamda 42573 adet veriye sahip rüzgâr türbini güç eğrisinde %2,32'lik oranla toplamda 986 adet aykırı değer tespit edilmiş ve temizlenmiştir. Şekil 4.4'ten görüldüğü üzere, güç eğrisi ölçümleri temel istatistiksel özelliklerini korurken, aykırı değerler etkin bir şekilde ortadan kaldırılmıştır. Ayrıca, 1.

rüzgâr türbini için rüzgâr türbini arızası, plansız bakım, rüzgâr kesintisi, sensör arızası, sensör gürültüsü ve bazı kontrolsüz rastlantısal faktörler söz konusu aykırı değerlerin nedenleri arasında değerlendirilebilir.



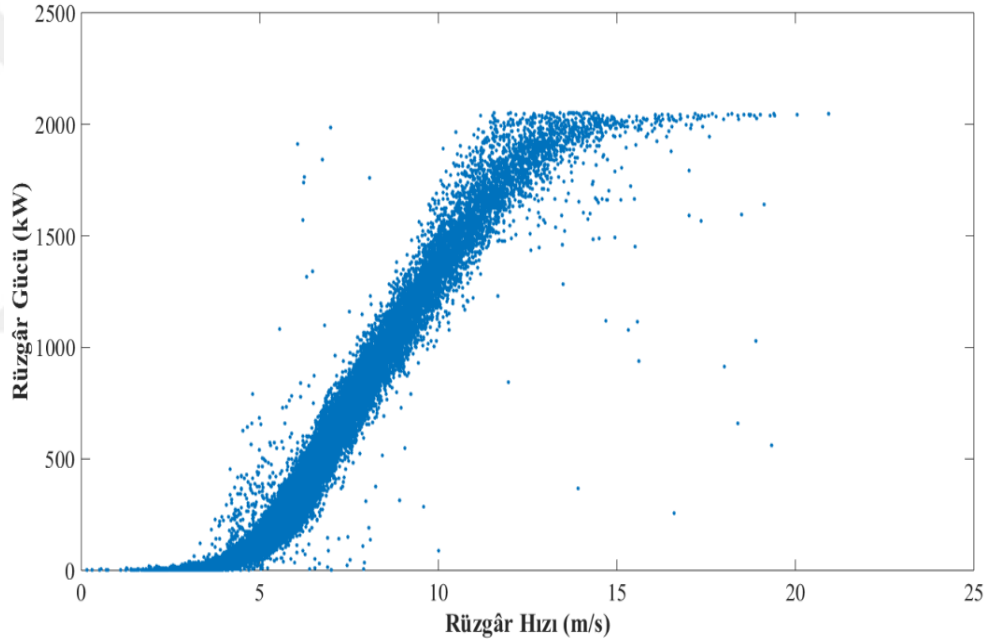
Şekil 4.4. 1. Rüzgâr türbini için temizlenmiş güç eğrisi

Tablo 4.4. 1. Rüzgâr türbini güç eğrisi için aykırı veri sayıları ve yüzdeleri

Küme No	Toplam Veri Sayısı	Aykırı Veri Sayısı	Aykırı Veri Yüzdesi
Küme 1	1043	313	%30,01
Küme 2	2169	11	%0,51
Küme 3	5965	345	%5,78
Küme 4	1111	59	%5,31
Küme 5	1576	4	%0,25
Küme 6	6323	22	%0,35
Küme 7	4347	12	%0,28
Küme 8	1341	6	%0,45
Küme 9	1056	129	%12,22
Küme 10	3731	17	%0,46
Küme 11	5387	15	%0,28
Küme 12	3068	13	%0,42
Küme 13	1227	26	%2,12
Küme 14	2486	9	%0,36
Küme 15	1743	6	%0,34

## 4.2. 2. Rüzgâr Türbini Güç Eğrisindeki Aykırı Değerlerin Analizi

2. Rüzgâr türbininin ham güç eğrisi Şekil 4.5'te yer almaktadır. Bu güç eğrisinde yatay eksen m/s cinsinden rüzgâr hızını ve dikey eksen kW cinsinden rüzgâr gücünü ifade etmektedir. Bu şekilde gösterildiği gibi, ham güç eğrisinde rüzgâr türbininin etkin bir biçimde çalışmasını etkileyen pek çok aykırı değer bulunmaktadır. 1. Rüzgâr türbinine benzer şekilde, bu aykırı değerler de, güç eğrisinin sağ ve sol tarafında bulunan normal eğrilik etrafında rastgele dağılmış, süreksiz ve tahmin edilemez tipte anormal verilerdir. Bu tip anormal verileri üreten nedenler arasında sensör arızası, sensör gürültüsü ve bazı kontrolsüz rastlantısal faktörler bulunduğu belirtilmiştir.



Şekil 4.5. 2. Rüzgâr türbininin ham güç eğrisi

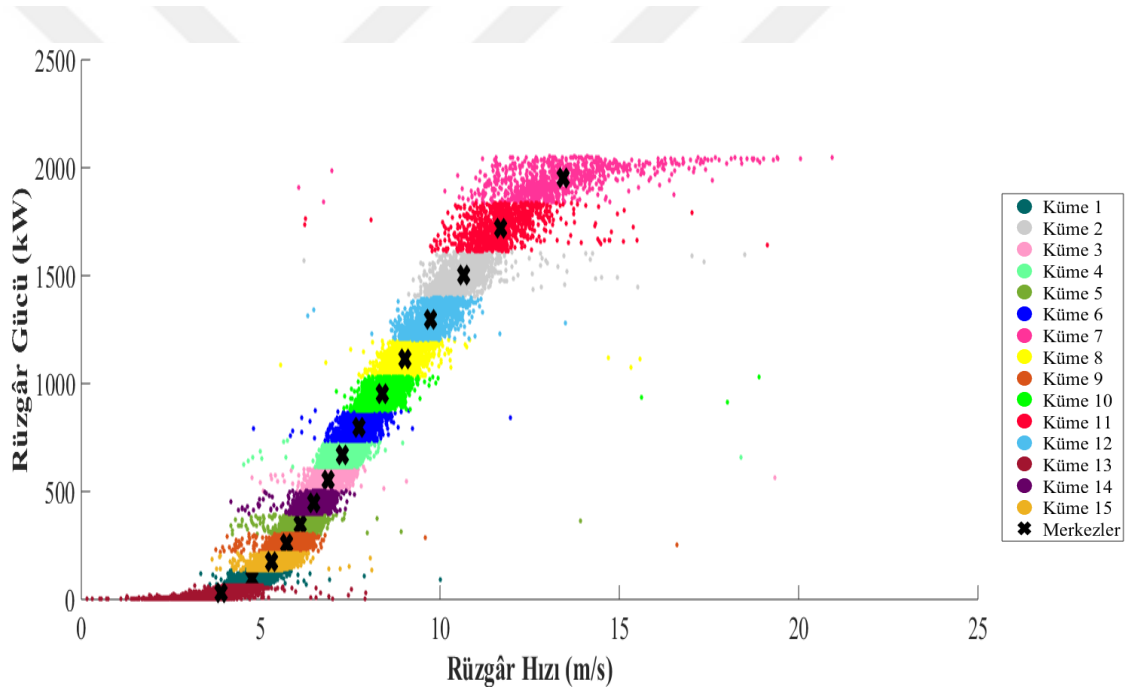
### 4.2.1. 2. Rüzgâr türbini güç eğrisinin kümeleneşmesi

