



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**RÜZGÂR ENERJİ SANTRALİ ÜRETİM
DEĞERLERİNİN BULANIK MANTIK
YÖNTEMİ KULLANILARAK ANALİZ
EDİLMESİ**

İrem KALAYCI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim
Dalı**

Ocak-2026
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

İrem Kalaycı tarafından hazırlanan “Rüzgâr Enerji Santrali Üretim Değerlerinin Bulanık Mantık Yöntemi Kullanılarak Analiz Edilmesi” adlı tez çalışması 12/01/2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Mümtaz MUTLUER

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ali Osman ÖZKAN

.....

Üye

Prof. Dr. Muciz ÖZCAN

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İrem KALAYCI

Tarih:12/01/2026

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RÜZGÂR ENERJİ SANTRALİ ÜRETİM DEĞERLERİNİN BULANIK MANTIK YÖNTEMİ KULLANILARAK ANALİZ EDİLMESİ

İrem KALAYCI

NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ali Osman ÖZKAN

2026, 102

Jüri

Doç. Dr. Mümtaz MUTLUER
Dr. Öğr. Üyesi Ali Osman ÖZKAN
Prof. Dr. Muciz ÖZCAN

Dünyada artan enerji ihtiyacı, sürdürülebilir ve çevreye duyarlı enerji kaynaklarına olan ilgiyi giderek artırmaktadır. Bu çerçevede rüzgâr enerjisi, hem temiz bir kaynak olması hem de geniş kullanım alanı bulundurması nedeniyle önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Rüzgâr enerji santrallerinde üretilen güç, çeşitli bileşen ve şartlara bağlı olarak sürekli değişmektedir. Bu durum üretim değerlerinin doğru bir şekilde analiz edilmesini gerekli kılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, rüzgâr enerji santraline ait üretim değerleri bulanık mantık yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmada hem Mamdani hem de Sugeno tabanlı çıkarım yöntemleri değerlendirilmiş, ayrıca ANFIS (Uyarlanabilir Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi) yaklaşımıyla üretim tahminleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sürecinde, çeşitli etkin faktörlerin tahmin performansına etkisi incelenmiş ve en uygun modellerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Eğitim ve test aşamalarında k-kat çaprazlama yöntemi kullanılmıştır.

Elde edilen sonuçlar, bulanık mantık yöntemlerinin rüzgâr enerjisi üretim değerlerinin analizinde etkili bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir. Tahmin performansı üzerinde etkili olan parametrelerin etkileri değerlendirilmesiyle başarı seviyesi yüksek üretim değerlerinin tahmin edilebileceği ortaya konmuştur. Böylece sistem performansına dair daha yorumlanabilir sonuçlar elde edilmiştir. Aynı zamanda santral işletmecilerinin üretim planlaması, bakım süreçleri ve genel performans yönetimine ilişkin daha sağlıklı kararlar almasına da katkı sağlanabilir.

Anahtar Kelimeler: ANFIS, Bulanık Mantık, Mamdani Çıkarım Yöntemi, Rüzgâr Enerjisi, Sugeno Çıkarım Yöntemi, Tahmin Modellemesi, Yenilenebilir Enerji

ABSTRACT

MS THESIS

ANALYSIS OF WIND POWER PLANT PRODUCTION VALUES USING FUZZY LOGIC METHOD

İrem KALAYCI

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY THE DEGREE OF MASTER OF
SCIENCE IN ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING**

Advisor: Asst. Prof. Dr. Ali Osman ÖZKAN

2026, 102

Jury

Assoc. Prof. Dr. Mümtaz MUTLUER

Asst. Prof. Dr. Ali Osman ÖZKAN

Prof.Dr. Muciz ÖZCAN

The increasing global demand for energy has heightened interest in sustainable and environmentally friendly energy sources. In this context, wind energy has become an important research area, as it is a clean resource and offers a wide range of applications. The power generated in wind farms varies continuously depending on various components and conditions, which makes accurate analysis of production values essential.

In this thesis, the production values of a wind farm were analyzed using fuzzy logic methods. Both Mamdani and Sugeno inference approaches were evaluated, and production forecasts were also carried out using the ANFIS (Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System) method. During the analysis process, the influence of various effective factors on prediction performance was examined, with the aim of identifying the most suitable models. A k-fold cross-validation approach was used in the training and testing stages.

The obtained results indicate that fuzzy logic methods provide an effective approach for analyzing wind energy production values. By evaluating the effects of parameters influencing prediction performance, it has been demonstrated that production values can be estimated with high accuracy. In this way, more interpretable insights into system performance were achieved. Additionally, the findings may support wind farm operators in making more informed decisions regarding production planning, maintenance processes, and overall performance management.

Keywords: ANFIS, Fuzzy Logic, Mamdani Inference Method, Wind Energy, Sugeno Inference Method, Forecasting Modeling, Renewable Energy

ÖNSÖZ

Çalışmalarım süresince bilgi, sabır ve yönlendirmeleriyle bana yol gösteren değerli danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali Osman ÖZKAN'a içtenlikle teşekkür ederim. Ayrıca veri temininde ve düzenleme aşamalarında yardımcı olan Bağlar Rüzgâr Enerji Santrali yetkililerinden Sayın Tacettin Ahmet DÖNDÜREN Bey'e teşekkür ederim.

Hayatımın her anında bana yol gösteren, zor zamanlarımda destek olan ve mutluluklarımı paylaşan ailem ve neşe kaynağım canım yeğenime sevgilerimi sunuyorum. Her zaman yanımda olan aileme minnettarım.

İrem KALAYCI
KONYA-2026



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Rüzgâr Enerjisi	8
2.2. Rüzgâr Türbin Teknolojisi ve Rüzgâr Enerjisinin Elektrik Enerjisine Dönüşümü	8
2.3. Rüzgâr Türbin Teknolojisi Temel Bileşenleri	9
2.3.1. Mekanik bileşenler.....	11
2.3.2. Elektrik bileşenleri.....	15
2.3.3. Kontrol bileşenleri	16
2.4. Yapay Zekâ ve Makine Öğrenimi.....	17
2.5. Yapay Sinir Ağları ve Derin Öğrenme	18
2.6. Bulanık Mantık	19
2.7. Adaptif Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS)	21
2.8. Yapay Sinir Ağı ve Bulanık Mantık Tabanlı Modellerde Kullanılan Performans Değerlendirme Ölçütleri	22
2.8.1. Ortalama mutlak hata (MAE)	23
2.8.2. Ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) ve simetrik ortalama mutlak yüzde hata (sMAPE)	23
2.8.3. Belirleme katsayısı (R^2)	23
2.8.4. Kök ortalama kare hatası (RMSE) ve normalize edilmiş kök ortalama kare hatası (nRMSE).....	24
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	26
3.1. Çalışma Alanı ve Kullanılan Veri Kümesi	26
3.1.1. Girdi ve çıktı değişkenlerinin tanımlanması	36
3.2. Uygulama Ortamı ve Yazılım Altyapısı	36
3.3. Bulanık Mantık Yaklaşımı ile Modelleme.....	41
3.3.1. ANFIS - Sugeno tabanlı model eğitimi ve test süreci	41
3.3.2. k-kat çapraz doğrulama ve parametre ayarı	58
3.3.3. Mamdani tabanlı model süreci.....	61
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	72
4.1. ANFIS – Sugeno Tabanlı Model Eğitimi ve Test Süreci Sonuçları	72
4.2. Mamdani Tabanlı Model Süreci Sonuçları	92

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	94
5.1 Sonuçlar	94
5.2 Öneriler	96
6. KAYNAKLAR	97



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Rüzgâr enerjisinin elektrik enerjisine dönüşüm şeması	9
Şekil 2.2. Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri ana bileşenleri	10
Şekil 2.3. Bağlar rüzgâr santrali nasele inşaa aşaması	13
Şekil 2.4. Bağlar rüzgâr santrali kule inşaa aşaması	14
Şekil 2.5. Yapay zekâ, makine öğrenimi, sinir ağı ve derin öğrenme arasındaki ilişki	19
Şekil 2.6. İki giriş bir çıkışlı temel ANFIS yapısı	22
Şekil 3.1. Bağlar rüzgâr enerji santral görünümü	26
Şekil 3.2. Verilerin Minitab Statistical Software 22 programına yüklenmesi	37
Şekil 3.3. Ortalama ortam sıcaklığı ve ortalama üretilen enerji arasındaki ilişkiyi gösteren matris grafiğı	37
Şekil 3.4. Ortalama nasele pozisyonu ve ortalama üretilen enerji arasındaki ilişkiyi gösteren matris grafiğı	38
Şekil 3.5. Ortalama kanat açısı ve ortalama üretilen enerji arasındaki ilişkiyi gösteren matris grafiğı	38
Şekil 3.6. Ortalama reaktif güç ve ortalama üretilen enerji arasındaki ilişkiyi gösteren matris grafiğı	39
Şekil 3.7. Ortalama rüzgâr hızı ve ortalama üretilen enerji arasındaki ilişkiyi gösteren matris grafiğı	39
Şekil 3.8. MATLAB Bulanık Mantık Tasarım ara yüzü (Sugeno)	43
Şekil 3.9. MATLAB Bulanık Mantık Tasarım veri seti yükleme	43
Şekil 3.10. Bulanık Çıkarım Sistemi'nde modele ait üyelik fonksiyonu ve fonksiyon sayısı belirleme	44
Şekil 3.11. Bulanık Mantık Modelinin Eğitimi editöründe epok değeri ayarlama	44
Şekil 3.12. Bulanık Çıkarım Sistemi Çıkışı'ndan tahmini eğitim değeri	45
Şekil 3.13. Bulanık Çıkarım Sistemi Çıkışı'ndan tahmini test değeri	45
Şekil 3.14. MATLAB Bulanık Mantık Tasarım ara yüzü (Mamdani)	62
Şekil 3.15. Ortalama rüzgâr hızı üyelik fonksiyonlarının grafiksel gösterimi	62
Şekil 3.16. Ortalama reaktif güç üyelik fonksiyonlarının grafiksel gösterimi	63
Şekil 3.17. Ortalama kanat açısı üyelik fonksiyonlarının grafiksel gösterimi	63
Şekil 3.18. Ortalama üretilen enerji üyelik fonksiyonlarının grafiksel gösterimi	63
Şekil 3.19. Mamdani tabanlı kural fonksiyonu gösterimi (1-21)	64
Şekil 3.20. Mamdani tabanlı kural fonksiyonu gösterimi (22-27)	64
Şekil 3.21. 07.01.2024 mamdani tabanlı çıkarım yönteminden elde edilen ortalama üretilen enerji değeri	65
Şekil 3.22. 25.01.2024 tarihine ait mamdani tabanlı çıkarım yönteminden elde edilen ortalama üretilen enerji değeri	65
Şekil 3.23. 31.01.2024 tarihine ait mamdani tabanlı çıkarım yönteminden elde edilen ortalama üretilen enerji değeri	66
Şekil 3.24. 25.02.2024 tarihine ait mamdani tabanlı çıkarım yönteminden elde edilen ortalama üretilen enerji değeri	66
Şekil 3.25. 24.03.2024 tarihine ait mamdani tabanlı çıkarım yönteminden elde edilen ortalama üretilen enerji değeri	67
Şekil 3.26. 18.04.2024 tarihine ait mamdani tabanlı çıkarım yönteminden elde edilen ortalama üretilen enerji değeri	67
Şekil 3.27. 31.05.2024 tarihine ait mamdani tabanlı çıkarım yönteminden elde edilen ortalama üretilen enerji değeri	68
Şekil 3.28. 11.06.2024 tarihine ait mamdani tabanlı çıkarım yönteminden elde edilen	

ortalama üretilen enerji değeri	68
Şekil 3.29. 05.10.2024 tarihine ait mamdani tabanlı çıkarım yönteminden elde edilen	
ortalama üretilen enerji değeri	69
Şekil 3.30. 30.12.2024 tarihine ait mamdani tabanlı çıkarım yönteminden elde edilen	
ortalama üretilen enerji değeri	69



ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan veri kümesi	27
Çizelge 3.2. Çıkış değişkeni ile giriş değişkenleri arasındaki korelasyon analizi sonuçları	40
Çizelge 3.3. Sugeno tabanlı çıkarım yönteminde en ideal sonucu elde etmek için denenen eğitim-test yüzdeleri	41
Çizelge 3.4. Tüm değişkenlerin dâhil olduğu RMSE, nRMSE, R^2 ve sMAPE sonuçları (329/37)	42
Çizelge 3.5. Ortalama ortam sıcaklığı değerinin analizden çıkarıldığı RMSE, nRMSE, R^2 ve sMAPE sonuçları (329/37)	42
Çizelge 3.6. MATLAB bulanık mantık tasarımı ile tahmin edilen veriler	46
Çizelge 3.7. 10 kat çaprazlama eğitim-test ayrımı gösterimi	59
Çizelge 3.8. 10 kat çaprazlamanın her katına ait sMAPE değerleri ve ortalaması	59
Çizelge 3.9. 10 kat çaprazlamanın her katına ait R^2 değerleri ve ortalaması	60
Çizelge 3.10. 10 kat çaprazlamanın her katına ait RMSE değerleri ve ortalaması	60
Çizelge 3.11. 10 kat çaprazlamanın her katına ait nRMSE değerleri ve ortalaması	60
Çizelge 3.12. Parametrelerin verilerine ait en yüksek ve en düşük değerler	61
Çizelge 3.13. Ortalama reaktif güç ve ortalama rüzgâr hızı verilerinin modellemesine ait analiz sonuçları	70
Çizelge 3.14. Ortalama kanat açısı - ortalama reaktif güç - ortalama rüzgâr hızı verilerinin modellemesine ait analiz sonuçları	70
Çizelge 3.15. Sadece ortalama ortam sıcaklığı verisinin modellemeye dâhil edilmediği verilerinin modellemesine ait analiz sonuçları	71
Çizelge 3.16. Analiz edilen modellemelerin karşılaştırılması	71
Çizelge 4.1. 1. kat - 5. kat çaprazlamaya ait mf 5 tahmin değerleri	72
Çizelge 4.2. 6. kat - 10. kat kat çaprazlamaya ait mf 5 tahmin değerleri	81
Çizelge 4.3. 10 kat çaprazlama sonucu en ideal sonuç veren üyelik fonksiyonuna ait sMAPE değerleri ve ortalaması	90
Çizelge 4.4. 10 kat çaprazlama sonucu en ideal sonuç veren üyelik fonksiyonuna ait R^2 değerleri ve ortalaması	90
Çizelge 4.5. 10 kat çaprazlama sonucu en ideal sonuç veren üyelik fonksiyonuna ait RMSE değerleri ve ortalaması	91
Çizelge 4.6. 10 kat çaprazlamanın her katına ait nRMSE değerleri ve ortalaması	91
Çizelge 4.7. Mamdani çıkarım yöntemi ile elde edilen en ideal tahmini değerler	92
Çizelge 4.8. Mamdani çıkarım yöntemi ile elde edilen en ideal tahmini değerlere ait sMAPE değerleri ve ortalaması	92
Çizelge 4.9. Mamdani çıkarım yöntemi ile elde edilen en ideal tahmini değerlere ait R^2 , RMSE, nRMSE değerleri	93

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

SİMGELER

(°C)	(Degree Celsius) Derece Celsius/Santigrat derece
(°)	(Degree) Derece
(r)	Korelasyon Katsayısı Değeri
kVAr	(Kilovolt-ampere reactive) Reaktif kilovolt-ampere
kWh	(Kilowatt-hour) Kilovat-saat
m/s	(metres per second) metre bölü saniye

KISALTMALAR

AC	(Alternating current) Alternatif Akım
ANFIS	(Adaptive neural fuzzy inference system) Uyarlanabilir Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi
DC	(Direct Current) Doğru Akım
DFIG	(Doubly-Fed Induction Generator) Çift Beslemeli Asenkron Jeneratör
FIS	(Fuzzy Inference System) Bulanık Çıkarım Sistemi
FLC	(Fuzzy Logic Controller) Bulanık Mantık Denetleyicisi
FL-P-C	(Fuzzy Logic–Proportional–Control) Bulanık Mantık–Oransal–Kontrol
GUI	(Graphical User Interface) Grafiksel Kullanıcı Arayüzü
MAE	(Mean Absolute Error) Ortalama Mutlak Hata
MAPE	(Mean Absolute Percentage Error) Ortalama Mutlak Yüzde Hata
MATLAB	(Matrix Laboratory) Matris Laboratuvarı
MENA	(The Middle East and North Africa) Orta Doğu ve Kuzey Afrika
MF	(Membership Function) Üyelik Fonksiyonu
nRMSE	(Normalized Root Mean Square Error) Normalize Edilmiş Kök Ortalama Kare Hatası
NWP	(Numerical Weather Prediction) Sayısal Hava Tahmini
PI	(Proportional–Integral) Oransal–İntegral
RMSE	(Root Mean Squared Error) Kök Ortalama Kare Hatası
R ²	(Coefficient of Determination) Belirleme Katsayısı
SCADA	(Supervisory Control and Data Acquisition) Denetim, Kontrol ve Veri Toplama Sistemi
sMAPE	(Symmetric Mean Absolute Percentage Error) Simetrik Ortalama Mutlak Yüzde Hata
WECS	(Wind Energy Conversion System) Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemi
WT	(Wind Turbine) Rüzgâr Türbini
YSA	Yapay Sinir Ağı

1. GİRİŞ

Dünya genelinde bilinçsiz şekilde fosil yakıtların yoğun bir şekilde kullanımı, çevre kirliliğinin yanı sıra küresel ısınma ve karbon ayak izinin artmasına da neden olmaktadır. Bu yaşanan negatif durumun önüne geçmek ve talep edilen enerji ihtiyacını karşılayabilmek için; yenilenebilir enerji kaynakların kullanımını artırmak ve bunu doğru ve verimli şekilde yapmak son derece önemlidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının içinde etkin bir şekilde var olan rüzgâr enerjisi, çevreye zarar vermeden elektrik üretebilme ve farklı coğrafi bölgelere ve arazilere kurulma potansiyeliyle öne çıkmaktadır.