Bulanık c-ortalamalar algoritmasıyla bölümlene gerçekleştirilirken, işlem süresinin seçilen küme sayısından nasıl etkilendiği Tablo 4.5'de verilmiştir. Bu tabloda, saniye olarak hesaplanan süre belirtilmiştir. Örneğin; bulanık c-ortalamalar algoritması, küme sayısı 11 olarak atandığında 4,80 s'de, küme sayısı 15 olarak atandığında 6,50 s'de ve küme sayısı 19 olarak atandığında 8,36 s'de bölümlene işlemlerini bitirmiştir. Dolayısıyla, 1. rüzgâr türbinine benzer şekilde, küme sayısındaki artışla bölümlene için daha fazla hesaplama süresine ihtiyaç duyulmuştur.

Tablo 4.5. 2. Rüzgâr türbini güç eğrisi için küme sayısına göre işlem süreleri

Küme Sayısı	9	11	13	15	17	19	21
Geçen süre(s)	3,14	4,80	5,72	6,50	7,28	8,36	9,51

Bulanık c-ortalamalar algoritması aracılığıyla 15 kümeye ayrılmış güç eğrisi Şekil 4.6’da yer almaktadır. Bu şekilde gösterildiği gibi, elde edilen her bir kümeye ait veriler farklı renklerde sunulmuştur ve “x” sembolü ile küme merkezleri belirtilmiştir. Ayrıca, her bir kümenin hangi renk ile ifade edildiği şeklin sağ tarafındaki göstergede verilmiştir. Örneğin; güç eğrisinde Küme 5’i koyu yeşil olarak renklendirilmiş bölge, Küme 8’i sarı olarak renklendirilmiş bölge ve Küme 11’i kırmızı olarak renklendirilmiş bölge ifade etmektedir.



Şekil 4.6. 2. Rüzgâr türbininin kümelenmiş güç eğrisi

Bölümlenmiş güç eğrisindeki küme merkezlerine ait rüzgâr hızı ve rüzgâr gücü değerleri Tablo 4.6’da verilmiştir. Bu tabloda gösterildiği gibi, örneğin; 5. kümenin merkezini ifade eden veri noktası (6,113212 m/s, 346,4796 kW) iken, 8. kümenin merkezini ifade eden veri noktası (9,015592 m/s, 1114,625 kW)’dır. 11. kümenin merkezi ise (11,68123 m/s, 1722,083 kW) ile ifade edilen veri noktasıdır. Ayrıca, bulanık c-ortalamalar algoritması aracılığıyla yürütülen iterasyonlar sonucunda amaç fonksiyonunun minimum değeri  $2,911 \times 10^7$  olarak bulunmuştur.

Tablo 4.6. 2. Rüzgâr türbini güç eğrisi için küme merkezleri

Küme No	Rüzgâr Hızı (m/s)	Rüzgâr Gücü (kW)
1	4,760974	99,15208
2	10,6623	1500,086
3	6,873752	554,0571
4	7,276291	671,5565
5	6,113212	346,4796
6	7,748875	799,3049
7	13,43915	1951,164
8	9,015592	1114,625
9	5,729626	255,7529
10	8,384745	951,1403
11	11,68123	1722,083
12	9,746695	1295,811
13	3,899567	32,06265
14	6,48462	447,3835
15	5,300875	174,4766

1. kümede bulunan 5971 veri noktasından ilk 30'unun 1. kümeye üye olma dereceleri Tablo 4.7'de verilmiştir. Örneğin; (5,03 m/s, 113,42 kW) ile temsil edilen 4 nolu veri noktasının 1. kümeye ait olma derecesi 0,88 iken, (5,16 m/s, 121,07 kW) ile temsil edilen 5 nolu veri noktasının aynı kümeye ait olma derecesi 0,99'dur. 6 nolu (5,19 m/s, 120,05 kW) veri noktasının üyelik derecesi ise 0,97'dir. Dolayısıyla, 4 nolu ve 6 nolu veri noktalarının 1. kümeye ait olma olasılıkları, 5 nolu veri noktasına göre daha düşüktür.

Tablo 4.7. 2. Rüzgâr türbini için 1. kümedeki elemanların üyelik dereceleri

Veri No	Rüzgâr Hızı (m/s)	Rüzgâr Gücü (kW)	Üyelik Dereceleri
1	4,77	110,02	0,46
2	4,73	115,25	0,94
3	4,96	110,89	0,98
4	5,03	113,42	0,88
5	5,16	121,07	0,99
6	5,19	120,05	0,97
7	4,66	85,78	0,92
8	4,32	66,42	0,80
9	4,74	110,22	0,62

Tablo 4.7. 2. Rüzgâr türbini için 1. kümedeki elemanların üyelik dereceleri (Devam)