Rüzgâr enerji santrallerinden elde edilen üretim değerlerinin değişken yapısı ve bu değişkenlerin belirsizliği, bulanık mantık yöntemlerinin kullanılmasını gerekli kılan önemli bir noktadır. Bulanık mantık tahmin yöntemlerinin kullanılması neticesinde, üretim değerlerinde görülen belirsizlikler daha gerçekçi bir şekilde ele alınabilir. Rüzgâr hızındaki değişimler, sıcaklık farkları ve diğer parametrelerin üretim üzerindeki etkileri daha doğru saptanabilir. Böylece sistem performansına dair daha yorumlanabilir sonuçlar elde edilebilir. Aynı zamanda santral işletmecilerinin üretim planlaması, bakım süreçleri ve genel performans yönetimine ilişkin daha sağlıklı kararlar almasına da katkı sağlayabilir.

Araştırmanın amacı ve önemi

Bu çalışma ile birlikte, rüzgâr enerji santrallerinde üretim değerlerinin daha doğru tahmin edilmesi için bulanık mantık yöntemlerinin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Bu kapsamda, bir yıllık ortalama rüzgâr hızının yanı sıra ortalama ortam sıcaklığı, ortalama nasele (nacelle) pozisyonu, ortalama kanat (pitch) açısı ve ortalama reaktif güç gibi parametreler kullanılarak ortalama enerji üretimi tahmin edilmiştir. Çalışmada, bulanık mantık yaklaşımı kullanılmış ve sistem performansı değerlendirilerek en etkin modeller oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlarla birlikte rüzgâr enerjisi üretim değerlerinin tahminleriyle oluşturulan model skalasına katkı sağlamak hedeflenmektedir. Rüzgâr enerji santrallerinde üretim miktarının başarılı bir şekilde tahmin edilmesi, yatırım planlarının daha sağlıklı yapılması açısından büyük önem taşımaktadır. Üretim tahminleri, santralin ekonomik yapısını etkileyen kapasite kullanım miktarının hesaplanmasına da katkı sağlar. Ayrıca, tahminlere dayalı analizler santral genişletme veya yeni yatırım planları yapılırken de göz önünde tutulabilir.

Tez çalışması genel olarak üç ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, yenilenebilir enerji kaynakları ve rüzgâr enerjisi sistemlerine ilişkin genel bilgiler

sunulmuş, literatürde yer alan benzer çalışmalar özetlenmiştir. İkinci bölümde, çalışmada kullanılan veriler, modelleme süreci ve bulanık mantık tabanlı yöntemlerin uygulanma adımları ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Son bölümde ise oluşturulan modelin sonuçları değerlendirilmiş, elde edilen bulgular tartışılmış ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Abdullayev ve arkadaşları (2023) tezlerinde, Orta Doğu ve Kuzey Afrika (MENA) bölgesinin, yüksek güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyeline sahip olmasına rağmen, fosil yakıtlara olan aşırı bağımlılığın ve enerji politikalarındaki istikrarsızlığın, yenilenebilir enerji yatırımlarının yaygınlaşmasını sınırladığı öne sürmektedir. Bu duruma rağmen Masdar City, Noor Solar Complex ve El Zait Gulf rüzgâr santrali gibi projelerin, bölgenin sürdürülebilir enerji dönüşümüne yönelik önemli adımlar olduğu da söylemektedir. Benzer şekilde, MENA'daki bazı kıyı çöl alanlarında rüzgâr enerjisi geliştirmek için önemli bir potansiyeli bulundurduğu belirtmişlerdir (Abdullayev vd., 2023).

Türkiye ise benzer şekilde rüzgâr ve güneş enerjisi açısından avantajlı bir konumda olup, özellikle dağlık bölgelerde rüzgâr enerjisi gelişimi için elverişli koşullara sahiptir. Bölgenin coğrafi çeşitliliği, çok çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılmasına olanak tanır ve bu da onu yenilenebilir kaynaklar aracılığıyla çeşitli enerji kaynakları için ideal hale getirir. Ancak yüksek kurulum maliyetleri, finansman sorunları ve mevzuat uyumsuzlukları, bu potansiyelin tam kapasiteyle kullanılmasını engelleyen temel faktörler arasında yer almaktadır (Abdullayev vd., 2023). Abdullayev ve arkadaşları tarafından ayrıntılı olarak araştırılıp, açıklanan Orta Doğu ve Kuzey Afrika (MENA) bölgesinin koşulları ve potansiyel yenilenebilir enerji özellikleri, Karipoğlu ve Denizli (2025) tarafından Türkiye temel alınarak daha da geniş bir çerçevede incelenmiştir.

MENA bölgesindeki faaliyetler ve koşullar Türkiye için yenilenebilir enerjinin kullanımında önemli bir yol haritasıdır. MENA bölgesinin bol güneş ışığı ve güçlü kıyı rüzgârlarına sahip olması ve bu coğrafi durumun kıymeti bilinerek yenilenebilir enerjinin desteklenmesi, Türkiye'nin yenilenebilir enerji açısından sunduğu koşullarla paralellik göstermektedir. Aralık 2023 itibarıyla Türkiye'nin yenilenebilir enerji kurulu gücü yaklaşık 55 gigavata ulaşmıştır. Bu enerjinin 11,5 gigavatı rüzgâr, 7,5 gigavatı ise güneş enerjisinden elde edilmektedir. Son yıllarda artan yatırımlar ve destekleyici politikalar, Türkiye'nin bu alanda önemli bir deneyim ve pazar gücü kazanmasını sağlamıştır. Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerji oranı günümüzde yaklaşık %25 düzeyindedir ve bu oranın önümüzdeki yıllarda %35'e ulaşması hedeflenmektedir (Karipoğlu ve Denizli, 2025).

Türkiye'nin 2053 net sıfır hedefinin kilit noktasını yenilenebilir enerji oluşturmaktadır. 2035 yılına kadar toplam 120.000 megavat rüzgâr ve güneş enerjisi kapasitesine ulaşılması hedeflenmektedir. Ayrıca, Türkiye'nin temiz enerji hedeflerini desteklemek amacıyla yeşil iletim altyapısına yönelik çalışmalar yürütülmektedir. Bu kapsamda, 2035 yılına kadar 5.000 megavatlık açık deniz rüzgâr enerjisi kapasitesi oluşturulması planlanmaktadır (Anadolu Ajansı, 2025). Türkiye'de rüzgâr enerjisi potansiyeli hem kara hem de deniz alanlarında yüksektir. Ancak ülkemizde henüz açık deniz rüzgâr santralleri faaliyete geçmemiştir. Bu nedenle mevcut enerji üretimi büyük ölçüde karasal santraller üzerinden gerçekleştirilmektedir.

Mohamed ve arkadaşları (2001) makalelerinde, asenkron (AC-DC-AC) bağlantılı bir kamu hizmeti etkileşimli rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemini (WECS) tanıtmışlardır. Sistemin kontrol hedefi, rüzgâr enerjisinden maksimum gücü almak ve bunu şebekeye aktarmaktır. Bu amaçla, WECS'nin izleme kontrolcüsü için bulanık mantık kontrolü (FLC) yöntemi uygulanmıştır. Tasarım süresince bir rüzgâr hızı adım modeli üzerinde çalışılmıştır. Önerilen FLC tabanlı rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminin performansı, meteorolojiden elde edilen verilerle test edilmiştir. Sistemin sağlamlığı ile verimliliği simülasyon sonuçlarıyla sunulmuştur (Mohamed vd., 2001).

Özpınar (2007) yaptığı doktora çalışmasında; rüzgâr, su ve güneş temelli temiz enerji santrallerinin analizleri için bulanık mantık metodu ve akıllı sinir ağları kullanmıştır. Bu bağlamda, 3 farklı vadede de (kısa, orta ve uzun) tahminleri yüksek duyarlılıkla analiz eden benzersiz bir model tasarlamıştır. Tasarlanan model Türkiye'nin farklı bölgelerinden alınan gerçek verilerle analiz edilmiştir. Gerçek ve tahmini değerlerin yüksek derecede uyumlu olduğu görülmüştür (Özpınar, 2007).

Odyakmaz (2008) yaptığı doktora tez çalışmasında, bölgesel ölçekte düzenlenecek rüzgâr enerjisi planlamasıyla, santraller arasındaki çeşitlilikten faydalanarak şebekeye daha istikrarlı ve kaliteli elektrik sağlanmayı hedeflemiştir. Bu kapsamda, Marmara ile Kuzey Ege kıyılarındaki bazı sahil yerleşkelerini yansıtan meteoroloji istasyonlarından alınan rüzgâr ölçüm verileri kullanılmıştır. Bu veriler üzerinden çeşitli istatistiksel analizler yapılmış ve rüzgâr eğilimlerini ortaya koymak amacıyla Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemiyle tahmin çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kurulan iki farklı yeni nesil YSA tahmin modeli sayesinde rüzgâr hızı ve yönüne ilişkin öngörüler daha hassas bir şekilde elde edilmiştir. Performansı daha yüksek olan ikinci model, Marmara ve Kuzey Ege'deki belirli istasyonlardan alınan verilerle test edilmiş ve modelin bölge verileriyle uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür (Odyakmaz, 2008).

Üstüntaş ve Şahin (2008) makalelerinde, bulanık mantık temelli yeni bir algoritmayı rüzgâr türbinlerinin güç eğrilerine uygulamıştır. Bu çalışmada gerçek değerler ile tahmin edilen değerler arasındaki RMSE (Kök Ortalama Kare Hatası) değerinin oldukça düşük olduğu saptanmıştır. Çalışmada, sekiz kümenin rüzgâr türbini güç eğrisini başarılı biçimde temsil edebileceği sonucuna varılmıştır. Bir başka ifadeyle, kümeler arasındaki komşuluk mesafesi azaltıldığında tahmin hatası (RMSE) da belirgin şekilde düşmektedir. Ayrıca önerilen yöntem, en küçük kareler polinom yaklaşımıyla karşılaştırılmış ve bulanık mantık tabanlı yöntemin, RMSE açısından polinom modele göre çok daha iyi sonuçlar verdiği ortaya konmuştur (Üstüntaş ve Şahin, 2008).

Özcan (2011) yaptığı yüksek lisans çalışmasında, Isparta ilinin mevcut rüzgâr potansiyeli meteorolojik veriler kullanmıştır. Yapay zekâ yöntemleriyle bu veriler tahmin edilmiştir. Bunun yanında örnek olarak bir rüzgâr türbini santrali için ekonomik analiz gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, 1975–2008 yılları arasında Meteoroloji İl Müdürlüğü’nden elde edilen aylık rüzgâr hızı verileri kullanılmış ve toplam 408 verinin 79’u test olarak ayarlanmıştır. Tahmin sürecinde YSA ve ANFIS yöntemleri uygulanmıştır. YSA ile yapılan modellemede tanjant-sigmoid aktivasyon fonksiyonu tercih edilmiş ve en iyi sonuçların LM12 algoritmasıyla elde edildiği görülmüştür. İki yöntem arasında yapılan istatistiksel değerlendirmede, ANFIS modelinin korelasyon katsayısının YSA modeline göre daha yüksek olduğu belirlenmiş, bu nedenle rüzgâr potansiyelinin tahmini için ANFIS yönteminin daha makul bir yaklaşım sunduğu ortaya konmuştur (Özcan, 2011).

Özcan ve arkadaşları (2014) çalışmalarında, Isparta ilinin rüzgâr kapasitesini hem Yapay Sinir Ağları hem de Uyarlanabilir Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi modelleri kullanılarak tahmin etmişlerdir. Yapay Sinir Ağ tabanlı tahminlerde Tan-sig aktivasyon fonksiyonu tercih edilmiş ve en başarılı performansın LM12 algoritması ile elde edildiği raporlanmıştır. Yapılan istatistiksel karşılaştırmalar sonucunda, Uyarlanabilir Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi modelinin R^2 değerinin Yapay Sinir Ağ tabanlı modeline kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu bulgu, rüzgâr hızı tahmininde ANFIS yaklaşımının daha etkili ve güvenilir bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur (Özcan vd., 2014).

Son yıllarda, rüzgâr türbinlerinde nominal rüzgâr hızlarında çıkış gücünü sabitlemek için kullanılan kolektif eğim açısı kontrolü yerine, bireysel eğim açısı kontrolüne geçiş eğilimi belirgin biçimde artmıştır. Ancak literatürde, bireysel eğim kontrolünde kullanılan kanat momentlerinin güç kontrol sistemine nasıl dâhil edileceğine yönelik net bir kontrolör önerisinin bulunmadığı görülmektedir. Bu nedenle Civelek ve

arkadaşları (2017), bu çalışmalarında rüzgâr türbininin çıkış gücünü sabit tutarken aynı zamanda kanat ve kule üzerindeki moment yüklerini mümkün olduğunca azaltmayı amaçlayan yeni bir bulanık mantık tabanlı oransal kontrol (FL-P-C) yöntemi önermiştir. Geliştirilen model MATLAB/Simulink ortamında doğrulanmış ve ilk uygulama sonuçları, kanat ve kule momentlerinde %33 ile %83 arasında değişen kayda değer bir iyileşme sağlandığını göstermiştir (Civelek vd., 2017).

Zheng ve arkadaşları (2017) araştırma makalelerinde, kısa vadeli rüzgâr enerjisi tahmini için ANFIS tabanlı yeni bir hiyerarşik hibrit yaklaşım önermişlerdir. Yaklaşım iki aşamalı bir yapıya sahiptir. İlk ANFIS ağı, rüzgâr çiftliğinin çevresindeki 5 km çözünürlükteki NWP meteorolojik verileri ile sahadaki ölçülen rüzgâr hızları arasındaki ilişkiyi modellemektedir. İkinci aşamada ise gerçek rüzgâr hızı ile çıkış gücü ilişkisi, SCADA kayıtları kullanılarak ikinci ANFIS ağı ile modellenmektedir. İlk aşamadan elde edilen rüzgâr hızı tahmini, ertesi gün için rüzgâr gücü tahmininde kullanılmaktadır. Önerilen yöntem, MAPE değerinin %8,1133 olması ve hesaplama süresinin 8 saniyeden kısa olmasıyla diğer üç tahmin yöntemine kıyasla daha iyi performans göstermiştir. Bu sonuçlar, yaklaşımın kısa vadeli rüzgâr enerjisi tahmini için hem yenilikçi hem de etkili olduğunu doğrulamaktadır (Zheng vd., 2017).

Şenol (2017) yaptığı çalışmada, temel olarak rüzgâr enerjisi ele almıştır. Uygulama kısmında bölgenin rüzgâr enerjisi kapasitesi yapay sinir ağları kullanılarak tahmin etmiştir. Modelde, rüzgâr hızı verilerini test aşamasında kullanmıştır. Farklı türbin tiplerine ait çıkış gücü verilerini ise eğitim aşamasında kullanmıştır. Uygulamanın ardından elde edilen regresyon sonuçları, modelin tutarlı ve güvenilir tahminler yaptığını göstermiştir. Tahminlere göre seçilen bölgenin rüzgâr potansiyelinin oldukça iyi olduğu ve uygun türbinlerle yüksek kapasiteli enerji üretiminin mümkün olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Şenol, 2017).

Aksoy (2018) yaptığı tez çalışmasında, Bursa'nın Harmanlık kazasının rüzgâr enerjisi üretim tesisinde bulunan sekiz adet türbin üzerine odaklanmıştır. Kullanılan veriler derin öğrenme yöntemleri ve makine öğrenme yaklaşımları ile analiz edilmiş ve kısa vadeli rüzgâr gücü üretim değerleri tahmin edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan temel yöntemler; Regresyon analizi ve YSA metodudur (Aksoy, 2018).

Dhunney ve arkadaşları (2019) makalelerinde, rüzgâr, güneş ve hibrit rüzgâr-güneş enerji santralleri için uygun alanları belirlemek amacıyla bulanık mantık temelli bir analitik çerçeve geliştirmişlerdir. Bu çerçevede iklim, topografya ve insan faktörleri gibi kriterler enerji optimizasyonu için değerlendirilmiştir. Geliştirilen model, karmaşık bir

topografyaya sahip Mauritius adasında uygulanmıştır. Hesaplamalar sırasında rüzgâr ve güneş enerjisi potansiyeli, saha yüksekliği, yerleşim yerleri ve şebeke hatlarına yakınlık gibi kriterler farklı bulanık üyelik kümelerine uyarlanmış, her bir kriterin memnuniyet derecesi belirlenmiş ve bunlar bir araya getirilerek genel memnuniyet değerleri elde edilmiştir (Dhunney vd., 2019).

Zamzoum ve arkadaşları (2020) makalelerinde, DFIG rüzgâr türbini sisteminin farklı bileşenlerini modellemiş ve çeşitli çalışma bölgelerindeki ana kontrol yapıları hakkında bilgi vermiştir. İkinci bölümde eğim kontrol tekniği ele alınmıştır. Bulanık mantık kontrolörünün (FLC) başlangıç parametreleri literatürden alınmış ve daha sonra optimize edilerek uyarlanabilir bir FLC oluşturulmuştur. Bu yapılandırmada, ölçekleme faktörleri bir düzeltme faktörü kullanılarak otomatik olarak ayarlanmıştır. Çalışmada, üç farklı bulanık kontrolör ile klasik PI ve kazanç zamanlanmış PI kontrolörlerinin performansları karşılaştırılmıştır. MATLAB/SIMULINK ile yapılan simülasyon sonuçları, uyarlanabilir FLC'nin hız, kararlılık ve sağlamlık açısından kanat kontrolü için en iyi çözüm olduğunu göstermektedir. Bunun yanında FLC'nin daha düşük harmoniklerle daha yüksek elektrik enerjisi üretme imkân sağladığı da görülmektedir (Zamzoum vd., 2020).

Bakırov ve Aslan (2023) çalışmalarında, 2001, 2002 ve 2003 yıllarına ait Çanakkale İli Baba Burnu bölgesindeki rüzgâr enerji potansiyelinin hesaplanması adına rüzgâr şiddeti tahminiyle alakalı bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada YSA yöntemi kullanmıştır. Bu sayede Çanakkale Baba Burnu bölgesinin rüzgâr enerjisi üretim potansiyeli hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Sonuç olarak, YSA modeli ile incelenen rüzgâr şiddeti değerleri arasındaki ilişkinin katsayısının %91 olduğu ve $\alpha=0,001$ güven düzeyinde anlamlı bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir (Bakırov ve Aslan, 2023).

Oğuz Erenler (2023) yaptığı tez çalışmasında, Enercon E-92 türbinine ait rüzgâr hızı ve rüzgâr gücü değerlerini ve Velimeşe yerleşkesinin rüzgâr hızı verilerini kullanmıştır. Bu çalışmada, rüzgâr hızı verileri kullanılarak rüzgâr gücü tahmin edilmeye çalışılmıştır. Rüzgâr gücünü tahmin etmek amacıyla tahmin modeli olarak çoğunlukla tercih edilen YSA ve Uyarlanabilir Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) yöntemlerini kullanmıştır. Yapay Sinir Ağları modeli tasarlanırken çeşitli etmenler incelenmiş ve test edilmiştir. Önce tek katmana sahip Yapay Sinir Ağları modeli tasarlanmıştır. Bu model çeşitli nöron sayıları ve çeşitli aktivasyon fonksiyonları ile çokça eğitilmiştir. Yapay Sinir Ağları ve Uyarlanabilir Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi modelleri ile tahmin edilen değerler gerçek değerlerle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak,

rüzgâr gücü tahmin değerlerinin YSA modelinden ziyade Uyarlanabilir Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) modelinde daha iyi olduğu saptanmıştır (Oğuz Erenler, 2023).

2.1. Rüzgâr Enerjisi

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgâr enerjisinin gücünün temeli güneşten gelmektedir. Güneşten dünyaya ulaşan enerjinin çok küçük bir kısmı rüzgâr enerjisine dönüşür. Güneş ışınları, yeryüzünü eşit ulaşmadığı için sıcaklık ve basınç farkları oluşur. Bu durum havanın hareket etmesine yani rüzgârın meydana gelmesine neden olur. Sıcak hava yükselirken yerini soğuk hava alır ve bu döngü sürekli bir hava akımı meydana getirir. Kısacası rüzgâr, yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına doğru hareket eden hava akımıdır. Dünya'nın dönmesi, yüzey sürtünmesi ve arazinin yapısı gibi etkenler ise rüzgârın hızını ve yönünü etkiler (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024).

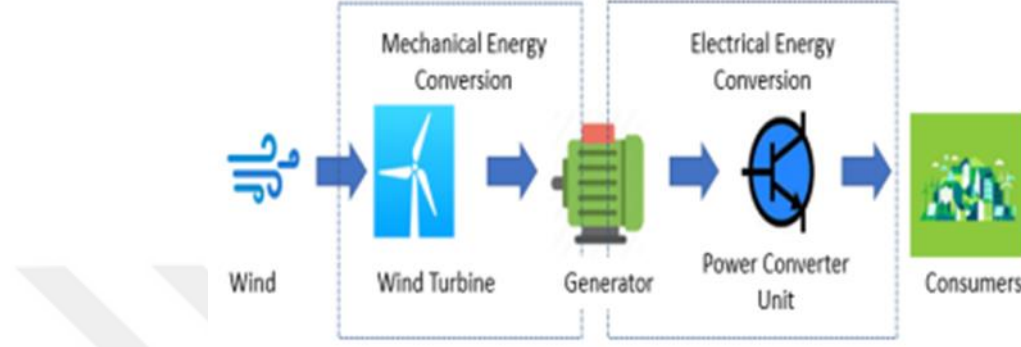
2.2. Rüzgâr Türbin Teknolojisi ve Rüzgâr Enerjisinin Elektrik Enerjisine Dönüşümü

Uçak, helikopter gibi hava araçları ve pervaneler üzerinde uygulanan çalışmalar sayesinde rüzgâr türbinlerinin tasarımı geliştirilmiştir. Bu çalışmalar neticesinde elde edilen aerodinamik ilkeleri, kuvvetler ve titreşimi sentezlemek amacıyla geliştirilen bilgisayar kodları gibi bilgiler rüzgâr türbinlerine uyarlanmıştır. Teori ve uygulama yöntemleri yeterince gelişmiş ve rüzgâr türbinleri için bilimsel adımlara gerek olmamasına rağmen kararsız aerodinamikten dolayı yük tahminlerinde problemler bulunmaktadır. Bu durum yorulmaya ve tasarım kodlarının tahmin edilenden daha az ömre sahip olmasına sebebiyet verir (Nelson, 2009).

Rüzgâr hareketiyle ortaya çıkan hava akımının kinetik enerjisi, rüzgâr türbinleri veya rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri aracılığıyla elektrik enerjisine çevrilir. Rüzgâr, rüzgâr türbininin kanatlarına çarparak kanatları döndürür ve bu sayede türbine ait ana milde bulunan jeneratör de dönmeye başlar. Yeterli dönüş hızına sahip olan jeneratör üzerinde manyetik alan oluşur. Şebeke bağlantı koşullarının sağlanmasıyla birlikte, rüzgâr türbininde elektrik üretimi gerçekleşir (Yavuz ve Özbay, 2020). Rüzgâr enerjisinden elde edilecek güç miktarı, türbinin büyüklüğüne ve kanatların uzunluğu ile ilişkilidir. Rüzgâr enerjisiyle üretilen çıkış gücü, rotor çapı ve rüzgâr hızının küpü ile

orantılıdır. Bundan dolayı rüzgâr hızındaki artış rüzgâr enerjisi potansiyelinin yaklaşık 10 kat artırılabilir (Al Mubarak ve Hamdan, 2023). Şekil 2.1’de rüzgâr enerjisinin elektrik enerjisine dönüşüm şeması gösterilmektedir.

Rüzgâr türbinleri genellikle pervane, kule, rotor, jeneratör, dişli kutusu (hız dönüştürücüleri) ve elektrik-elektronik bileşenlerini barındırır (Keleş, 2012).



Şekil 2.1. Rüzgâr enerjisinin elektrik enerjisine dönüşüm şeması (Perçin ve Çalışkan, 2021)

2.3. Rüzgâr Türbin Teknolojisi Temel Bileşenleri

Tez çalışmasında, rüzgâr enerji santralinde ortalama enerji üretimini etkileyen temel parametreler ele alınarak türbin bileşenleriyle ilişki oluşturulmaya çalışılmıştır. İncelenen değişkenler arasında ortalama ortam sıcaklığı, ortalama rüzgâr hızı, ortalama kanat açısı, ortalama nasel pozisyonu, ortalama üretilen enerji ve ortalama reaktif güç yer almaktadır. Rüzgâr hızı, kanat açısı ve nasel pozisyonu türbinin mekanik yapısıyla doğrudan bağlantılıyken; üretilen enerji ve reaktif güç elektriksel sistemle ilgilidir. Ortam sıcaklığı ise çevresel bir faktör olarak türbinin performansını dolaylı şekilde etkiler. Bu değişkenlerin birlikte değerlendirilmesi, türbinin genel çalışma koşullarını daha kapsamlı bir şekilde analiz etmeyi mümkün kılmaktadır.

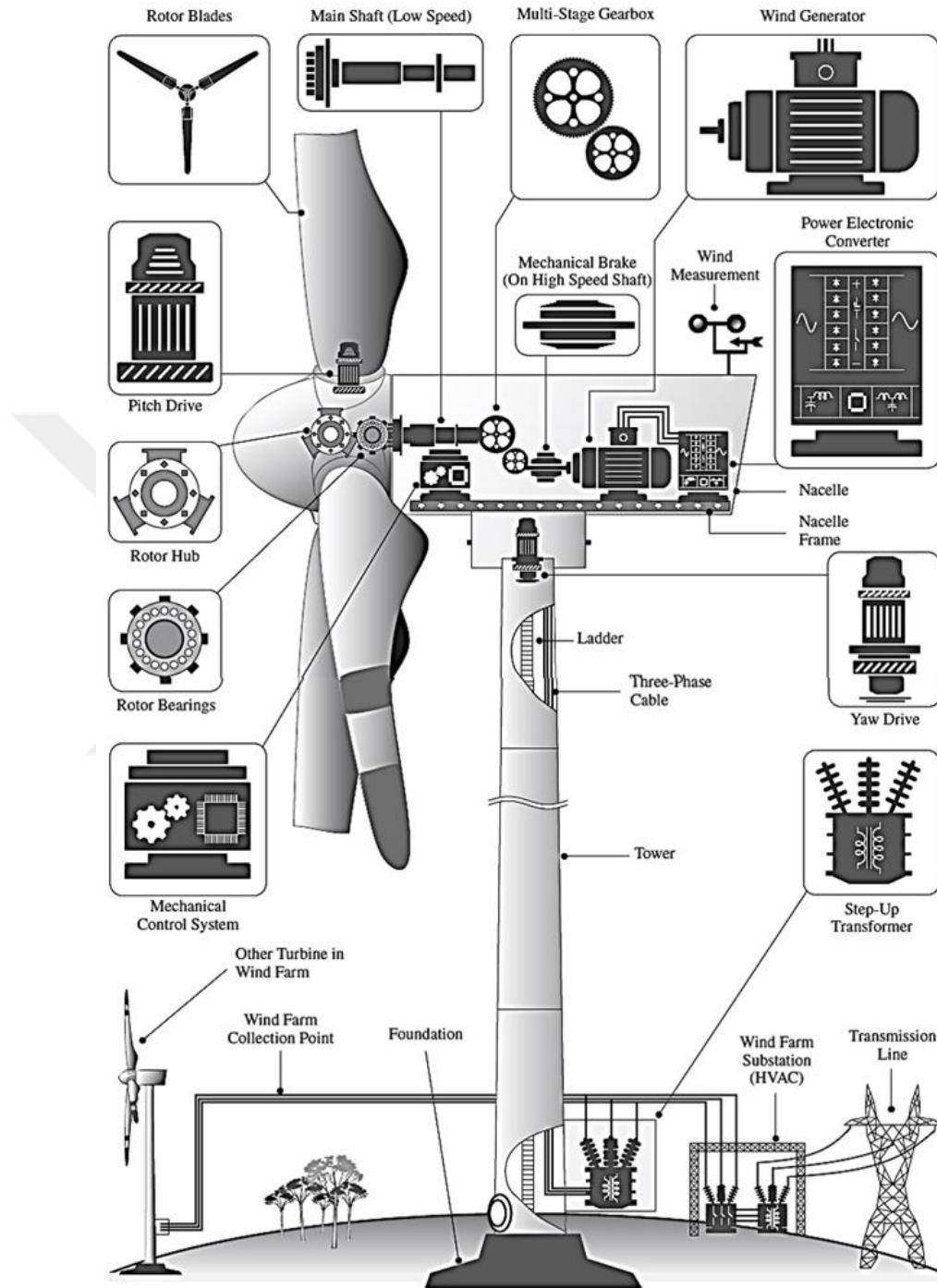
Bir rüzgâr türbininin temel elemanları genellikle üçe ayrılır (Yaramasu ve Wu, 2016):

Mekanik bileşenler: Rotor kanatları, rotor göbeği, rotor yatakları, eğim ve sapma sürücüler, ana mil, fren sistemi, hız dönüştürücü, rüzgâr ölçüm ünitesi, temel, nasel, kule, ısı değişim sistemi ve merdiveni barındırır.

Elektrik bileşenleri: Jeneratör çeşitleri, yükseltici transformatör, şebeke tarafı harmonik filtreleri, güç kabloları, şalt ve rüzgâr çiftliği toplama noktası elemanlarını barındırır.

Kontrol bileşenleri: Hem mekanik hem de elektrik ile ilgili kontrol sistemlerini barındırır.

Şekil 2.2’de rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri ana bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri ana bileşenleri (Yaramasu ve Wu, 2016)

2.3.1. Mekanik bileşenler

Rotor kanatları

Rüzgâr türbinlerinde bulunan rotor, kanatları ve kanatların birbirine bağlandığı göbeği barındırır. Rotor, ekonomik boyut ve sistem verimliliği bakımından en önemli rüzgâr türbini bileşenidir (Kazancı, 2014). Rotor kanatları, aerodinamik yapıda tasarlanır. Bu sayede rüzgar dalga enerjisinin bir bölümü tutulur ve bu enerji mekanik enerjiye dönüştürülür (Terzioğlu vd., 2019). Küçük ve orta boy türbinlerde kanat açısı sabit tutulurken, yeni nesil rüzgâr türbinlerde kontrol sistemi kullanılarak ayarlanan değişken kanat açılı rotorlar tercih edilmektedir (Kazancı, 2014).

Rotor göbeği ve rulmanlar

Rotor göbeği, rüzgâr türbininin kanatlarını ana şafta bağlayan ve aynı zamanda bu kanatları destekleyen yapısal bileşendir. Rotor göbeğinin ana hedefi, hem jeneratöre güç vermek amacıyla kanatların dönme hareketini sağlamak hem de kanatları en uygun konuma getirerek aerodinamik verimliliği artırmaktır. Rotor göbeklerinin şekli ve tasarımı, genellikle rotor kanat tasarımına ve jeneratör tipine göre değişiklik gösterir (Alipour, 2024).

Ana şaft - mekanik fren ve şanzıman

Klasik rüzgâr türbini tasarımlarında, rotor kanatlarıyla birlikte dönen ana şaft oldukça düşük bir hızda çalışır. Bu düşük hızdaki dönme hareketi, torkun bir şanzıman sayesinde hızlandırılmasıyla birkaç kutuplu jeneratörü çalıştıran ikinci bir şafta aktarılır. Bu aşamalar bölünmüş şaft sistemi olarak tanımlanır. Ana şaft üzerinde bulunan büyük disk fren, jeneratöre tork aktarımını kesmek için kullanılır. Kanat açılarının kontrolü mekanik bir düzenekle sağlanır. Bu sebeple eğim kontrolü fırtına gibi durumlarda türbinin devreden çıkarılmasına imkân tanır. Kanat eğimini ayarlayan sistem çoğunlukla yağ kullanarak çalışan hidrolik bir yapıya sahiptir ve bu nedenle düzenli bakım ile basınç kontrolü gerektirir. Dişli kutusundaki mekanik kayıplardan dolayı yağ ısındığından ayrıca soğutulması gerekir. Ana fren bulunmayan tasarımlarda ise her bir kanadın eğim açısı küçük elektrik motorlarıyla ayarlanır. Rüzgâr konvertörlerinin büyük bölümünde bu yöntem kullanılmaktadır. Ağırlığı düşürmek amacıyla kalıcı mıknatıslı jeneratörler tasarlanmıştır. Bazı üreticiler son yıllarda konvertörlerinde bu tip mıknatısları tercih

etmeye başlamıştır. Dönen eksenindeki yüksek hızlardan doğan titreşimleri azaltmak için jeneratörler çoğu zaman birden fazla kutup çiftine sahip olacak şekilde tasarlanır. Bu tasarım, jeneratör ve dişli kutusu arasında meydana gelen dönüş hızlarının azaltılmasına olanak sağlar. Bu tür konfigürasyonlarda yaşanan problem, jeneratörün hem boyutunun hem de ağırlığının kutup çifti sayısı ile beraber artış göstermesidir (Wagner, 2015).

Dişli kutusuna sahip olmayan rüzgâr türbinlerinin, duruş süresini ve bakım maliyetini azaltmak amacıyla açık deniz uygulamalarında kullanılabilir olabileceğini göstermektedir (Yaramasu ve Wu, 2016).

Eğim ve sapma tahrikleri

Rüzgâr türbinlerinde yer alan eğim kontrol sistemi önemli bileşenlerden biridir. Eğim kontrol sistemi, türbin kanatlarının eğim açısını devamlı ayarlar. Bu sayede enerji dönüşümündeki verimlilik ve güç üretimindeki kararlılık artar. Bunlara ek olarak, eğim kontrol sistemi rüzgâr hızı çok yüksek olduğunda ya da acil bir durum meydana geldiğinde türbinin güvenli şekilde durmasına olanak tanır. Şebeke elektriği kesilse bile rotor kanatları, kapasitörler, mekanik enerji depolama sistemleri veya yedek bataryalar sayesinde yatay konumlandırılabilir (Tong, 2010).

Rüzgâr türbinlerinde hem güç üretimini artırmak hem de rotor kanatları ile kule üzerinde oluşabilecek dengesiz yükleri azaltmak için, yatay eksenli türbinlerin aktif bir sapma kontrol sistemiyle rüzgâr yönüne doğru çevrilmesi gerekir. Bu işlem eğim kontrol sistemlerinde olduğu gibi, sapma kontrolü olan sistemlere benzer şekilde yani elektrikli ya da hidrolik tahrik mekanizmalarıyla gerçekleştirilebilir. Şimdilerde sapma kontrolü, genellikle elektrik motorları aracılığıyla sağlanır. Sapma kontrol sistemi; hız azaltıcı şanzımana bağlı bir elektrik motoru, rüzgâr yönünü algılayan rüzgârgülü, kuleye sabitlenen boğa dişlisi, sapma platformu ve türbin istenilen konuma geldiğinde sabit kalmasını sağlayan bir fren düzeninden meydana gelir. Büyük türbinlerde ise nasel'in ağır yapısının döndürülmesi amacıyla birden çok sapma motorunun eş zamanlı çalışması gerekebilir (Tong, 2010).

Rüzgâr ölçüm ünitesi

Rüzgâr türbinleri içerisinde, rüzgâr verilerini devamlı izlemek ve toplamak amacıyla anemometre ve rüzgârgülünden meydana gelen rüzgâr ölçüm ünitelerini barındırır (Yaramasu ve Wu, 2016).

Rüzgâr Ölçer (Anemometre) ya da ultrasonik rüzgâr sensörleri, rüzgârın hızını ölçmek ve yön - açı tespiti amacıyla sistemde bulunur. Rüzgâr ölçüm sensörlerinden gelen veriler, türbinin elektronik kontrol sistemi tarafından kullanılır ve rotorun rüzgâra doğru dönmesi, yani yönlendirme sistemi sayesinde sağlanır (Yavuz ve Özbay, 2020). Rüzgâr yönü, optoelektronik açı dönüştürücüsü ile donatılmış bir rüzgârgülü aracılığıyla ölçülür ve ölçüm üniteleri genellikle nasel bileşeninin üst arka kısmına yerleştirilir (Yaramasu ve Wu, 2016).