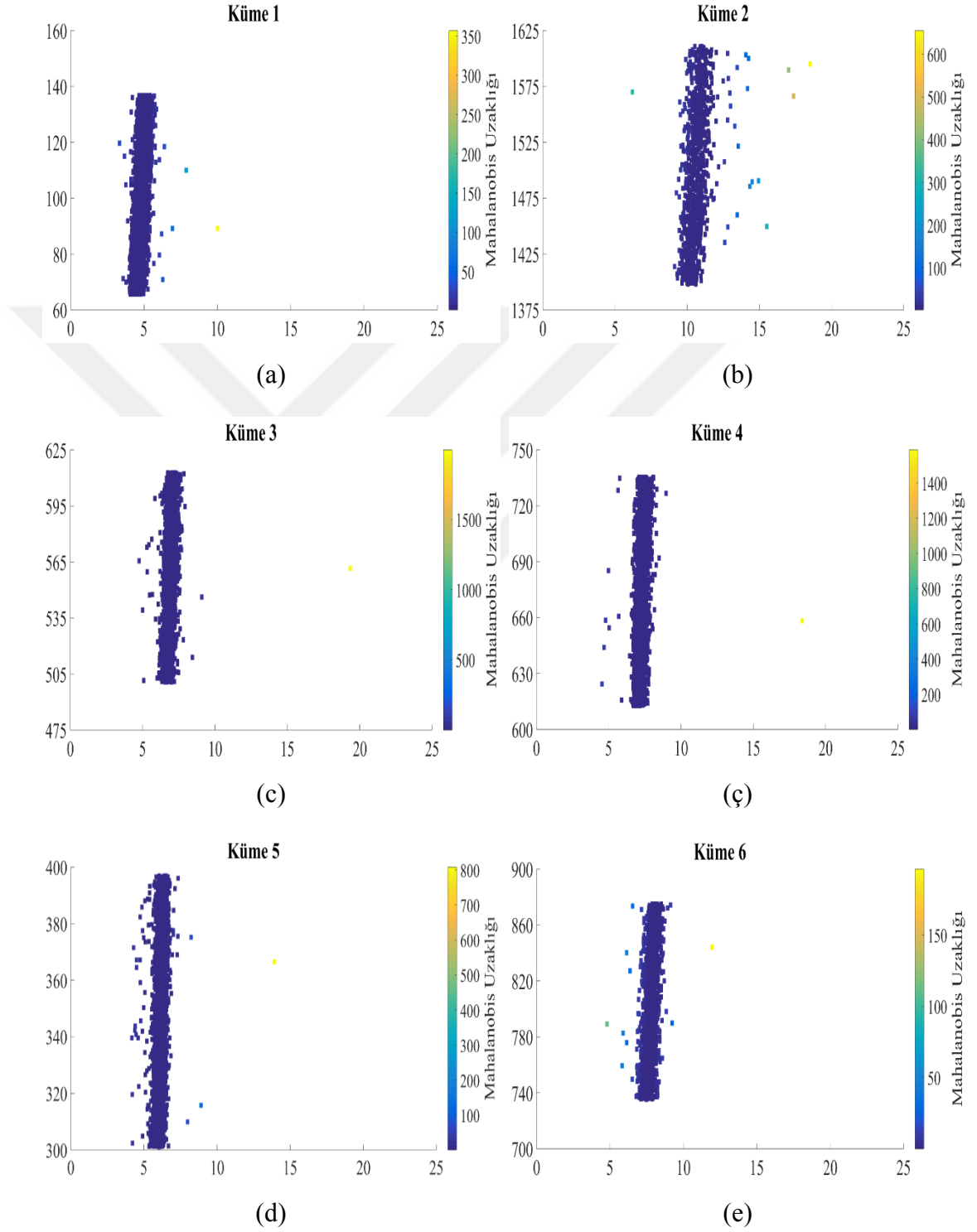
Veri No	Rüzgâr Hızı (m/s)	Rüzgâr Gücü (kW)	Üyelik Dereceleri
10	4,98	100,41	0,93
11	4,87	88,86	0,97
12	4,53	78,28	0,86
13	4,72	77,09	0,90
14	4,87	75,81	0,97
15	4,68	109,48	0,78
16	4,77	88,91	0,45
17	4,89	88,92	0,96
18	4,93	117,11	0,80
19	4,81	112,24	0,96
20	5,1	100,75	0,91
21	5,15	121,08	0,48
22	4,99	109,97	0,46
23	4,43	71,66	0,71
24	4,95	96,52	0,99
25	4,48	79,94	0,95
26	4,71	86,54	0,44
27	4,5	110,47	0,52
28	4,89	129,21	0,99
29	4,09	81,21	0,99
30	4,88	134,08	0,89