Nasel

Nasel, türbinin kalbidir (Olabi vd., 2021). Nasel, kulenin üst kısmına monte edilir (Durak ve Özer, 2008). Nasel bileşeninin kulenin üst kısmına yani uygun bir yüksekliğe monte edilmesi sayesinde, şiddetli rüzgarlardan kaynaklanan düzensizlikler sınırlandırılır ve rüzgâr enerjisi çok daha verimli kullanılır (Bazeos vd., 2002).

Nasel; şaft, rotor göbeği ve jeneratör gibi mekanik ve elektriksel parçaları içinde barındırır. Böylece bu bileşenler olumsuz kötü hava koşullarından korunur (Yaramasu ve Wu, 2016). Rüzgar türbini boyutuna göre nasel boyutu değişse de, bakımı kolay olduğu için genellikle küçük nasel tasarımları tercih edilir (Olabi vd., 2021). İncelenen rüzgâr türbinine ait nasel inşa aşamasına ilişkin saha görüntüsü Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Bağlar rüzgâr santrali nasel inşa aşaması

Kule ve taban

Rüzgar türbini tabanı ve kulesi, sistemin olmazsa olmaz iki ana bileşenidir (Khodabux vd., 2022). Kule, nasel ve türbin kanatları türbin işlevselliğini belirler. Nasel ve kanatlar, yerçekimine dayalı temel üstüne dikilmiş kulenin üst tarafına monte edilir. Kule, nasel ve kanat yükünü taşıyabilecek kapasitededir. Bu duruma ek olarak, kule türbinin etrafında meydana gelen rüzgâr hızlarındaki değişikliklere karşı da dayanıklıdır. Bu doğrultuda, rüzgâr türbini kulelerinin inşasındaki en önemli yapısal özelliklerin güvenilirlik ve rijitlik olduğu söylenebilir (Mishnaevsky vd., 2017).

Kule, ince duvarlı çelik silindir parçalarının çevresinden kaynak yapılarak birleştirilmesi ve cıvatarla sabitlenmesiyle oluşturulur. Bu yöntem, büyük kule bölümlerinin rüzgâr çiftliği sahasına taşınmasını ve sahada kolayca montajının yapılmasını sağlar (Bazeos ve diğerleri, 2002). Çelik, sahip olduğu özellikler nedeniyle günümüzde türbin kulelerinde en yaygın kullanılan malzemelerden biridir. Yüksek rijitliği, dayanıklılığı ve düşük maliyeti sayesinde tercih edilmektedir (Mishnaevsky vd., 2017). Bununla birlikte, çelik kulelerin büyük bölümü aşındırıcı çevre koşullarına karşı korunması ve türbinin devre dışı kalma riskinin azaltılması için boyanmak zorundadır. Bu tür bir arıza ciddi sonuçlara yol açabileceğinden, malzeme seçimi kritik öneme sahiptir. Bu nedenle son yıllarda araştırmacılar, çelik ve betonun birlikte kullanıldığı hibrit yapılar ya da cam kompozit malzemeler gibi alternatif kule tasarımlarını önermektedir (Khodabux vd., 2022). İncelenen rüzgâr türbinine ait kule inşa aşamasına ilişkin saha görüntüsü Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Bağlar rüzgâr santrali kule inşa aşaması

Çeşitli mekanik bileşenler

Güç dönüşümüne dolaylı şekilde katkı sağlayan farklı birkaç bileşen de vardır. Bu bileşenler rüzgâr türbinlerinin işletim ve bakım sürecinde ana mekanik bileşenlere yardım eder. Mekanik titreşim sönümleyicileri, hafif yük koruma sistemi, ısı eşanjör sistemi, merdiven ve servis asansörü gibi bileşenler örnek olarak verilebilir (Yaramasu ve Wu, 2016).

2.3.2. Elektrik bileşenleri

Rüzgâr jeneratörü

Jeneratör, türbin kanadının dönme hareketinden kaynaklanan mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Bu döngü türbin rotoru kanatlarının rüzgâr dalga enerjisinin bir bölümünü tutması ve tutulan bu enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürmesiyle başlar. Daha sonra üretilen düşük hıza sahip mekanik enerji hız dönüştürücü ile yüksek hıza sahip jeneratöre uygun hale getirilir ve bu enerji jeneratör vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Döngü esnasında, yüksek kutup sayısı olan bir jeneratör kullanılırsa hız dönüştürücü kullanılmayabilir (Terzioğlu vd., 2019).

Yıllar içerisinde farklı jeneratör türleri rüzgâr enerji sistemlerinde kullanılmıştır. Sincap kafesli endüksiyon jeneratörleri, sargılı rotor ve kalıcı mıknatıslı senkron jeneratörler ve çift beslemeli endüksiyon jeneratörleri rüzgâr enerji sistemlerinde kullanılan jeneratör türlerinden bazılarıdır (B. Wu vd., 2011).

Güç dönüştürücü

Rüzgâr enerji sistemi mimarisine ve uygulamaya bağlı olarak güç elektroniği üniteleri ile elektrik enerji sistemleri bir dönüştürücü yardımıyla farklı şekilde düzenlenebilir (Terzioğlu vd., 2019). Bu sayede bir dönüştürücü, her iki yönde de güç akışı sağlayabilir. Şebeke komütasyonlu ve öz-komütasyonlu olmak üzere iki farklı dönüştürücü sistemi türü bulunmaktadır (Yogesh, 2013). Günümüzde yeni kurulan rüzgâr türbinlerinde kısmi ve tam ölçekli güç dönüştürücülerine sahip değişken hızlı türbin tasarımları öne çıkmaktadır. Bu sistemlerde güç dönüştürücülerinin verimi belirleyici olduğundan, literatürde çeşitli umut vadeden dönüştürücü tipleri sunulmaktadır (Blaabjerg vd., 2010).

Yükseltici transformatör

Rüzgâr türbini transformatörü, türbin jeneratöründen alınan elektriği rüzgâr çiftliğinin toplama şebekesine uygun seviyeye yükselten bir güç transformatörüdür. Genellikle üç fazlı kuru tip ya da yağ soğutmalı olarak üretilen bu transformatörler, türbine mümkün olduğunca yakın bir konuma yerleştirilir. Uygulamaya bağlı olarak kule tabanında (iç veya dış alanda) ya da nasele bölümünde konumlandırılabilirler (Elhaminia vd., 2018).

Kolektör sistem

Rüzgâr Enerjisi Santrallerinde kolektör sistemin tasarımında temel olarak ekonomik gereklilikler ve sistemin güvenilir çalışması gözetilir. Geleneksel elektrik şebekeleriyle benzer yönleri bulunsa da, rüzgâr santrallerinin kendine özgü bazı tasarım gereksinimleri vardır. Bu kapsamda, bağlantı noktasından türbin tabanındaki şalt veya konvertör teçhizatına kadar uzanan tüm tesis bileşenleri değerlendirilir. Türbin yerleşimi, arazi koşulları, güvenilirlik hedefleri, arazi sahibi talepleri, maliyet ve bölgenin iklim özellikleri gibi etkenler, toplama sistemi ya da besleyici topolojisinin nasıl şekilleneceğini belirler (Camm vd., 2009).

Rüzgâr çiftliği toplama noktası

Çoğu ülkede büyük rüzgâr çiftlikleri oluşturulmaktadır. Bu rüzgâr çiftlikleri şebekelere kayda değer bir güç katkısı verebilir. Bundan dolayı güç kalitesi ve güç sistemlerinin kontrolünde de rüzgâr çiftlikleri önemli bir konuma gelebilir. Neticede, bu üretim ünitelerinin frekans ve voltaj kontrolü, aktif - reaktif güç ayarlanması ve güç sisteminin geçici ve dinamik hâllerine hızlı tepki verebilmesi gibi yüksek teknik gereksinimleri karşılaması hedeflenmektedir. Genel tasarım ve çalışma düzeni, rüzgâr çiftliğinde yer alan tüm rüzgâr türbinlerinin hızında bile değişikliğe neden olabilir (Yogesh, 2013).

2.3.3. Kontrol bileşenleri

Mekanik ve elektrik kontrol sistemleri

Rüzgâr türbininde makinenin çalışması ve güç üretimi kontrol sistemi açısından çok önemlidir. Bir rüzgâr türbini kontrol sistemi; hız, konum, akış, sıcaklık, akım ve

voltaj gibi büyüklükleri ölçen sensörleri, mekanik mekanizmalar ve elektrik devrelerinden oluşan kontrolörleri, anahtarlar, elektrik amplifikatörleri, hidrolik pompalar ve vanalar gibi güç amplifikatörlerini, motorlar, pistonlar, mıknatıslar ve solenoidlerden oluşan aktüatörleri ile bilgisayarlar ve mikroişlemcilerden oluşan zekâ bileşenlerini kapsamaktadır. Rüzgâr türbini kontrolü, üç temel hedefi gözeterek gerçekleştirilir. İlk olarak, tahrik zincirinde ortaya çıkan tork ve güç değerlerinin belirlenen sınırları aşmaması sağlanır. İkinci olarak, rüzgâr yönü, hızı (ani rüzgâr değişimleri dâhil) ve hava burgacı gibi değişken koşulların yanı sıra türbinin başlatma ve durdurma döngüleri dikkate alınarak, rotor tahrik zinciri ile diğer yapısal bileşenlerin ömrü uzatılmaya çalışılır. Son olarak ise, sistemin verimli çalışması için enerji üretiminin en yüksek düzeye çıkarılması amaçlanır (Manwell vd., 2010).

2.4. Yapay Zekâ ve Makine Öğrenimi

Yapay zekânın ana yapısı insana ait düşünme ve problem çözümü becerisini taklit ederek yeniden modelleme üzerine kuruludur. Bunu bilgisayarlar aracılığıyla sağlamaya çalışır. Böylece insan zekâsına ihtiyaç duyularak gerçekleştirilen bu davranışların makinelerle de mümkün hale gelmesi amaçlanır (Pirim, 2006).

Makine öğrenimi yapay zekâ kavramının bir alt dalıdır. Veri odaklı analizlerle desteklenen uyarlanabilir modeller kullanılır ve bilgisayar desteğiyle algoritmalar geliştirir (Bakan ve Kanbay, 2024; Beyan ve Browman, 2020). Başarım gücünü daha iyi hale getirmek veya isabetli tahminlerde bulunmak amacıyla deneyimden faydalanan algoritmik yöntemler, makine öğrenimi adı ile genel olarak tanımlanabilir. Bahsedilen deneyim, öğrencilerin ulaşıp edinebildiği geçmiş bilgilerdir. Çoğu zaman tahlil etmek amacıyla kullanıma açılan elektronik veriler topluluğu şeklindedir. Bunlar dijital hale getirilmiş, etiketlenmiş eğitim kümeleri veya dış etmenlerle karşılıklı etki ile sağlanan diğer bilgi çeşitleri biçimde olabilir (Mohri vd., 2018).

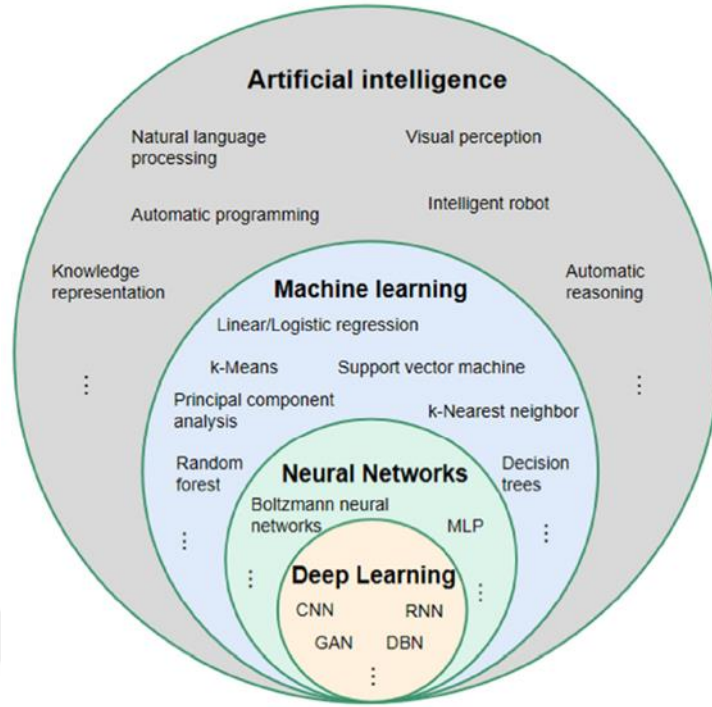
Makine öğrenmesi, incelenen olayın daha iyi anlaşılmasını, olayın bir model aracılığıyla temsil edilmesini, geleceğe yönelik tahminler yapılmasını ve olası anormalliklerin önceden tespit edilmesini sağlar. Gelişen teknoloji, daha güçlü algoritmaların ve donanımların ortaya çıkmasıyla makine öğrenmesini geçmişe kıyasla çok daha verimli hale getirmiştir. Son yıllarda ise, daha karmaşık yapıları ve derin katmanlı modelleriyle öne çıkan derin öğrenme alanı, makine öğrenmesinin gelişmiş bir alt dalı olarak önem kazanmıştır (Sen vd., 2021).

2.5. Yapay Sinir Ağları ve Derin Öğrenme

Yapay zekâ çalışmalarının bir parçası ve makine öğrenimi yöntemi olan YSA, insan beynini yani biyolojik sinir ağlarının çalışmasını taklit ederek zekâ gerektiren davranışların modelini oluşturmayı hedeflemektedir. YSA ile geleneksel bir regresyon yaklaşımı kıyaslandığında, YSA karmaşık doğrusal olmayan ilişkilerle model oluşturma potansiyeline sahiptir. Bunun yanında YSA'nın çok iyi derecede hata esnekliği vardır ve paralel işleme yapılarak oldukça çabuk şekilde ölçeklendirilebilir (Zou vd., 2009).

YSA, birbirine bağlı çok sayıda nörondan oluşan bir hesaplama modelidir. Her nöron, aldığı girdileri belirli bir aktivasyon fonksiyonu aracılığıyla işleyerek çıktıya dönüştürür. Nöronlar arasındaki bağlantılar, sinyallerin iletimini sağlayan ve öğrenme sürecinde güncellenen ağırlıklarla ifade edilir. Bu yapı, ağırlıklı bilgi depolama ve öğrenme yeteneğini oluşturur. Ağdaki işleme birimi üçe ayrılır: giriş birimi, çıkış birimi ve gizli birim. Giriş katmanı verileri alırken, çıkış birimi katmanı nihai sonucu üretir. Gizli birim ise giriş ve çıkış birimlerinin arasında bulunan ve sisteme dışarıdan bakan bir birimdir. YSA, genel olarak belirli bir algoritmayı ya da fonksiyonu yaklaşık olarak modelleyen, aynı zamanda insan beyninin bilgi işleme biçiminden esinlenen sistemlerdir (Y. Wu ve Feng, 2018).

Derin öğrenme, makine öğrenimi olan yapay zekânın alt dallarındandır. Derin öğrenme ile modellemeler oluşturulurken genellikle YSA kullanılır. Konuşma tanıma, görsel nesne tespiti gibi birçok işlem katmanına sahip olan hesaplamalı modellerin ve genomik, ilaç keşfi gibi birçok soyutlama seviyesi olan veri temsillerini öğrenmesi derin öğrenme ile gerçekleştirilir. Derin öğrenme, büyük veri kümelerindeki karmaşık ilişkileri keşfetmek için geri yayılım algoritmasından yararlanır. Bu algoritma, her katmandaki parametrelerin bir önceki katmandan elde edilen temsiller doğrultusunda nasıl güncelleneceğini belirler (Datta ve Davim, 2021; LeCun vd., 2015). Şekil 2.5'te yapay zekâ, makine öğrenimi, sinir ağı ve derin öğrenme arasındaki ilişki gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Yapay zekâ, makine öğrenimi, sinir ağı ve derin öğrenme arasındaki ilişki
(Li vd., 2021)

2.6. Bulanık Mantık

Makine zekâsının bir dalı olan bulanık mantık, mantıkçılar tarafından ilk olarak 1920 yıllarında her şey bir derece konusudur diyerek ortaya konulmuştur (Kosko ve Isaka, 1993). Lotfi Zadeh tarafından ise 1965’de öne sürülen ve klasik küme teorisinin daha genel hali olan bulanık mantık kavramı, bulanık kümelerin matematiksel teorisini ele alan Boole mantığının bir parçasıdır (Dernoncourt, 2013).

Bilgisayarlar, insanlar gibi düşünme veya akıl yürütme yeteneğine sahip değildir. Onlar yalnızca sıfır ve birlerden oluşan, kesin olarak doğru ya da yanlış şeklinde ifade edilen bilgileri işleyebilirler. Oysa insan beyni, belirsizlik içeren veya yoruma açık durumlarda da mantık yürütebilir; örneğin “hava serin”, “bu hız yüksek” ya da “o genç” gibi net sınırları olmayan yargıları değerlendirebilir. İnsanlar sağduyularını kullanarak, olayların tamamen doğru ya da tamamen yanlış olmadığı durumlar için karar verebilirler. Bulanık mantık ise bilgisayarların bu belirsiz dünyayı daha gerçekçi biçimde algılamasına yardımcı olan bir yöntemdir. Örneğin, klasik matematiksel modeller, bir kamyonun ve römorkun park alanından yükleme noktasına geri götürülmesini tam olarak tanımlayamaz. Buna karşın, insanlar veya bulanık mantık sistemleri “römork biraz sola

döndüyse, direksiyonu biraz sağa çevir” gibi kesin olmayan ama işe yarar kurallarla bu süreci başarıyla yönetebilir. Genellikle bulanık sistemlerdeki kurallar uzman kişilerden elde edilir. Ancak uzman görüşü bulunmadığında, uyarlanabilir bulanık sistemler, insanların gerçek durumlarda izlediği davranışları gözlemleyerek bu kuralları kendiliğinden oluşturabilir (Kosko ve Isaka, 1993).