#### 4.2.2. 2. Rüzgâr türbini güç eğrisindeki aykırı değerlerin tespiti

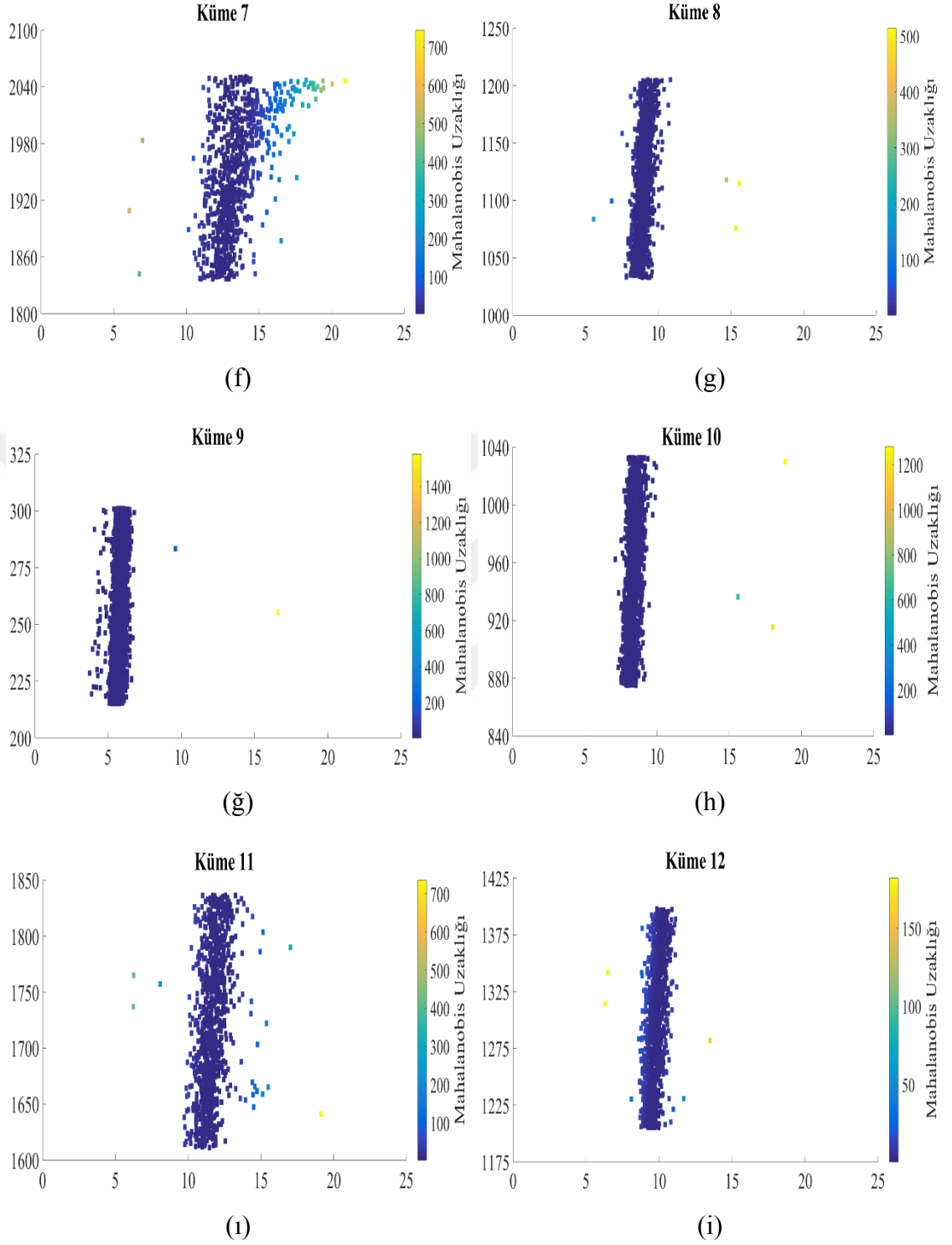
Bulanık c-ortalamalar algoritması aracılığıyla elde edilen 15 farklı güç eğrisi kümesinin Mahalanobis uzaklıkları Şekil 4.7’de yer almaktadır. Söz konusu her bir şekilde, yatay eksen m/s cinsinden rüzgâr hızını ve dikey eksen kW cinsinden rüzgâr gücünü ifade etmektedir. Ayrıca, hesaplanan Mahalanobis uzaklıklarına göre her bir kümedeki veri noktaları renklendirilmiş ve bu renklerin denk geldiği Mahalanobis değerleri şeklin sağ tarafındaki göstergede verilmiştir. Her bir kümede, Mahalanobis uzaklık değeri en küçük olan ve merkeze en yakın olan elemanlar koyu mavi olarak renklendirilirken, Mahalanobis değeri en yüksek olan ve merkeze en uzak olan yani anormal değerler açık sarı olarak renklendirilmiştir. Örneğin; 4. küme, 5. küme ve 6. küme için grafiğin sağ



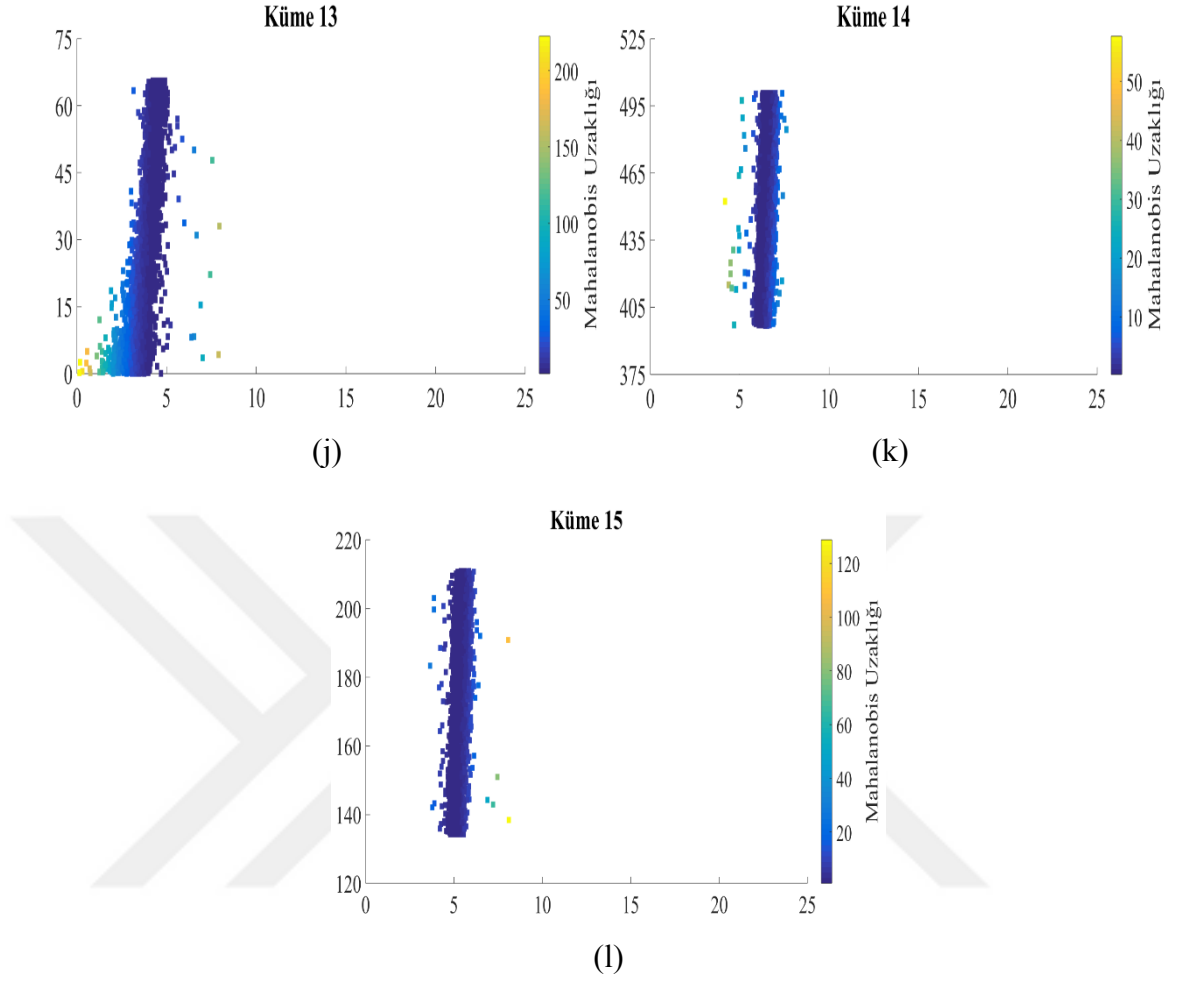
tarafında yer alan ve açık sarı renklendirme ile temsil edilen veri noktaları potansiyel anormal değerlerdir.



Şekil 4.7. 2. Rüzgâr türbini güç eğrisindeki kümelerin Mahalanobis uzaklıkları



Şekil 4.7. 2. Rüzgâr türbini güç eğrisindeki kümelerin Mahalanobis uzaklıkları (Devam)

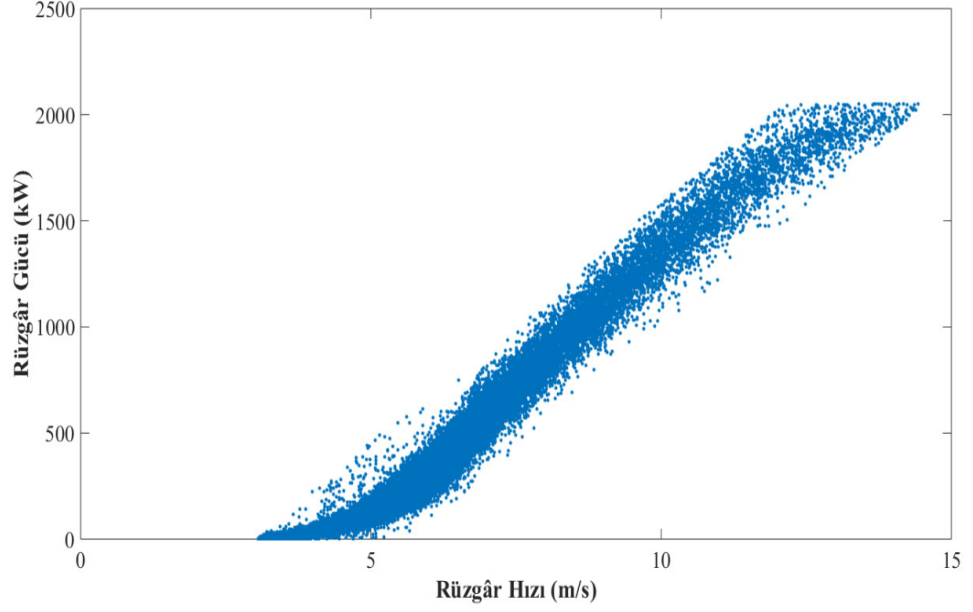


Şekil 4.7. 2. Rüzgâr türbini güç eğrisindeki kümelerin Mahalanobis uzaklıkları (Devam)

#### 4.2.3. 2. Rüzgâr türbini güç eğrisindeki aykırı değerlerin temizlenmesi

Aykırı değerlerin tespitinde Mahalanobis uzaklığı için eşik değer 22,628 olarak atanmış ve elde edilen temizlenmiş güç eğrisi Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Buna ilaveten, Tablo 4.8’de aykırı verilerin sayısı ve aykırı verilerin yüzdesi her bir küme için ayrıntılı olarak verilmiştir. Örneğin, toplamda 862 adet veri içeren 7. küme için aykırı değerlerin sayısı 259 olarak belirlenmiş ve bu aykırı değer sayısı söz konusu kümenin %30,05’ini oluşturmaktadır. Benzer şekilde, toplamda 1001 adet veri içeren 12. küme için aykırı değerlerin sayısı 86 olarak belirlenmiş ve bu aykırı değer sayısı söz konusu kümenin %8,59’unu oluşturmaktadır. Sonuç olarak, toplamda 41728 adet veri içeren rüzgâr türbini güç eğrisinde %2,05’lik oranla toplamda 856 adet aykırı değer belirlenmiş ve temizlenmiştir. Şekil 4.8’de gösterildiği gibi, güç eğrisi kayıtları başlıca istatistiksel karakteristiklerini korurken, aykırı değerler verimli bir şekilde silinmiştir. Ayrıca, 1.

rüzgâr türbinine benzer şekilde, 2. rüzgâr türbini için de rüzgâr türbini arızası, plansız bakım, rüzgâr kesintisi, sensör arızası, sensör gürültüsü ve bazı kontrolsüz rastlantısal faktörler ilgili aykırı değerlerin nedenleri olarak görülebilir.



Şekil 4.8. 2. Rüzgâr türbini için temizlenmiş güç eğrisi

Tablo 4.8. 2. Rüzgâr türbini güç eğrisi için aykırı veri sayıları ve yüzdeleri

Küme No	Toplam Veri Sayısı	Aykırı Veri Sayısı	Aykırı Veri Yüzdesi
Küme 1	5971	8	%0,13
Küme 2	1043	36	%3,45
Küme 3	2632	9	%0,34
Küme 4	2196	10	%0,46
Küme 5	3749	15	%0,40
Küme 6	1765	9	%0,51
Küme 7	862	259	%30,05
Küme 8	1341	8	%0,60
Küme 9	4374	6	%0,14
Küme 10	5035	8	%0,16
Küme 11	1551	4	%0,26
Küme 12	1001	86	%8,59
Küme 13	1173	9	%0,77
Küme 14	5777	379	%6,56
Küme 15	3258	10	%0,31

## 5. BÖLÜM

### SONUÇLAR

Rüzgâr türbini güç eğrilerindeki aykırı değerlerin ve bunlara neden olan faktörlerin tespit edilmediği durumlarda, rüzgâr türbinlerinin verimli çalışmadığı gözlemlenir. Rüzgâr türbini güç eğrisi kullanılarak türbin çıkış gücü değerlendirilebilir fakat aykırı değerler içeren bir rüzgâr türbini güç eğrisi, tahmin edilen çıkış gücünün doğruluğunu azaltır. Bu durum, güç sisteminde elektrik kesintilerine, rüzgâr türbininde arızalara ve onarım işlemleri için yüksek maliyetlere sebep olabilmektedir. Dolayısıyla, rüzgâr türbini güç eğrilerinde aykırı verilerin doğru bir şekilde analiz edilmesi, ortaya çıkabilecek sorunların önceden tanımlanmasına, ekipmanların doğru zamanda onarılmasına ve rüzgâr türbinlerinin performansının iyileştirilmesine yardımcı olur.