Bulanık mantığın tanımlanması anlamsal sorunlar barındırdığından bulanık mantık, iki farklı tanımla açıklanabilir. İlk tanım “yaklaşık akıl yürütmeyi biçimselleştirmeyi amaçlayan bir mantıksal sistemdir” şeklinde açıklanabilir. İkinci farklı tanım ise “çok değerli bir mantığa dayanır, ancak amacı geleneksel çok değerli mantıksal sistemden oldukça farklıdır” şeklinde açıklanabilir. Bulanık mantık sistemi, “büyük”, “küçük”, “bulanık”, “eski” gibi dilsel değişkenler, bu değişkenlerin ilişkilerini tanımlayan “eğer-ise” kurallarını ve standart biçimde tanımlanan bulanık niceleyicilerle çalışır. Tüm bu kavramların dayandığı teorik temel, bulanık küme teorisidir (Chowdhary, 2020).

Bulanık mantık yaklaşımı ile bir uygulama yapmak istiyorsak üç aşama uygulamamız gereklidir. Bu üç aşama bulanıklaştırma, bulanık çıkarım süreci ve netleştirmedir (Bai vd., 2006):

1. Bulanıklaştırma: Klasik veriler (net veriler), bulanıklaştırma süreciyle birlikte bulanık verilere veya üyelik fonksiyonlarına dönüştürülür.
2. Bulanık Çıkarım Süreci: Bu aşamada üyelik fonksiyonları kontrol kurallarıyla bir araya gelir ve bulanık çıktı oluşturulur.
3. Netleştirme: Birbiriyle bağlantılı her bir çıktı bu aşamada hesaplanır ve bu çıktılar farklı yöntemlerle arama tablosuna yerleştirilir. Kısacası netleştirme aşaması için, bir uygulama esnasında hâlihazırdaki girdiye göre arama tablosundan çıktıyı alma süreci de denebilir.

Bir adet klima kontrol sistemi örneği ile bu üç aşama aşağıda daha ayrıntılı açıklanmıştır.

Bir klima sisteminin kontrolü için, giriş sıcaklığı ve motorun dönüş hızı gibi değişkenler, “yüksek”, “orta”, “düşük” veya “hızlı”, “yavaş” gibi dilsel terimlerle ifade edilir. İlk değişken giriş sıcaklığına, ikinci değişken ise motorun dönüş hızına karşılık gelmektedir. Bu süreçte hem giriş hem de çıkış değerleri, klasik (net) verilerden bulanık verilere dönüştürülür. Bu dönüştürme işlemi bulanıklaştırma adı verilen ilk adımda gerçekleştirilir. İkinci aşamada, üyelik fonksiyonları ile kontrol kuralları birleştirilerek bulanık çıkarım yapılır ve sistemin uygun kontrol çıktısı elde edilir. Bu aşamada kullanılan kurallar, insan sezgisine dayalı “Eğer sıcaklık çok yüksekse, ısıtıcı kapatılmalı

veya ısıtma motoru yavaşlatılmalıdır ” gibi mantıksal ifadelerden oluşur. Son adım olan durulaştırma aşamasında, elde edilen bulanık çıktılar tekrar net değerlere dönüştürülür. Böylece sistem, insan mantığına benzer biçimde çalışarak sıcaklık değişimlerine uygun tepki verir. Genel olarak bu süreç, net–bulanık–net dönüşüm adımlarından oluşur. Gerçek dünyada değişkenler çoğu zaman tamamen kesin olmadığından, bu yaklaşım sistemin belirsizlikleri daha gerçekçi biçimde modellemesini sağlar (Bai vd., 2006).

2.7. Adaptif Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS)

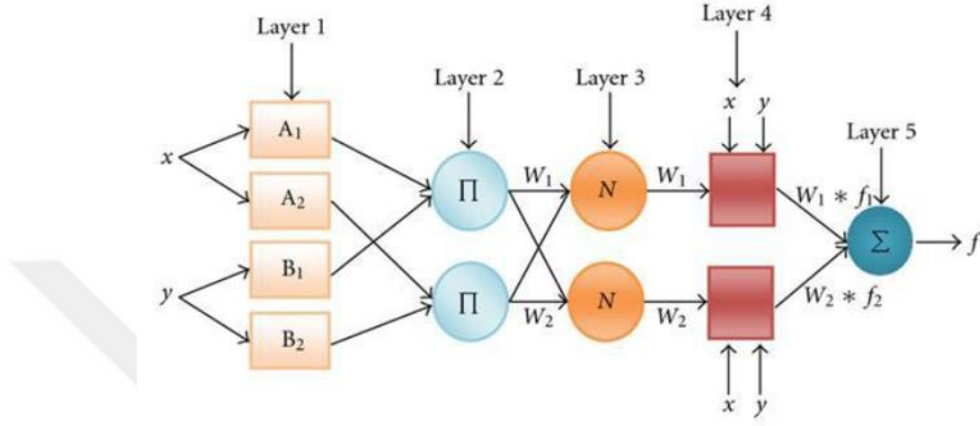
Adaptif Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi (*Adaptive Neural Fuzzy Inference Systems*) (ANFIS), bulanık mantık yaklaşımı ile YSA mimarisini birleştiren uyarlanabilir bir ağ sistemidir. Bu durum sayesinde ANFIS iki yaklaşıma ait nitelikleri de içerir. Bunun yanında ayrı ayrı uygulandıkları zaman ortaya çıkan dezavantajların da önüne geçilir (Atmaca vd., 2001).

ANFIS iki parçadan oluşan bir ağ yapısına sahiptir. Bu parçalar öncül ve sonuç bölümleri olarak isimlendirilir. ANFIS eğitimi, öncül ve sonuç bölümlerine ait değişkenlerin bir optimizasyon algoritması kullanılarak oluşturulur ve eğitim esnasında halihazırdaki giriş-çıkış veri setleri kullanılır. Bu aşamadan sonra öncülleri ve sonuçları birbirine bağlayan EĞER-İSE kurallarını içeren bir dizi mantıksal kurallar elde edilir (Jang, 1993).

Uyarlanabilir ağlar, çok katmanlı ileri beslemeli bir yapıya sahip olup, her düğümün kendisine ulaşan sinyaller üzerinde belirli bir işlem yaptığı sistemlerdir. Her düğüm, kendi işlevine uygun formüllerle çalışır ve bu formüller ağın genel girdi-çıkış ilişkisine göre belirlenir. Ağ içindeki bağlantılar yalnızca sinyal akış yönünü gösterir, bağlantılarla herhangi bir ağırlık değeri ilişkilendirilmez. Uyarlanabilir ağın tüm parametreleri, düğümlere ait parametrelerin birleşiminden oluşur. İstenen girdi-çıkış ilişkisinin elde edilebilmesi için bu parametreler, eğitim verileri kullanılarak gradyan tabanlı algoritmalar yardımıyla güncellenir (Jang, 1993). Bir çıkarım sisteminde beş farklı katman bulunmaktadır. Bu katmanlar; bulanık katman, ürün katmanı, normalleştirilmiş katman, bulanık olmayan katman ve toplam çıktı katmanı olarak adlandırılır (Sada ve Ikpeseni, 2021).

Farklı birçok bulanık çıkarım sistem modelleri vardır. Mamdani, Tsukamoto ve Sugeno tipi çıkarım sistemleri bu modellerden birkaçıdır. Sugeno tipi çıkarım sistemini ele alacak olursak, bu sistem girdi ve çıktı veri setlerini temel alarak bulanık kuralların

oluşturulması amacıyla sistematik bir yaklaşım sunar. Değişkenlerin iyileştirilmesine olanak sunduğu için bu sistem diğer sistemlere göre daha avantajlıdır. Değişkenleri iyileştirilen Sugeno tipi çıkarım sistemlerine “Yapay Sinir Ağı Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi” (ANFIS) denir (Jang ve Sun, 1995). Şekil 2.6’da iki giriş bir çıkışlı temel ANFIS yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.6. İki giriş bir çıkışlı temel ANFIS yapısı (Aru vd., 2016)

2.8. Yapay Sinir Ağı ve Bulanık Mantık Tabanlı Modellerde Kullanılan Performans Değerlendirme Ölçütleri

Bir rüzgâr gücüne ait tahmin modelini analiz etmek, gelecekteki rüzgâr gücü değerlerini tahmin etmedeki güvenilirliği çözümlmek adına değerli bir aşamadır. Belirlilik esaslı tahminlerin tahmin doğruluğu, tahmini değerler ve gerçek değerler arasındaki sapmanın çeşitli ölçütler vasıtasıyla ölçülmesiyle analiz edilebilir. Belirlilik esaslı tahminlerin doğruluğunu analiz etmek amacıyla literatürde pek çok performans değerlendirme tekniği uygulanmaktadır (González-Sopeña vd., 2021).

Regresyon analizi, deneysel verilerden sonuç elde etmek amacıyla en çok ele alınan tekniklerden biri olabilir. Verilerdeki eğilimi yakından simgeleyen bir fonksiyon elde etmek ana hedefidir. Değişkenler ile ilgili tahminlerde bulunulacağı zaman bu fonksiyon kullanılabilir (Ahmed, 2015).

Regresyon analizi istatistiksel bir metottur. Regresyon analizi iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi değerlendirmek amacıyla kullanılır. Bu değerlendirme değişkenlerden birinin diğer değişkenlerden elde edilen bilgilerle ne derece öngörülebileceği veya açıklanabileceğini belirlemek için yapılır. Herhangi bir regresyon

analizi uygulamasında nicel değişkenler durumlarına göre iki farklı konuma ayrılmalıdırlar. Bağımlı değişken bir diğer adıyla tepki, sonuç değişkeni, tahmin edeceğimiz veya etkilenen değişkendir. Bağımsız, açıklayıcı veya öngörücü değişken ise tahminin temeli olarak çalıştırılan veya bir değişikliğe sebebiyet veren değişkendir (Mohr vd., 2021).

2.8.1. Ortalama mutlak hata (MAE)

Ortalama Mutlak Hata (*Mean Absolute Error*) (MAE) değeri, tahmin edilen hata değerlerinin ortalama büyüklüğüdür (Yildiz vd., 2021). MAE değeri, tahmini değerinin birimiyle aynı birime sahiptir ve kolay anlaşılabilir bir ölçüttür (Mason vd., 2018).

2.8.2. Ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) ve simetrik ortalama mutlak yüzde hata (sMAPE)

Ortalama Mutlak Yüzde Hata (*Mean Absolute Percentage Error*) (MAPE), yüzdesel hata sunması ve sezgisel olarak kolay yorumlanabilmesi nedeniyle uygulamalı çalışmalarda sıklıkla tercih edilir (de Myttenaere vd., 2016). MAPE kullanımının önemli olduğu durumlar olsa da MAPE bazı dezavantajlara da sahiptir. Bunlardan bazıları daha önemlidir. Tanımından dolayı negatif verilerde kullanılamaz yani pozitif verilerle sınırlandırılmıştır. Düşük tahmin değerlerine yatkın olmasından dolayı büyük hataların çıkabileceği tahmin modelleri için kullanışsızdır (Armstrong ve Collopy, 1992 Akt: Chicco vd., 2021).

Simetrik Ortalama Mutlak Yüzde Hata (*Symmetric Mean Absolute Percentage Error*) (sMAPE), MAPE'deki değişimdir. Değişik tahmin modellemelerinde tercih edilir (Hu vd., 2020). MAPE kullanımındaki dezavantajları ortadan kaldırmak amacıyla sMAPE öne sürülmüştür. Fakat tek ve evrensel bir formül üzerinde fikir birliği olmamasından dolayı farklı sMAPE formülleri kullanılmaya devam edilmektedir (Johannsen vd., 2014). Yapılan tez çalışmasında, literatürde yaygın olarak kullanılan sMAPE formülü tercih edilmiştir.

2.8.3. Belirleme katsayısı (R^2)

Belirleme katsayısı, bağımlı değişken ile bağımsız değişken(ler) arasındaki lineer ilişki düzeyini gösteren korelasyon katsayısının karesi olarak tanımlanır (Günel, 2003).

Belirleme katsayısı (R^2), regresyon denklemlerinin verilerle uyum düzeyini anlamak için muhtemelen en sık yararlanılan ölçüdür (Kvålseth, 1985). Tahmin yönteminin doğruluğu R^2 değeri ile ilişkilidir. R^2 değeri 1 değerine ne kadar yaklaşırsa, tahmin yönteminin doğruluğu bir o kadar artar. Bundan dolayı, tahmin modellerinin başarımı, R^2 kullanılarak kolay bir şekilde analiz edilir (Hong ve Rioflorido, 2019).

2.8.4. Kök ortalama kare hatası (RMSE) ve normalize edilmiş kök ortalama kare hatası (nRMSE)

Kök Ortalama Kare Hatası (*Root Mean Square Error*) (RMSE) tahmini değer ile gerçek değer arasındaki hata düzeyini belirtir (Yıldız vd., 2021). RMSE, 0 ile $+\infty$ aralığında değer alır. Tahmin modelinin doğruluğu RMSE değerine bağlıdır. Bu değer küçüldükçe tahmin modelinin doğruluğu artar. RMSE, gerçek verinin birimiyle aynı birime sahiptir (Jierula vd., 2021). Bazı durumlarda RMSE değeri normalleştirilerek tahmin modellerinin performansının nicel olarak gözlemlenmesi sağlanabilir (Piotrowski vd., 2022). Normalize Edilmiş Kök Ortalama Kare Hatası (*Normalized Root Mean Square Error*) (nRMSE), ölçek farkından dolayı yaşanan sorunları önüne geçmek amacıyla öne sürülmüştür (Shcherbakov vd., 2013).

Aşağıda yapay sinir ağı ve bulanık mantık tabanlı modellerde kullanılan performans değerlendirme ölçütlerinin formülleri yer almaktadır. Bu formüllerde yer alan temsillerin açıklaması şu şekildedir:

y_i =Gerçek (ölçülen) değer

$\hat{y}_i$ =Model tarafından tahmin edilen değer

$\bar{y}$ =Gerçek değerlerin ortalaması

Ortalama Mutlak Hata formülü (2.1)'de, Ortalama Mutlak Yüzde Hata formülü (2.2)'de, Simetrik Ortalama Mutlak Yüzde Hata formülü (2.3)'te, Belirleme Katsayısı formülü (2.4)'te, Kök Ortalama Kare Hatası formülü (2.5)'te, Normalize Edilmiş Kök Ortalama Kare Hatası formülleri (2.6)'da verilmiştir.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (2.1)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (2.2)$$

$$sMAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{(|y_i| + |\hat{y}_i|)/2} \quad (2.3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} nRMSE &= \frac{RMSE}{\bar{y}} \\ nRMSE &= \frac{RMSE}{(y_{max} - y_{min})} \end{aligned} \quad (2.6)$$

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında, bir rüzgâr enerji santralinden elde edilen üretim verileri kullanılarak üretilen enerji değerlerinin tahmin edilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, bulanık mantık tabanlı Sugeno ve Mamdani çıkarım yöntemleri ile modellemeler oluşturulmuştur. Ardından aynı veri seti ANFIS ile eğitilmiştir. Modelleme sürecinde ortalama ortam sıcaklığı, ortalama rüzgâr hızı, ortalama reaktif güç, ortalama kanat açısı ve ortalama nasel pozisyonu olmak üzere beş farklı giriş değişkeni kullanılmış, çıkış değişkeni olarak ise ortalama üretilen enerji dikkate alınmıştır. Analize ilk olarak Minitab programı aracılığıyla korelasyon hesabı yapılarak başlanmıştır. Daha sonra MATLAB yazılımı aracılığıyla tahmin işlemleri gerçekleştirilmiş ve model başarıları çeşitli hata ölçütleriyle değerlendirilmiştir.

3.1. Çalışma Alanı ve Kullanılan Veri Kümesi

Analizde kullanılan veri seti, Konya ili sınırları içerisinde yer alan ve Sancak Enerji tarafından işletilen Bağlar Rüzgâr Enerji Santraline aittir. Şekil 3.1’de Bağlar Rüzgâr Enerji Santraline ait rüzgâr türbinleri gösterilmiştir. Kullanılan veri seti 2024 yılına ait olup, 10 dakikalık ölçüm aralığına sahip ham verilerin Excel ortamında Pivot Table (Özet Tablo) yöntemiyle işlenerek günlük ortalama değerlere dönüştürülmesiyle elde edilmiştir. Veriler; ortalama üretilen enerji, ortalama rüzgâr hızı, ortalama reaktif güç, ortalama kanat açısı, ortalama nasel pozisyonu ve ortalama ortam sıcaklığı değişkenlerinden oluşmaktadır.



Şekil 3.1. Bağlar rüzgâr enerji santral görünümü

Çalışmada kullanılan 2024 yılına ait rüzgâr enerji santrali verileri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan veri kümesi

Tarih	Ortalama Üretilen Enerji (kWh)	Ortalama Ortam Sıcaklığı (°C)	Ortalama Nasel Pozisyonu (°)	Ortalama Kanat Açısı (°)	Ortalama Reaktif Güç (kVAr)	Ortalama Rüzgâr Hızı (m/s)
1.01.2024	804,566	6,345	211,233	-0,208	-109,392	6,148
2.01.2024	568,047	7,691	214,971	0,059	-121,731	5,540
3.01.2024	492,339	8,114	257,545	8,931	-114,185	4,879
4.01.2024	649,237	9,001	225,897	4,257	-166,257	5,406
5.01.2024	1027,937	7,320	202,611	9,790	2,022	5,754
6.01.2024	2106,892	6,541	202,906	0,456	163,632	8,872
7.01.2024	3447,964	7,693	186,362	11,614	461,005	15,171
8.01.2024	1875,624	9,454	196,426	5,212	161,544	8,738
9.01.2024	929,278	6,963	193,304	2,120	25,070	6,232
10.01.2024	1163,359	2,786	304,648	7,975	127,632	6,850
11.01.2024	316,430	0,120	299,858	51,408	17,577	7,327
12.01.2024	1161,979	-0,374	150,101	34,404	104,265	6,801
13.01.2024	682,869	-4,005	186,536	3,649	-54,170	5,126
14.01.2024	439,568	-2,371	160,503	18,498	-73,037	4,656
15.01.2024	1214,926	2,729	200,870	0,289	46,933	6,758
16.01.2024	3162,272	5,750	198,317	8,995	513,166	13,991
17.01.2024	336,214	7,032	214,711	30,770	-83,008	4,126
18.01.2024	952,912	6,892	200,677	-0,134	-32,901	6,340
19.01.2024	1957,381	8,483	205,051	0,481	176,817	8,543
20.01.2024	1534,652	8,575	199,819	-0,253	233,428	7,653
21.01.2024	1032,554	4,626	250,267	7,641	-53,205	7,246
22.01.2024	278,751	3,227	266,378	26,034	-77,319	3,838
23.01.2024	68,172	5,324	182,662	45,615	-65,197	2,933
24.01.2024	85,132	7,630	133,868	28,353	-80,654	2,934
25.01.2024	20,558	8,243	69,717	46,614	-34,882	2,308
26.01.2024	1088,645	6,525	189,719	-0,331	-39,879	6,814
27.01.2024	10,877	-2,123	124,486	61,544	-53,544	9,313
28.01.2024	838,684	-1,786	271,078	20,589	52,559	6,487
29.01.2024	368,560	-3,953	225,252	18,810	44,143	7,156
30.01.2024	1340,663	-3,684	30,761	17,908	247,881	9,029
31.01.2024	2553,114	-2,987	187,623	-0,026	349,577	9,679
1.02.2024	1395,710	-1,846	170,068	-0,151	59,308	7,100
2.02.2024	42,416	1,232	102,845	47,658	-74,961	2,253
3.02.2024	580,163	-0,218	247,365	19,438	32,030	4,349
4.02.2024	19,428	2,868	253,682	59,500	-34,426	2,423
5.02.2024	952,812	4,372	300,636	0,223	-26,797	6,047
6.02.2024	1101,204	9,591	303,292	0,266	-15,267	6,340
7.02.2024	1276,382	10,345	223,026	0,215	74,264	7,002
8.02.2024	1948,889	7,992	222,278	1,723	204,259	8,279

Çizelge 3.1.(devam) Çalışmada kullanılan veri kümesi

Tarih	Ortalama Üretilen Enerji (kWh)	Ortalama Ortam Sıcaklığı (°C)	Ortalama Nasel Pozisyonu (°)	Ortalama Kanat Açısı (°)	Ortalama Reaktif Güç (kVAr)	Ortalama Rüzgâr Hızı (m/s)
9.02.2024	534,254	7,062	196,111	2,990	-91,774	5,016
10.02.2024	1258,773	7,663	200,443	-0,086	90,807	6,907
11.02.2024	2452,654	8,208	204,177	1,222	282,993	9,599
12.02.2024	3253,814	7,706	191,525	4,422	485,792	11,990
13.02.2024	2877,750	7,359	187,980	12,902	492,230	12,738
14.02.2024	569,427	5,315	116,298	22,009	-100,433	4,726
15.02.2024	311,020	4,784	185,241	22,289	-32,072	4,106
16.02.2024	1790,971	1,957	321,433	-0,345	223,846	8,139
17.02.2024	1281,680	2,695	270,112	0,171	-20,362	6,646
18.02.2024	945,238	1,860	267,668	-0,368	-158,044	6,497
19.02.2024	1173,634	0,949	242,579	0,003	12,938	6,462
20.02.2024	26,005	3,875	100,950	36,452	-90,744	2,820
21.02.2024	242,428	5,717	222,222	11,874	-27,656	4,120
22.02.2024	179,964	4,073	207,969	28,986	-77,356	3,472
23.02.2024	149,476	6,685	174,939	36,069	-65,535	3,266
24.02.2024	93,298	8,694	135,466	30,326	-80,520	3,074
25.02.2024	11,582	9,237	74,069	52,727	-34,677	2,234
26.02.2024	853,587	7,697	203,918	-0,315	-41,495	6,287
27.02.2024	133,889	8,258	149,769	30,361	-48,575	3,177
28.02.2024	12,077	10,499	60,323	37,649	-74,614	2,317
29.02.2024	29,140	10,768	170,245	19,583	-86,324	2,797
1.03.2024	545,013	10,796	179,702	3,567	-81,970	5,362
2.03.2024	650,830	9,284	206,724	15,772	-56,137	4,850
3.03.2024	508,771	7,134	290,432	13,591	-72,291	4,786
4.03.2024	51,585	8,003	243,938	36,697	-81,876	2,739
5.03.2024	2155,059	8,036	203,252	3,225	295,551	9,738
6.03.2024	1110,024	4,504	302,509	15,221	69,874	5,819
7.03.2024	489,159	2,710	225,140	11,824	-61,134	4,559
8.03.2024	636,024	5,418	208,159	11,937	-113,538	5,389
9.03.2024	1245,496	1,973	326,565	-0,271	71,828	6,988
10.03.2024	323,357	2,079	108,968	10,997	-197,053	4,137
11.03.2024	411,759	6,029	188,273	6,688	-23,074	4,775
12.03.2024	1363,154	10,820	208,060	-0,332	70,601	7,433
13.03.2024	1514,211	8,522	209,985	1,349	220,780	7,317
14.03.2024	2,644	7,165	232,746	48,694	-60,992	2,551
15.03.2024	144,368	5,804	171,544	23,071	-141,042	3,436
16.03.2024	251,337	5,298	204,265	11,745	-60,496	3,993
17.03.2024	25,436	7,095	85,941	34,212	-153,585	2,551
18.03.2024	1093,774	6,178	36,639	-0,188	45,570	6,719
19.03.2024	1278,682	5,781	228,430	0,226	82,373	6,952
20.03.2024	120,268	7,450	185,367	34,633	-48,538	3,168
21.03.2024	1823,539	0,463	283,765	2,811	68,512	9,233

Çizelge 3.1.(devam) Çalışmada kullanılan veri kümesi

Tarih	Ortalama Üretilen Enerji (kWh)	Ortalama Ortam Sıcaklığı (°C)	Ortalama Nasel Pozisyonu (°)	Ortalama Kanat Açısı (°)	Ortalama Reaktif Güç (kVAr)	Ortalama Rüzgâr Hızı (m/s)
22.03.2024	766,629	-0,239	330,288	0,727	5,708	5,550
23.03.2024	810,775	0,462	328,263	9,213	-47,466	5,244
24.03.2024	291,485	4,810	237,074	9,916	-87,571	4,314
25.03.2024	1329,632	8,006	235,865	4,670	66,244	6,917
26.03.2024	1003,385	4,313	225,521	14,231	21,802	5,907
27.03.2024	1005,364	11,000	242,500	1,125	21,671	6,298
28.03.2024	637,317	14,356	219,637	3,825	-48,166	5,666
29.03.2024	379,017	15,242	185,046	12,470	-26,098	4,335
30.03.2024	565,009	14,637	211,900	9,417	-25,749	4,903
31.03.2024	119,868	18,142	170,916	20,613	-188,172	3,472
1.04.2024	336,247	18,158	185,038	22,580	23,306	4,006
2.04.2024	2,115	19,617	110,403	59,248	-34,944	1,845
3.04.2024	626,191	19,022	267,326	2,259	69,652	5,261
4.04.2024	885,040	16,258	182,527	12,661	66,775	6,076
5.04.2024	2446,872	10,838	238,489	1,757	346,751	9,838
6.04.2024	1793,568	8,749	136,859	-0,249	163,052	8,258
7.04.2024	1791,979	8,196	44,865	0,473	176,723	8,316
8.04.2024	1154,501	5,033	99,177	9,252	-117,021	6,225
9.04.2024	1103,513	9,261	218,299	0,441	-182,965	6,392
10.04.2024	1197,306	10,898	252,547	0,269	-272,465	6,840
11.04.2024	472,407	12,458	166,666	1,073	-271,737	4,963
12.04.2024	1001,843	11,780	169,859	3,860	-144,686	6,493
13.04.2024	1028,212	11,403	242,666	3,192	-7,176	6,271
14.04.2024	1938,319	10,053	308,237	0,310	146,120	8,515
15.04.2024	418,614	11,539	50,306	8,798	-65,279	4,795
16.04.2024	782,316	16,780	198,532	-0,062	-39,151	6,160
17.04.2024	2684,979	17,229	192,081	3,488	294,802	11,186
18.04.2024	2236,068	16,703	223,989	2,438	257,277	9,775
19.04.2024	483,972	15,481	189,282	15,281	-4,966	4,763
20.04.2024	2243,611	13,436	207,198	17,313	328,069	13,622
21.04.2024	156,460	12,473	234,766	27,194	21,405	3,434
22.04.2024	214,207	15,396	182,063	35,927	3,360	3,528
23.04.2024	595,214	20,069	205,003	1,080	143,573	5,433
24.04.2024	2749,407	21,710	198,288	4,592	507,057	11,891
25.04.2024	3166,313	20,478	185,611	6,224	554,419	13,040
26.04.2024	1566,409	20,765	234,143	0,295	296,550	7,826
27.04.2024	733,937	16,165	287,226	26,294	205,332	4,957
28.04.2024	192,077	17,577	138,039	33,825	119,193	3,484
29.04.2024	1511,917	14,345	227,297	1,095	406,561	7,610
30.04.2024	408,390	15,808	114,337	11,394	204,703	4,723
1.05.2024	414,863	14,309	225,253	3,540	127,010	4,761
2.05.2024	606,847	13,009	254,064	27,347	132,253	4,270

Çizelge 3.1.(devam) Çalışmada kullanılan veri kümesi

Tarih	Ortalama Üretilen Enerji (kWh)	Ortalama Ortam Sıcaklığı (°C)	Ortalama Nasel Pozisyonu (°)	Ortalama Kanat Açısı (°)	Ortalama Reaktif Güç (kVAr)	Ortalama Rüzgâr Hızı (m/s)
3.05.2024	942,502	11,511	269,561	3,567	90,434	6,127
4.05.2024	1071,940	10,402	226,604	9,169	155,634	6,450
5.05.2024	927,262	6,836	162,159	-0,025	34,094	6,346
6.05.2024	1126,907	6,932	147,691	2,971	193,071	6,382
7.05.2024	70,147	10,938	130,901	37,228	118,006	2,877
8.05.2024	285,781	14,602	190,507	27,249	-9,109	4,239
9.05.2024	336,548	16,201	202,766	13,051	-37,762	4,590
10.05.2024	1235,126	16,856	166,579	24,888	298,317	7,400
11.05.2024	896,047	12,742	265,335	19,694	147,420	5,537
12.05.2024	1938,038	7,906	284,847	-0,245	319,558	8,252
13.05.2024	1316,666	8,519	229,251	0,171	307,428	6,954
14.05.2024	1022,043	6,655	155,100	16,741	216,252	5,667
15.05.2024	126,458	12,438	164,418	19,322	102,753	3,561
16.05.2024	875,665	14,153	277,827	1,139	250,669	6,050
17.05.2024	180,719	17,498	184,043	36,683	90,707	3,271
18.05.2024	1117,355	21,382	275,157	10,140	171,195	6,523
19.05.2024	745,164	18,290	322,739	16,165	169,606	5,433
20.05.2024	512,811	19,698	260,145	1,775	258,844	5,357
21.05.2024	766,318	19,567	277,648	5,142	247,775	5,936
22.05.2024	589,686	20,019	265,673	17,749	246,893	4,911
23.05.2024	1730,695	17,618	221,197	6,560	456,637	9,307
24.05.2024	2412,173	11,098	292,738	2,125	401,177	10,077
25.05.2024	2365,112	13,010	194,644	1,670	450,559	9,704
26.05.2024	365,753	14,532	208,898	21,699	145,862	4,236
27.05.2024	185,454	13,517	160,192	22,102	166,020	3,702
28.05.2024	514,950	12,941	269,617	3,739	125,247	5,071
29.05.2024	325,849	15,535	178,562	13,047	190,837	4,423
30.05.2024	447,596	15,430	236,872	13,528	230,727	4,640
31.05.2024	330,698	16,888	282,258	4,403	159,255	4,585
1.06.2024	62,593	19,003	95,669	39,620	124,054	2,856
2.06.2024	125,007	22,503	85,323	12,530	219,575	3,550
3.06.2024	184,887	24,292	47,536	8,985	91,926	3,949
4.06.2024	71,771	26,130	81,704	38,991	108,345	3,210
5.06.2024	184,243	26,532	131,865	13,165	153,053	3,933
6.06.2024	844,843	25,141	198,916	0,378	303,705	6,068
7.06.2024	1152,115	21,173	137,837	11,630	156,223	6,999
8.06.2024	374,094	18,544	55,262	21,126	35,088	4,524
9.06.2024	840,218	17,870	139,182	3,606	158,131	6,192
10.06.2024	113,938	20,873	56,408	18,861	172,329	3,270
11.06.2024	69,992	25,206	190,234	33,753	135,090	3,138

Çizelge 3.1.(devam) Çalışmada kullanılan veri kümesi

Tarih	Ortalama Üretilen Enerji (kWh)	Ortalama Ortam Sıcaklığı (°C)	Ortalama Nasel Pozisyonu (°)	Ortalama Kanat Açısı (°)	Ortalama Reaktif Güç (kVAr)	Ortalama Rüzgâr Hızı (m/s)
12.06.2024	479,225	28,290	204,579	5,276	96,670	5,062
13.06.2024	810,095	28,798	317,191	0,069	117,580	6,153
14.06.2024	614,113	26,965	248,443	27,794	-129,790	6,397
15.06.2024	2750,192	19,991	323,624	5,220	193,083	12,390
16.06.2024	994,044	20,684	142,252	21,438	1,313	6,051
17.06.2024	1241,581	23,617	180,582	7,226	-104,573	7,005
18.06.2024	1751,287	24,240	160,138	1,621	-35,886	8,660
19.06.2024	2122,065	23,822	27,632	0,223	18,361	9,384
20.06.2024	1737,425	24,138	31,088	1,111	8,481	8,965
21.06.2024	3146,822	21,836	25,563	5,000	181,017	12,774
22.06.2024	3026,333	20,983	37,893	7,698	254,362	14,114
23.06.2024	1907,889	22,223	89,609	1,318	-97,781	9,270
24.06.2024	371,311	26,115	74,720	8,498	141,257	4,758
25.06.2024	1165,166	27,477	274,052	2,248	401,472	7,605
26.06.2024	528,767	20,860	190,467	46,317	-73,536	4,481
27.06.2024	659,993	20,893	40,021	-0,019	-34,547	5,869
28.06.2024	625,421	24,627	84,607	8,828	96,541	5,410
29.06.2024	3428,278	19,804	14,297	12,466	214,634	16,454
30.06.2024	3131,095	17,461	22,052	3,587	239,345	12,383
1.07.2024	1420,225	19,443	57,321	-0,355	8,765	7,795
2.07.2024	706,098	20,815	65,483	3,294	-61,087	5,769
3.07.2024	1189,260	25,415	207,838	3,352	-13,113	7,781
4.07.2024	1500,044	23,907	221,762	0,825	74,963	8,164
5.07.2024	1602,048	20,608	297,219	12,391	102,587	9,086
6.07.2024	3045,400	19,062	147,340	7,867	331,952	13,515
7.07.2024	3334,095	21,334	33,561	6,991	147,079	13,851
8.07.2024	2466,328	22,180	29,193	0,878	150,104	10,278
9.07.2024	2780,520	22,709	102,446	4,591	135,626	12,088
10.07.2024	2394,069	22,383	238,062	7,756	86,503	10,190
11.07.2024	81,083	22,683	257,912	55,862	25,645	4,458
12.07.2024	331,518	23,539	182,931	20,122	-141,579	4,237
13.07.2024	1877,345	22,265	210,457	1,551	101,135	8,848
14.07.2024	1791,878	21,597	244,869	-0,156	28,588	8,334
15.07.2024	1709,679	21,886	192,753	-0,075	98,211	8,164
16.07.2024	819,173	22,865	153,198	9,074	-22,724	5,796
17.07.2024	1363,671	23,021	221,013	3,354	50,703	7,238
18.07.2024	1168,580	23,340	194,559	-0,227	155,578	6,897
19.07.2024	1338,702	23,214	38,875	-0,314	57,675	7,443
20.07.2024	714,512	22,669	44,929	-0,003	-131,433	5,860
21.07.2024	108,045	24,997	139,047	6,822	-71,474	3,464

Çizelge 3.1.(devam) Çalışmada kullanılan veri kümesi

Tarih	Ortalama Üretilen Enerji (kWh)	Ortalama Ortam Sıcaklığı (°C)	Ortalama Nasel Pozisyonu (°)	Ortalama Kanat Açısı (°)	Ortalama Reaktif Güç (kVAr)	Ortalama Rüzgâr Hızı (m/s)
22.07.2024	643,387	27,008	214,089	4,647	34,743	5,513
23.07.2024	909,880	25,188	182,016	7,325	107,751	6,274
24.07.2024	950,726	22,512	202,663	3,047	179,346	6,231
25.07.2024	1105,431	21,542	175,870	7,715	64,405	6,667
26.07.2024	1514,453	19,131	302,007	6,002	63,159	7,966
27.07.2024	2630,419	17,581	341,670	3,228	207,320	10,595
28.07.2024	1780,098	19,199	138,194	-0,242	36,608	8,228
29.07.2024	1077,173	19,918	33,961	-0,195	41,265	6,818
30.07.2024	1836,951	21,142	36,728	-0,097	54,427	8,476
31.07.2024	1272,853	19,724	101,630	0,361	-0,860	7,152
1.08.2024	452,168	20,585	136,098	6,613	-204,045	5,026
2.08.2024	32,779	23,529	63,692	43,635	-1,005	2,642
3.08.2024	366,771	25,200	193,293	19,934	-1,704	4,427
4.08.2024	903,363	24,898	194,152	6,931	-0,005	5,822
5.08.2024	1605,363	23,401	247,593	12,114	2,264	7,758
6.08.2024	926,890	23,298	193,741	13,640	0,395	5,361
7.08.2024	2098,476	22,224	282,771	1,799	2,942	9,236
8.08.2024	852,414	22,807	188,662	10,447	0,390	5,181
9.08.2024	337,258	24,842	211,478	18,558	-1,243	4,851
10.08.2024	2263,725	22,666	309,249	2,198	3,706	9,940
11.08.2024	2216,497	20,456	143,908	0,105	3,799	9,096
12.08.2024	1860,588	20,173	34,988	-0,264	2,339	8,429
13.08.2024	974,314	21,171	29,126	-0,192	-1,692	6,673
14.08.2024	979,329	23,715	38,870	2,379	-0,989	6,544
15.08.2024	2171,070	22,061	55,186	0,277	3,479	9,190
16.08.2024	2079,186	19,455	118,783	0,898	2,719	9,139
17.08.2024	1683,475	16,866	65,935	-0,096	1,813	7,997
18.08.2024	289,657	21,015	45,497	30,392	-1,833	3,875
19.08.2024	21,264	26,286	153,035	46,824	-0,903	2,693
20.08.2024	889,408	26,090	208,177	26,489	0,922	5,400
21.08.2024	737,816	26,765	248,135	6,668	-32,222	5,853
22.08.2024	566,035	24,166	262,619	15,192	-251,024	5,069
23.08.2024	2254,253	23,262	224,724	0,073	-37,137	9,029
24.08.2024	1644,688	20,874	150,949	0,089	-371,005	8,126
25.08.2024	820,219	19,896	93,197	0,966	-428,379	6,264
26.08.2024	391,464	21,887	162,520	37,505	-74,372	3,804
27.08.2024	476,019	22,149	259,015	30,259	-192,248	4,175
28.08.2024	876,310	21,394	203,940	5,665	-301,582	5,894
29.08.2024	1065,720	21,703	250,287	8,062	-40,466	6,383
30.08.2024	750,187	21,197	171,988	16,432	-427,092	5,440