Bu tez çalışmasında, rüzgâr türbini güç eğrilerindeki aykırı değerleri etkin olarak tespit amacıyla ham güç eğrilerinin kümelenmesi, kümelenmiş ham güç eğrileri için Mahalanobis uzaklıklarının hesaplanması ve belirlenen eşik Mahalanobis uzaklık değerlerine göre ham güç eğrilerinin temizlenmesi aşamaları uygulanmıştır. Ayrıca, uygulanan aykırı değer tespit yaklaşımının performansı, farklı rüzgâr türbinleri açısından mevsimsel etkileri içeren veri setlerinden yararlanılarak değerlendirilmiştir.

Ham güç eğrilerinin kümelenmesi aşamasında, klasik kümeleme yöntemleri yerine bulanık c-ortalamalar algoritması çalıştırılarak veri noktalarının birden fazla kümeye ait olma durumları analiz edilmiş ve daha verimli bölümlenme gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda, güç eğrisindeki veri noktalarını aynı merkeze sahip tek bir küme olarak değerlendirmek yerine farklı merkezlere sahip 15 kümeye bölünmüş ve aykırı değerler daha detaylı analiz edilmiştir. Rüzgâr türbinlerine ait ham güç eğrileri, sırasıyla, 6,65 s'de ve 6,50 s'de kümelenmiş ve amaç fonksiyonlarının minimum değerleri  $3,087 \times 10^7$  ve  $2,911 \times 10^7$  olarak bulunmuştur.

Kümelenmiş ham güç eğrilerindeki aykırı değerlerin belirlenmesi aşamasında, tek değişkenli aykırı değer tespit yöntemleri yerine Mahalanobis uzaklıkları hesaplanarak

potansiyel aykırı değerler çok değişkenli olarak analiz edilmiştir. Bu sayede, ham verilerin ortalamadan değişkenlikleri standart sapma açısından değerlendirilmiş ve aykırılık potansiyellerine göre detaylı renklendirme yapılmıştır. Ham güç eğrilerinin temizlenmesi aşamasında ise, Mahalanobis uzaklıkları için iki farklı eşik değer kullanılmıştır. Böylece, rüzgâr türbinlerine ait ham güç eğrilerinden, sırasıyla, %2,32'lik oranla toplamda 986 adet aykırı değer ve %2,05'lik oranla toplamda 856 adet aykırı değer doğru bir şekilde kaldırılmıştır.

Sonuç olarak, uygulanan aykırı değer tespit yaklaşımı, farklı rüzgâr türbinleri açısından güvenilir, etkin ve iyi bir performans sergilemiştir. Uygulanan yaklaşımın, rüzgâr türbinlerinde normal çalışma koşullarındaki gerçek güç eğrilerinin modellenmesi, rüzgâr türbini seçimi, türbin çıkış gücünün tahmini, durum izleme ve sorun gidermede, ayrıca tahmine dayalı kontrol süreçlerinde faydalı olacağı öngörülmektedir. Gelecek çalışmalarda, daha detaylı aykırı değer analizi için farklı bölgelerdeki farklı rüzgâr türbinlerine ait daha fazla güç eğrisi verisi dâhil edilmelidir. Ayrıca, sonuçların optimizasyonu için farklı kümeleme yöntemleriyle birlikte farklı aykırı değer tespit yaklaşımları analiz edilmelidir.

## KAYNAKÇA

1. Koç, E., Kaya, K., “Enerji kaynakları-Yenilenebilir enerji durumu”, *Mühendis ve Makina*, 56(668), 36-47, 2015.
2. Arslan, A. E., “Yenilenebilir enerji kaynakları kullanımında çevresel motivasyonlar ve ahlaki normun rolü: Bilecik örneği”, *Alanya Akademik Bakış*, 6(3), 2775-2808, 2022.
3. Tong, W., *Fundamentals of Wind Energy*, WIT Press, s. 112, İngiltere, 2010.
4. Saidur, R., Rahim, N. A., Islam, M. R., Solangi, K. H., “Environmental impact of wind energy”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2423-2430, 2011.
5. Liang, G., Su, Y., Chen, F., Long, H., Song, Z., Gan, Y., “Wind power curve data cleaning by image thresholding based on class uncertainty and shape dissimilarity”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 12(2), 1383-1393, 2021.
6. Luo, Z., Fang, C., Liu, C., Liu, S., “Method for cleaning abnormal data of wind turbine power curve based on density clustering and boundary extraction”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 13(2), 1147-1159, 2022.
7. Sun, Z., Sun, H., “Stacked denoising autoencoder with density-grid based clustering method for detecting outlier of wind turbine components”, *IEEE Access*, 7, 13078-13091, 2019.
8. Wang, Z., Wang, L., Huang, C., “A fast abnormal data cleaning algorithm for performance evaluation of wind turbine”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 5006512, 2020.
9. Shen, X., Fu, X., Zhou, C., “A combined algorithm for cleaning abnormal data of wind turbine power curve based on change point grouping algorithm and quartile algorithm”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 10(1), 46-54, 2019.
10. Wang, Y., Infield, D. G., Stephen, B., Galloway, S. J., “Copula-based model for wind turbine power curve outlier rejection”, *Wind Energy*, 17(11), 1677-1688, 2013.
11. Yan, J., Zhang, H., Liu, Y., Han S., Li, L., “Uncertainty estimation for wind energy conversion by probabilistic wind turbine power curve modelling”, *Applied Energy*, 239, 1356-1370, 2019.
12. Wang, S., Huang, Y., Li, L., Liu, C., “Wind turbines abnormality detection through analysis of wind farm power curves”, *Measurement*, 93, 178-188, 2016.