Çizelge 3.1.(devam) Çalışmada kullanılan veri kümesi

Tarih	Ortalama Üretilen Enerji (kWh)	Ortalama Ortam Sıcaklığı (°C)	Ortalama Nasel Pozisyonu (°)	Ortalama Kanat Açısı (°)	Ortalama Reaktif Güç (kVAr)	Ortalama Rüzgâr Hızı (m/s)
31.08.2024	541,429	21,589	267,158	9,054	-502,271	4,947
1.09.2024	361,496	20,628	201,121	19,839	-377,045	4,180
2.09.2024	97,798	20,069	162,571	29,177	11,438	3,279
3.09.2024	530,997	21,209	205,878	0,242	-185,350	5,381
4.09.2024	917,086	21,352	171,710	1,178	-18,991	6,209
5.09.2024	1257,771	21,375	189,482	-0,114	30,522	7,120
6.09.2024	1393,955	20,700	214,016	1,136	3,082	7,405
7.09.2024	1333,602	20,435	274,294	-0,264	-23,659	7,308
8.09.2024	980,028	19,303	234,343	9,761	-69,333	6,045
9.09.2024	282,772	20,359	237,850	27,939	25,951	3,661
10.09.2024	698,978	22,763	199,406	0,851	148,124	6,028
11.09.2024	181,399	21,878	223,055	11,019	214,958	4,020
12.09.2024	3,137	22,689	185,847	56,774	127,933	2,258
13.09.2024	68,120	23,693	90,121	20,937	78,301	3,185
14.09.2024	725,935	22,997	194,842	28,189	-148,166	5,219
15.09.2024	707,712	23,463	289,823	14,103	-91,615	5,284
16.09.2024	1066,755	18,492	189,400	20,960	60,593	5,848
17.09.2024	829,242	19,079	173,647	10,563	131,069	5,630
18.09.2024	628,278	18,809	205,987	9,876	14,934	5,254
19.09.2024	883,800	17,121	103,304	-0,190	19,430	6,361
20.09.2024	211,715	16,940	85,584	16,037	2,383	3,889
21.09.2024	891,939	15,730	216,701	4,136	62,262	6,205
22.09.2024	730,593	13,055	242,452	9,481	-177,131	5,457
23.09.2024	471,326	13,088	250,581	2,349	-46,707	5,006
24.09.2024	880,515	12,691	246,960	4,673	-44,977	6,086
25.09.2024	70,585	18,132	168,852	40,889	-69,766	3,139
26.09.2024	104,899	19,577	40,454	6,057	46,887	3,660
27.09.2024	168,592	20,599	52,081	8,838	317,162	3,916
28.09.2024	10,367	22,287	85,863	45,101	-72,349	2,181
29.09.2024	150,151	23,251	222,779	41,227	-67,352	3,429
30.09.2024	1515,655	17,468	246,810	12,380	50,719	7,577
1.10.2024	657,387	9,701	174,434	-0,189	-30,417	5,794
2.10.2024	327,118	11,101	206,881	14,223	-57,460	4,276
3.10.2024	219,114	16,155	177,695	27,546	-64,456	3,910
4.10.2024	64,234	19,894	232,418	61,308	-73,076	2,478
5.10.2024	3,463	21,034	151,755	69,679	-73,552	2,082
6.10.2024	187,568	21,665	180,778	14,513	-67,712	4,003
7.10.2024	29,326	20,803	196,512	39,019	-74,779	2,842
8.10.2024	901,131	18,657	167,607	17,923	14,110	5,118
9.10.2024	356,361	21,588	201,505	12,784	-66,690	4,671

Çizelge 3.1.(devam) Çalışmada kullanılan veri kümesi

Tarih	Ortalama Üretilen Enerji (kWh)	Ortalama Ortam Sıcaklığı (°C)	Ortalama Nasel Pozisyonu (°)	Ortalama Kanat Açısı (°)	Ortalama Reaktif Güç (kVAr)	Ortalama Rüzgâr Hızı (m/s)
10.10.2024	122,632	21,262	243,064	39,803	-70,750	3,185
11.10.2024	414,341	20,415	213,079	17,238	-42,004	4,367
12.10.2024	78,053	22,124	178,221	39,146	-71,712	3,186
13.10.2024	613,400	18,570	185,878	5,623	-17,902	5,184
14.10.2024	276,167	16,918	170,527	18,971	-57,765	4,131
15.10.2024	433,900	15,730	142,210	4,565	-44,616	4,786
16.10.2024	736,686	16,684	218,314	22,879	-8,460	5,031
17.10.2024	2882,245	8,659	318,222	3,242	181,512	11,164
18.10.2024	1742,419	4,591	259,569	-0,157	64,444	8,017
19.10.2024	998,396	4,906	208,817	-0,059	1,048	6,431
20.10.2024	555,339	6,554	206,298	2,397	-45,203	4,959
21.10.2024	1530,594	5,605	203,095	-0,351	1,191	7,837
22.10.2024	1804,825	6,485	146,183	0,112	66,949	8,085
23.10.2024	576,021	7,345	48,498	1,126	-47,778	5,257
24.10.2024	430,812	9,316	85,428	0,075	-62,711	5,167
25.10.2024	441,159	8,341	40,263	0,095	-57,037	5,174
26.10.2024	411,801	9,517	38,719	4,564	-54,520	4,913
27.10.2024	33,482	10,846	53,651	27,005	-74,401	2,756
28.10.2024	35,056	11,748	50,722	23,159	-74,790	3,009
29.10.2024	815,215	10,975	181,594	-0,152	-33,545	6,253
30.10.2024	1193,289	8,875	134,363	-0,328	0,405	7,137
31.10.2024	501,836	8,322	63,741	-0,147	-53,353	5,466
1.11.2024	205,300	10,038	52,795	14,124	-70,130	4,021
2.11.2024	3,656	13,176	109,246	59,128	-75,271	2,103
3.11.2024	1776,269	10,427	264,947	3,561	107,144	8,595
4.11.2024	661,668	5,204	178,848	26,132	-5,446	4,348
5.11.2024	1177,875	4,453	221,762	0,207	11,212	6,892
6.11.2024	256,100	5,639	72,855	20,194	-62,323	3,974
7.11.2024	392,287	4,780	24,197	-0,080	-59,075	5,140
8.11.2024	378,374	6,085	53,513	0,182	-61,563	4,942
9.11.2024	169,685	6,273	109,375	11,496	-66,434	3,811
10.11.2024	53,775	7,767	154,561	35,170	-73,001	2,820
11.11.2024	111,882	8,695	196,835	20,815	-76,139	3,020
12.11.2024	48,620	6,790	141,465	36,426	-73,189	2,811
13.11.2024	67,273	7,718	163,611	32,737	-75,969	2,821
14.11.2024	134,190	11,299	247,093	29,690	-69,820	3,427
15.11.2024	244,309	11,682	204,102	21,953	-61,794	3,888
16.11.2024	36,257	10,900	90,741	40,611	-73,376	2,682
17.11.2024	939,614	8,879	176,609	1,603	-24,493	6,258
18.11.2024	120,735	8,093	256,815	40,169	-72,556	2,880

Çizelge 3.1.(devam) Çalışmada kullanılan veri kümesi

Tarih	Ortalama Üretilen Enerji (kWh)	Ortalama Ortam Sıcaklığı (°C)	Ortalama Nasel Pozisyonu (°)	Ortalama Kanat Açısı (°)	Ortalama Reaktif Güç (kVAr)	Ortalama Rüzgâr Hızı (m/s)
19.11.2024	49,479	8,180	97,330	33,745	-75,249	2,677
20.11.2024	1010,321	8,859	210,165	-0,369	-20,504	6,747
21.11.2024	3058,362	9,191	197,361	6,671	221,587	12,652
22.11.2024	2403,397	10,384	191,684	0,967	142,329	9,667
23.11.2024	3201,938	10,017	208,952	8,499	224,638	13,864
24.11.2024	2767,997	-4,135	346,241	27,887	189,706	20,776
25.11.2024	1819,706	-5,337	289,870	21,934	140,084	11,762
26.11.2024	656,477	-2,484	318,620	28,620	-0,477	6,386
27.11.2024	2629,639	9,678	183,843	2,552	142,944	10,930
28.11.2024	3014,644	9,166	200,928	16,956	223,743	15,468
29.11.2024	1194,401	-5,931	336,388	60,998	195,842	21,745
30.11.2024	3414,892	-6,380	345,142	10,716	144,286	15,824
1.12.2024	1022,292	-3,837	310,385	33,613	0,469	7,694
2.12.2024	130,592	4,848	202,479	35,229	-69,023	4,524
3.12.2024	1270,834	4,322	198,590	0,170	-1,657	6,981
4.12.2024	1102,033	4,882	206,950	0,133	19,834	6,432
5.12.2024	75,007	5,607	155,281	18,838	-70,113	3,189
6.12.2024	290,897	5,052	189,816	22,576	-64,852	4,032
7.12.2024	1892,382	4,781	196,487	0,114	40,299	8,265
8.12.2024	2324,766	7,121	203,565	0,942	122,768	9,326
9.12.2024	1699,210	8,769	211,345	-0,118	97,809	7,882
10.12.2024	639,994	10,000	208,544	0,087	-37,275	5,589
11.12.2024	560,638	8,806	224,158	1,406	-40,596	5,383
12.12.2024	791,070	4,893	317,761	14,268	-19,952	5,434
13.12.2024	1898,418	-0,540	346,460	0,509	90,218	8,248
14.12.2024	816,591	-1,232	272,083	13,358	-16,836	5,191
15.12.2024	2154,026	3,490	210,060	-0,180	142,944	8,701
16.12.2024	1850,505	3,126	247,930	6,244	86,265	7,916
17.12.2024	200,760	2,319	261,240	28,192	-65,140	3,553
18.12.2024	95,948	5,834	196,895	20,776	-73,029	3,057
19.12.2024	126,265	5,276	201,438	9,322	-69,860	3,530
20.12.2024	247,352	6,272	218,739	13,998	-66,360	3,930
21.12.2024	2672,003	6,091	212,281	3,148	164,887	10,588
22.12.2024	295,768	6,018	239,503	28,538	-46,448	3,728
23.12.2024	1237,199	5,336	190,474	-0,005	-10,672	6,975
24.12.2024	3281,636	5,869	185,228	11,585	224,442	15,522
25.12.2024	3209,901	5,515	175,300	17,689	247,998	17,332
26.12.2024	1286,336	4,601	177,435	16,012	13,558	7,397
27.12.2024	1090,070	3,427	232,962	8,322	30,279	6,164
28.12.2024	44,128	2,551	172,378	32,055	-65,480	3,547

Çizelge 3.1.(devam) Çalışmada kullanılan veri kümesi

Tarih	Ortalama Üretilen Enerji (kWh)	Ortalama Ortam Sıcaklığı (°C)	Ortalama Nasel Pozisyonu (°)	Ortalama Kanat Açısı (°)	Ortalama Reaktif Güç (kVAr)	Ortalama Rüzgâr Hızı (m/s)
29.12.2024	459,046	3,245	162,806	0,442	-60,836	4,939
30.12.2024	3121,273	3,852	156,146	20,259	251,055	18,779
31.12.2024	1344,970	3,148	149,769	16,164	13,723	7,953

3.1.1. Girdi ve çıktı değişkenlerinin tanımlanması

Veri seti analiz edilip tahminler yapılmadan önce değişkenler giriş ve çıkış parametreleri olacak şekilde belirlenmiştir. Analizde kullanılan beş adet giriş parametresi; ortalama rüzgâr hızı, ortalama reaktif güç, ortalama kanat açısı, ortalama nasel pozisyonu ve ortalama ortam sıcaklığıdır. Bir adet çıkış parametresi ise ortalama üretilen enerji olarak tanımlanmıştır.

3.2. Uygulama Ortamı ve Yazılım Altyapısı

Çalışmanın ilk aşamasında, 10 dakikalık ölçüm aralığına sahip ham veriler Excel ortamında Özet Tablo yöntemiyle işlenerek günlük ortalama değerlere dönüştürülmüştür. Daha sonra değişkenler tanımlanmış ve değişkenler arasındaki ilişkilerin incelenmesi amacıyla korelasyon analizi yapılmıştır. Bu analizler, bir istatistik programı olan Minitab Statistical Software 22 aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda analiz şekillendirilmiştir. Minitab Statistical Software 22 programında yapılan çıkış değişkeni ile giriş değişkenleri arasındaki korelasyon analizi Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

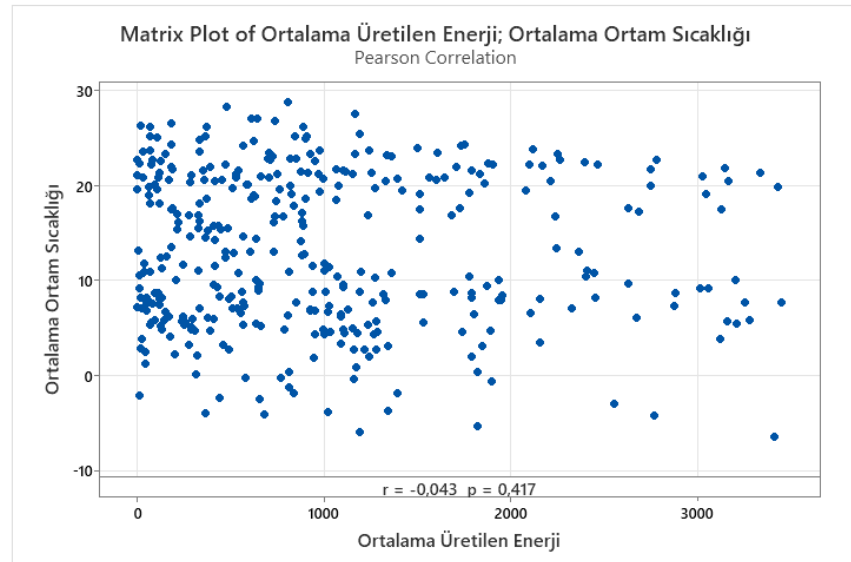
Kapsamlı bir şekilde açıklanacak olursa, korelasyon değişkenler arasında var olan ilişkinin nasıl ve ne derece olduğuyla ilgilidir. Korelasyon uygulanan değişkenlerin korelasyon katsayısı -1 ile +1 arasında ölçeklendirilir. Korelasyon uygulanan değişkenlerin arasındaki ilişkinin büyüklüğü aynı yönde ise pozitif korelasyon, zıt yönde ise negatif korelasyon olarak adlandırılırken, 0 hiçbir şekilde değişkenler arasında ilişki olmadığını gösterir. Değişkenler arasındaki ilişkinin korelasyon katsayısı +1 değerine yaklaştıkça değişkenler arasındaki ilişki güçlü hale gelir. İki değişken arasındaki doğrusal ilişkilerde ve normal dağılım gösteren verilerde Pearson çarpım-moment korelasyonu kullanılır. Normal dağılım göstermeyen sürekli, sıralı veya aykırı değerleri olan veriler

için ise monotonik ilişki durumunu kapsayan Spearman sıra korelasyonu kullanılabilir (Schober vd., 2018).