13. Jing, B., Qian, Z., Zareipour, H., Pei, Y., Wang, A., “Wind turbine power curve modelling with logistic functions based on quantile regression”, *Applied Sciences*, 11(7), 3048, 2021.
14. Morrison, R., Liu, X., Lin, Z., “Anomaly detection in wind turbine SCADA data for power curve cleaning”, *Renewable Energy*, 184, 473-486, 2022.
15. Lin, Z., Liu, Z., Collu, M., “Wind power prediction based on high-frequency SCADA data along with isolation forest and deep learning neural networks”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 118, 105835, 2020.
16. Ye, X., Lu, Z., Qiao, Y., Min, Y., O'Malley, M., “Identification and correction of outliers in wind farm time series power data”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(6), 4197-4205, 2016.
17. Zhao, Y., Ye, L., Wang, W., Sun, H., Ju, Y., Tang, Y., “Data-driven correction approach to refine power curve of wind farm under wind curtailment”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 9(1), 95-105, 2018.
18. Manobel, B., Sehnke, F., Lazzús, J. A., Salfate, I., Felder, M., Montecinos, S., “Wind turbine power curve modeling based on Gaussian processes and artificial neural networks”, *Renewable Energy*, 125, 1015-1020, 2018.
19. Paiva, L. T., Rodrigues, C. V., Palma, J. M. L. M., “Determining wind turbine power curves based on operating conditions”, *Wind Energy*, 17(10), 1563-1575, 2014.
20. Taslimi-Renani, E., Modiri-Delshad, M., Elias, M. F. M., Rahim, N. A., “Development of an enhanced parametric model for wind turbine power curve”, *Applied Energy*, 177, 544-552, 2016.
21. Zhang, W., Lin, Z., Liu, Z., “Short-term offshore wind power forecasting - A hybrid model based on discrete wavelet transform (DWT), seasonal autoregressive integrated moving average (SARIMA), and deep-learning-based long short-term memory (LSTM)”, *Renewable Energy*, 185, 611-628, 2022.
22. Sun, P., Li, J., Yan, Y., Lei, X., Zhang, X., “Wind turbine anomaly detection using normal behavior models based on SCADA data”, *International Conference on High Voltage Engineering and Application*, s. 1-4, Poznan, 2014.
23. Khazaei, S., Ehsan, M., Soleymani, S., Mohammadnezhad-Shourkaei, H., “A high-accuracy hybrid method for short-term wind power forecasting”, *Energy*, 238, 122020, 2022.



24. Han, B., Xie, H., Shan, Y., Liu, R., Cao, S., “Characteristic curve fitting method of wind speed and wind turbine output based on abnormal data cleaning”, *Journal of Physics: Conference Series*, 2185, 012085, 2022.
25. Guo, Z., Xiao, X., “Wind power assessment based on a WRF wind simulation with developed power curve modeling methods”, *Abstract and Applied Analysis*, 2014, 941648, 1-15, 2014.
26. Hernandez, W., Méndez, A., Maldonado-Correa, J. L., Balleteros, F., “Modeling of a robust confidence band for the power curve of a wind turbine”, *Sensors*, 16(12), 2080, 2016.
27. Bekar, N., “Yenilenebilir enerji kaynakları açısından Türkiye’nin enerji jeopolitiği”, *Türkiye Siyaset Bilimi Dergisi*, 3(1), 37-54, 2020.
28. Yılmaz, M., “Türkiye’nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi açısından önemi”, *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4 (2), 33-54, 2012.
29. Selici, T., Utlu, Z., İlten, N., “Enerji kullanımının çevresel etkileri ve sürdürülebilir gelişme açısından değerlendirilmesi”, *Academia*, 2005.
30. Satman, A., “Türkiye’nin fosil kaynakları (petrol, doğal gaz ve kömür) ve değerlendirme potansiyeli” *Journal of Strategic Studies*, 9(16), 2011.
31. Ürün, E., Soyu, E., “Türkiye’nin enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynakları üzerine bir değerlendirme”, *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 31-45, 2016.
32. Oflaz, A., E., Yeşilbudak, M., “Comparison of Outlier Detection Approaches for Wind Turbine Power Curves”, *10th International Conference on Smart Grid*, s. 363-367, İstanbul, 2022.
33. Acaroğlu, M., Alternatif Enerji Kaynakları, *Nobel Akademik Yayıncılık*, s. 231-239, İstanbul, 2013.
34. Yerebakan, M., Rüzgâr Enerjisi, *İstanbul Ticaret Odası*, s. 1-76 İstanbul, 2001.
35. Şenel, M., C., Koç, E., “Dünyada ve Türkiye’de rüzgâr enerjisi durumu-Genel değerlendirme”, *Mühendis ve Makina*, 56 (663), 46-56, 2015.
36. Ayar, B., Yalçın, Z. G., Dag, M., “Rüzgârı hasat etmek: Türkiye’de rüzgâr enerjisinin fizibilitesi ve gelişmeleri üzerine bir araştırma”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 49, 2023.

37. Şen, Z., Temiz Enerji Kaynakları ve Modelleme İlkeleri, *Su Vakfı Yayınları*, s. 95-140, İstanbul, 2009.
38. Dokur, E., “Enerji sistemlerinde rüzgâr hızı modellemesi için geliştirilen Finsler geometrisi tabanlı yeni bir yaklaşım analizi ve uygulaması”, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, s. 8-10, Bilecik, 2017.
39. Öztürk, H. H., Yenilenebilir Enerji Kaynakları, *Birsen Yayınevi*, s. 210-239, İstanbul, 2013.
40. Uslu, A., F., “Rüzgâr türbinlerinin şebekeye etkilerinin incelenmesi”, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s. 17, İstanbul, 2019.
41. Carlin, P. W., Laxson, A. S., Muljadi, E. B., “The history and state of the art of variable-speed wind turbine technology”, *Wind Energy, An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, 6 (2), 129-159, 2003.
42. Kaya, K., “Rüzgâr türbini kanadının mekanik tasarım esasları”, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s. 43, Samsun, 2014.
43. Ünal, A., “Küçük delta tipi Darrieus rüzgâr türbini verimine farklı düşey kanat açısı ve uç açıklıklarının etkisinin deneysel olarak araştırılması”, *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s. 15 Konya, 2021.
44. Akman, E., “Dikey eksenli bir rüzgâr türbinin kanat tasarımının deneysel ve sayısal incelenmesi”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s. 9, Sakarya, 2019.
45. Elibüyük, U., Üçgül, İ., “Rüzgâr türbinleri, çeşitleri ve rüzgâr enerjisi depolama yöntemleri” *Yekarum*, 2 (3), 2014.
46. Ergür, Ö., “Rüzgâr türbinleri ile enerji üretimi”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s. 31, Sakarya, 2006.
47. Uçmaz, M., İ., “Enerji santrallerinde maksimum güç eldesi için senkron ve asenkron generatör kullanımının karşılaştırılması”, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s. 25-28, İstanbul, 2008.
48. Sohoni, V., Gupta, S. C., Nema, R. K., “A critical review on wind turbine power curve modelling techniques and their applications in wind based energy systems”, *Journal of Energy*, 2016.

49. Wang, Y., Hu, Q., Li, L., Foley, A. M., Srinivasan, D., “Approaches to wind power curve modeling: A review and discussion”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116, 2019.
50. Huan, L., Sang, L., Wu, Z., Gu, W., “Image-based abnormal data detection and cleaning algorithm via wind power curve”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 11 (2), 938-946, 2020.
51. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Renewables 2022 Global Status Report” *Ren21*, Paris, 2022.
52. İnternet: T.C Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Rüzgâr”, <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar>.
53. İnternet: T.C Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı Dağılımı 100 Metre”, <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/bolgeler/TURKIYE-GENELI.pdf>.
54. Öztürk, K., Şahin, M., E., “Yapay sinir ağları ve yapay zekâ’ya genel bir bakış”, *Takvim-i Vekayi*, 6(2), 25-36, 2018.
55. Fetzer, J. H., What is Artificial Intelligence?, *Springer*, s. 3-27, Hollanda, 1990.
56. Elmas, Ç., Yapay Zekâ Uygulamaları, *Seçkin*, s. 25-26, Ankara, 2018.
57. Mijwel, M. M., History of Artificial Intelligence-Yapay Zekânın Tarihi, 2015.
58. Yılmaz, A., Kaya, U., Derin Öğrenme, *Kodlab Yayın Dağıtım*, s. 1-5, İstanbul, 2019.
59. Aydın, A. O., Yapay Zekâ: Bütünleşik Biliş Doğru, *İstanbul Gelişim Üniversitesi Yayınları*, s. 37, İstanbul, 2013.
60. Şen, Z., Bulanık Mantık İlkeleri Ve Modelleme, *Su Vakfı Yayınları*, s. 69-73, İstanbul, 2009.
61. Özkan, Y., Veri Madenciliği Yöntemleri, *Papatya Yayıncılık*, s. 131-148, İstanbul, 2008.
62. Tan, P. N., Steinbach, M., Kumar, V., Introduction to Data Mining, Addison-Wesley, s. 487-495, Boston, 2006.
63. Hüyüktepe, B., “Türkiye’deki illerin sosyo-ekonomik gelişmişlik göstergelerinin çok değişkenli istatistiksel yöntemlerle incelenmesi”, *Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s. 64-70, 2018.
64. Yeşilbudak, M., Kahraman, H. T., Karacan, H., “Veri madenciliğinde nesne yönelimli birleştirici hiyerarşik kümeleme modeli”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(1), 27-39, 2011.

65. Manisalı, E., “Bulanık küme kavramı ve yapı işletmesinde uygulama örnekler”, *II. Yapı İşletmesi Kongresi*, İzmir, 2000.
66. İnternet: Mathworks, “Pdist”, <https://www.mathworks.com/help/stats/pdist.html>.
67. France, S. L., Carroll, J. D., Xiong, H., “Distance metrics for high dimensional nearest neighborhood recovery: Compression and normalization”, *Information Sciences*, 184(1), 92-110, 2012.
68. Stöckl, S., Hanke, M., “Financial applications of the Mahalanobis distance”, *SSRN*, 2015.
69. Brereton, R. G., Lloyd, G. R., “Re-evaluating the role of the Mahalanobis distance measure”, *Journal of Chemometrics*, 30(4), 134-143, 2016.
70. Güler, N. G., “Bulanık kümeleme analizi ve bulanık modelleme uygulamaları”, *Muğla Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s. 56-63, Muğla, 2006.
71. Çiftçi, A., “Açık uçlu maddelerin puanlanmasında bulanık mantık yaklaşımının kullanımı: Bulanık Topsis yöntemi örneği”, *Kocaeli Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s. 15-25, Kocaeli, 2021.
72. Braga, N. C., Robotik, Mekatronik ve Yapay Zekâ, *Bileşim Yayınevi*, s. 243, İstanbul, 2005.
73. Nascimento, S., Mirkin, B., Moura P. F., “A fuzzy clustering model of data and fuzzy c-means”, *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, s. 302-307, USA, 2000.
74. Kıyak, E., Kahvecioğlu, A., “Bulanık Mantık ve uçuş kontrol problemine uygulanması”, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 1 (2), 63-72, 2003.
75. Şişeci, M., Cetişli, B., “Traverten plaka taşlarda sınıfların k-ortalamlar ve bulanık c-ortalamlar kümeleme yöntemleri ile belirlenmesi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 16 (3), 238-247, 2012.
76. Paksoy, T., Pehlivan, N. Y., Özceylan, E., *Bulanık Küme Teorisi*, Nobel Yayın, s. 8-13, Ankara, 2013.
77. Eravcı, D., B., “Bulanık mantık ile silikozisin tespit edilmesi” *Ankara Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s. 20, Ankara, 2016.
78. Öztürk, B., “Çok kriterli karar verme tekniklerinden bulanık Topsis ve bulanık analitik hiyerarşi süreci”, *Uludağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Doktora Tezi*, s. 36-40, Bursa, 2011.

79. Öztok, E., “Bulanık mantık çıkarım sistemi ile tren hızının otomatik kontrolü”, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s. 7, Eskişehir, 2010.
80. McLachlan, G. J., “Mahalanobis distance”, *Resonance*, 4(6), 20-26, 1999.
81. Özgür, S., “Bulanık-c ortalamalar kümeleme analizi ve sağlık alanında uygulanması”, *Ege Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s. 17-18, İzmir, 2017.
82. Corraera, C., Valero, C., Barreiro, P., Diago, M. P., Tardaguila, J. A., “Comparison of Fuzzy Clustering Algorithms Applied to Feature Extraction on Vineyard”, *XIV. Conference of the Spanish Association for Artificial Intelligence*, s. 6-11, Madrid, 2011.
83. İnternet: Mathworks, “Fuzzy Clustering” <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/fuzzy-clustering.html>.
84. Bezdek, J. C., “Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms”, Boston, 1981.
85. İnternet: Open Platform for French Public Data, <https://opendata-renewables.engie.com/explore/?sort=modified>.