	C1-D	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	Tarih	Ortalama Üretilen Enerji	Ortalama Ortam Sıcaklığı	Ortalama Nüsel Pozisyonu	Ortalama Kanat Açısı	Ortalama Reaktif Güç	Ortalama Rüzgar Hızı	
1	1.01.2024	804,57	6,3455	211,233	-0,2079	-109,392	6,1477	
2	2.01.2024	568,05	7,6914	214,971	0,0588	-121,731	5,5403	
3	3.01.2024	492,34	8,1136	257,545	8,9309	-114,185	4,8790	
4	4.01.2024	649,24	9,0012	225,897	4,2568	-166,257	5,4058	
5	5.01.2024	1027,94	7,3199	202,611	9,7904	2,022	5,7541	
6	6.01.2024	2106,89	6,5412	202,906	0,4564	163,632	8,8721	
7	7.01.2024	3447,96	7,6929	186,362	11,6145	461,005	15,1714	
8	8.01.2024	1875,62	9,4536	196,426	5,2115	161,544	8,7385	
9	9.01.2024	929,28	6,9626	193,304	2,1204	25,070	6,2315	
10	10.01.2024	1163,36	2,7858	304,648	7,9746	127,632	6,8499	
11	11.01.2024	316,43	0,1202	299,858	51,4083	17,577	7,3267	
12	12.01.2024	1161,98	-0,3743	150,101	34,4037	104,265	6,8012	
13	13.01.2024	682,87	-4,0050	186,536	3,6486	-54,170	5,1263	
14	14.01.2024	439,57	-2,3708	160,503	18,4977	-73,037	4,6564	
15	15.01.2024	1214,93	2,7288	200,870	0,2894	46,933	6,7577	
16	16.01.2024	3162,27	5,7504	198,317	8,9954	513,166	13,9911	
17	17.01.2024	336,21	7,0319	214,711	30,7702	-83,008	4,1263	
18	18.01.2024	952,91	6,8917	200,677	-0,1339	-32,901	6,3401	
19	19.01.2024	1957,38	8,4834	205,051	0,4814	176,817	8,5434	
20	20.01.2024	1534,65	8,5748	199,819	-0,2530	233,428	7,6533	
21	21.01.2024	1032,55	4,6257	250,267	7,6406	-53,205	7,2460	
22	22.01.2024	278,75	3,2269	266,378	26,0343	-77,319	3,8381	
23	23.01.2024	68,17	5,3245	182,662	45,6151	-65,197	2,9328	
24	24.01.2024	85,13	7,6296	133,868	28,3525	-80,654	2,9342	
25	25.01.2024	20,56	8,2431	69,717	46,6145	-34,882	2,3084	
26	26.01.2024	1088,65	6,5249	189,719	-0,3308	-39,879	6,8145	
27	27.01.2024	10,88	-2,1228	124,486	61,5439	-53,544	9,3131	
28	28.01.2024	838,68	-1,7860	271,078	20,5890	52,559	6,4869	
29	29.01.2024	368,56	-3,9526	225,252	18,8103	44,143	7,1558	

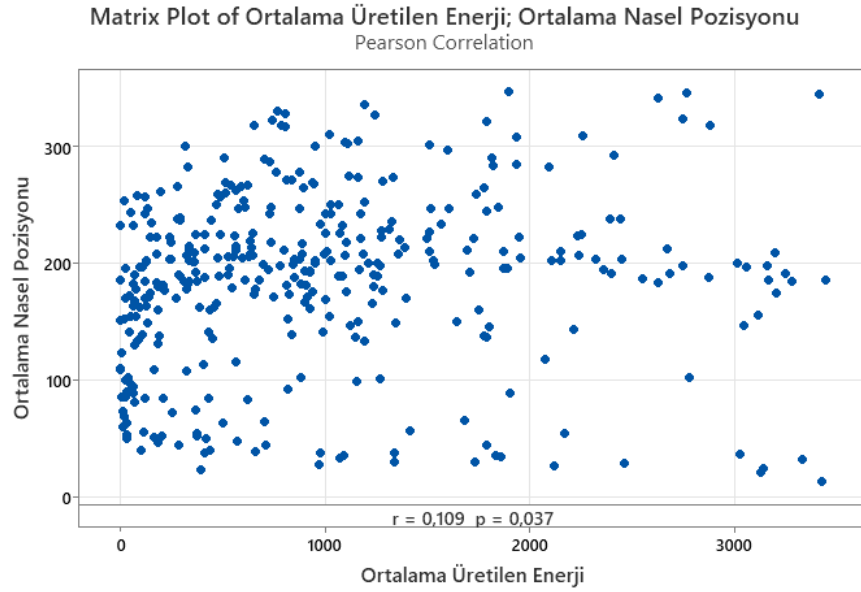
Şekil 3.2. Verilerin Minitab Statistical Software 22 programına yüklenmesi

Korelasyon analizinde ilk olarak ortalama ortam sıcaklığı ve ortalama üretilen enerji arasındaki ilişkiye bakılmıştır. Şekil 3.3'te ortalama ortam sıcaklığı ve ortalama üretilen enerji arasındaki ilişki matris grafiği ile gösterilmiştir.



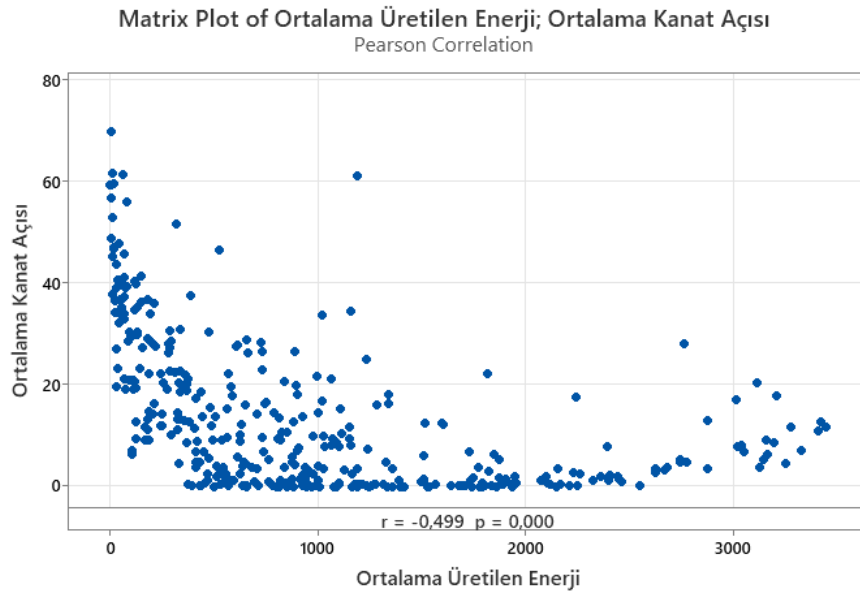
Şekil 3.3. Ortalama ortam sıcaklığı ve ortalama üretilen enerji arasındaki ilişkiyi gösteren matris grafiği

Ortalama nase l pozisyonu ve ortalama üretilen enerji arasındaki ilişki Şekil 3.4'te matris grafiği ile gösterilmiştir.



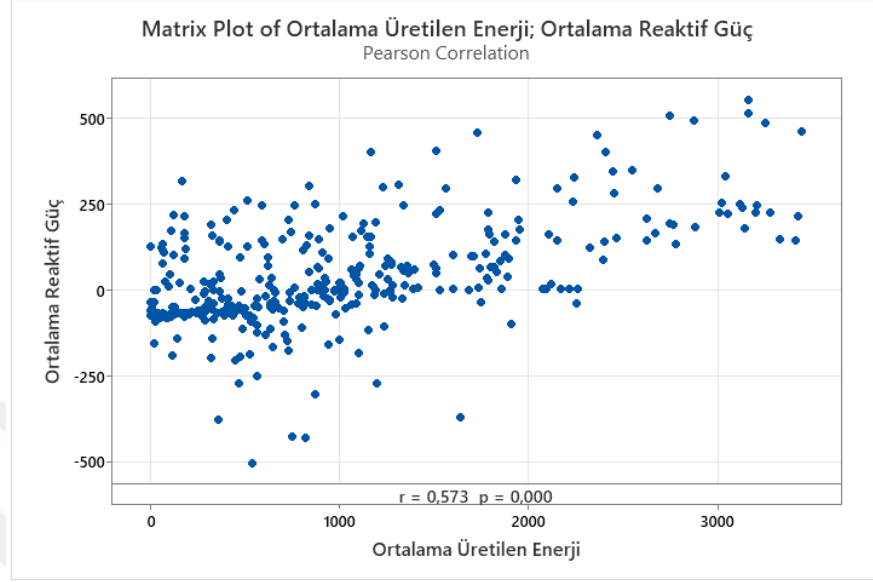
Şekil 3.4. Ortalama nase l pozisyonu ve ortalama üretilen enerji arasındaki ilişkiyi gösteren matris grafiği

Ortalama kanat açısı ve ortalama üretilen enerji arasındaki ilişki Şekil 3.5'te matris grafiği ile gösterilmiştir.



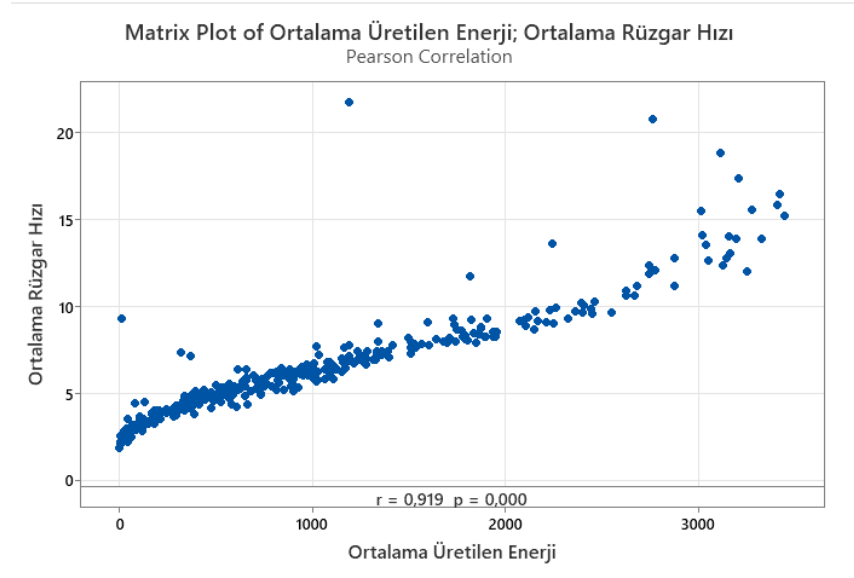
Şekil 3.5. Ortalama kanat açısı ve ortalama üretilen enerji arasındaki ilişkiyi gösteren matris grafiği

Ortalama reaktif güç ve ortalama üretilen enerji arasındaki ilişki Şekil 3.6 'da matris grafiği ile gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Ortalama reaktif güç ve ortalama üretilen enerji arasındaki ilişkiyi gösteren matris grafiği

Ortalama rüzgâr hızı ve ortalama üretilen enerji arasındaki ilişki Şekil 3.7'de matris grafiği ile gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Ortalama rüzgâr hızı ve ortalama üretilen enerji arasındaki ilişkiyi gösteren matris grafiği

Çıkış değişkeni ile giriş değişkenleri arasında yapılan korelasyon analizi sonuçları Çizelge 3.2’de verilmiştir. Korelasyon analizi sonuçlarına bakıldığında çok güçlü ve anlamlı en iyi sonucun ortalama rüzgâr hızı ve ortalama üretilen enerji arasındaki ilişkide olduğu görülür. Bu sonuç, rüzgâr hızındaki değişimin doğrudan ve etkili bir şekilde üretim değerini yani üretilen enerji etkilediğini ve aralarında anlamlı bir ilişki olduğunu gösterir. Ortalama ortam sıcaklığı ve ortalama üretilen enerji arasındaki ilişkiye bakıldığında ise anlamsız ve en kötü sonucun elde edildiği görülür. Bu durum da sıcaklık faktörünün üretim üzerinde çok zayıf bir etkisi olduğunu gösterir. Korelasyon analizi sonuçları, MATLAB programında yapılan tahmin analizleri için önemli bir ön değerlendirmedir. Bu sayede tahmin analizlerinin doğruluğunu artırmak için hangi değişkenlerin analize ekleneceğine karar verilir.

Çizelge 3.2. Çıkış değişkeni ile giriş değişkenleri arasındaki korelasyon analizi sonuçları

Değişken Adı	Korelasyon Katsayısı Değeri (r)	p-value Değeri	Korelasyon İlişkisi
Ortalama Rüzgâr Hızı	0,919	0,000	En güçlü pozitif ilişki
Ortalama Reaktif Güç	0,573	0,000	Orta düzeyde pozitif ilişki
Ortalama Kanat Açısı	-0,499	0,000	Orta düzeyde negatif ilişki
Ortalama Nasel Pozisyonu	0,109	0,037	Zayıf düzeyde pozitif ilişki
Ortalama Ortam Sıcaklığı	-0,043	0,417	Zayıf düzeyde negatif ilişki

Yapılan analiz çalışmasının son aşamasında tahmin değerlerini üretmek için MATLAB R2021b programı kullanılmıştır. MATLAB programı birçok sayısal ve algoritmik işlem yapıp kodlayabilen nitelikte grafik ara yüzü (GUI) bulunan bir matris laboratuvarıdır (MATrix LABoratory) (Uzunoğlu ve Onar, 2003). Analiz çalışması için MATLAB programı kullanılarak bulanık mantık yaklaşımı temel alınmıştır. Bulanık mantık yaklaşımının iki farklı yöntemi olan Sugeno ve Mamdani tabanlı çıkarım yöntemleri ile en iyi ve en ideal tahmin sonucuna ulaşabilmek için birçok analiz yapılmıştır.

3.3. Bulanık Mantık Yaklaşımı ile Modelleme

Çalışmada kullanılan bulanık mantık modelleri bu bölümde kısaca açıklanmıştır. Mamdani ve Sugeno tipi bulanık mantık modellerinin tasarımı özetlenmiştir. Giriş değişkenleri için uygun üyelik fonksiyonları tanımlanmış ve oluşturulan modeller aracılığıyla üretilen enerji çıktısına ait tahmin değerleri elde edilmiştir.

3.3.1. ANFIS - Sugeno tabanlı model eğitimi ve test süreci

Bulanık mantık yaklaşımının bir yöntemi olan Sugeno tabanlı çıkarım yöntemi ve ANFIS eğitimi ile en ideal tahmin sonucunu elde etmek için verilerden birçok farklı eğitim-test setleri oluşturulmuştur. Oluşturulan setler çeşitli üyelik fonksiyonları ve epoks değerleri ile test edilmiştir. Sugeno tabanlı çıkarım yönteminde en ideal sonucu elde etmek için denenen eğitim-test yüzdeleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Sugeno tabanlı çıkarım yönteminde en ideal sonucu elde etmek için denenen eğitim-test yüzdeleri

Eğitim seti	Test seti
% 50	% 50
% 75	% 25
% 80	% 20
% 90	% 10

Analiz edilen eğitim-test setleri arasında en ideal tahmin değeri %90'lık eğitim seti ve %10'luk test setinden elde edilmiştir. Bu bağlamda toplam 366 adet verisi bulunan veri setinin ilk 329 verisi eğitim, son 37 verisi test şeklinde oluşturulmuştur. En ideal sonucu veren eğitim-test seti seçildikten sonra üyelik fonksiyonu ve epok (*epochs*) parametreleri daha ayrıntılı bir şekilde ayarlanmıştır. Minitab programından elde edilen korelasyon değerine bakıldığında ortalama ortam sıcaklığı değişkeninin en az etkili olduğu görülmüştür. Bu durumdan dolayı ortalama ortam sıcaklığı değişkeninin dâhil olmadığı tahmin sonuçlarına da bakılmış ve analiz üzerindeki etkisi tespit edilmiştir. Analiz aşamasında veriler birçok kez öğrenme sürecinden geçirilmiştir. Modellerin öğrenme performansını ölçmek amacıyla RMSE, nRMSE, R^2 ve sMAPE değerlerine bakılmıştır. Yapılan tüm Sugeno ve Mamdani çıkarım yöntemlerinde tahmin hatalarını bulurken, MAPE hesaplaması yerine hem tahmin hem gerçek değeri dikkate alan ve daha

dengeli versiyon olan sMAPE hesaplamsı kullanılmıştır. Veriler arasında çok büyük farklar olması da sMAPE kullanımını desteklemiştir. Veri setinde farklı ölçeklerde birçok değişken bulunduğu için ve verilerin kıyaslanabilmesi açısından RMSE hesaplamasının yanı sıra nRMSE hesaplaması da yapılmıştır. Veri setinin sınırları belirli olduğundan nRMSE hesaplaması yapılırken Maksimum–Minimum Normalizasyonu kullanılmıştır. Öğrenme süreci gerçekleştirilirken analiz edilen üyelik fonksiyonları ve epok değerine ait RMSE, nRMSE, R^2 ve sMAPE değerleri Çizelge 3.4’te ve Çizelge 3.5’te verilmiştir.

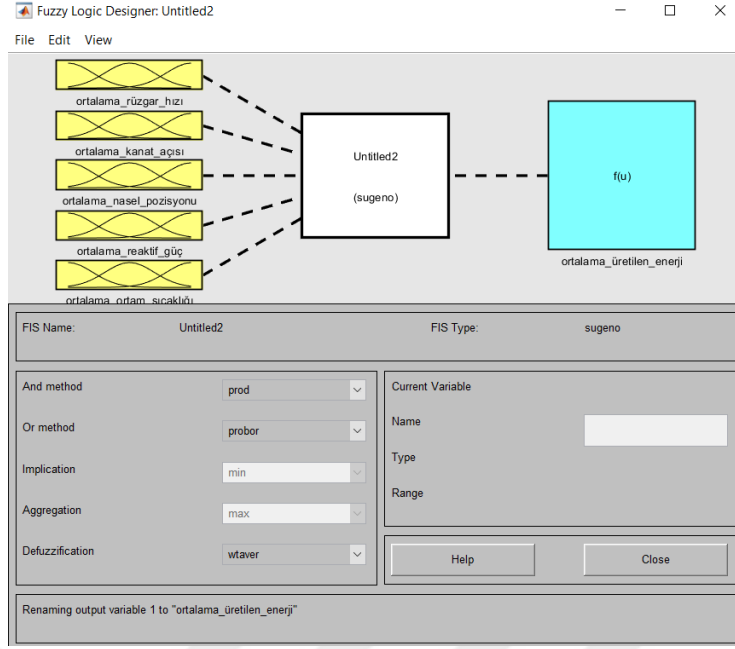
Çizelge 3.4. Tüm değişkenlerin dâhil olduğu RMSE, nRMSE, R^2 ve sMAPE sonuçları (329/37)

Üyelik Fonksiyonları	RMSE	nRMSE (%)	R^2	sMAPE (%)
Trim MF5- Epoks 100	354,6182	10,29	0,8384886	7,76
Trap MF5- Epoks 100	470,2013	13,65	0,719556	14,79
Gauss MF5-Epoks 100	314,9608	9,14	0,854427	7,34
Alt Kümeleme	141,0649	8,65	0,972601	27,81

Çizelge 3.5. Ortalama ortam sıcaklığı değerinin analizden çıkarıldığı RMSE, nRMSE, R^2 ve sMAPE sonuçları (329/37)

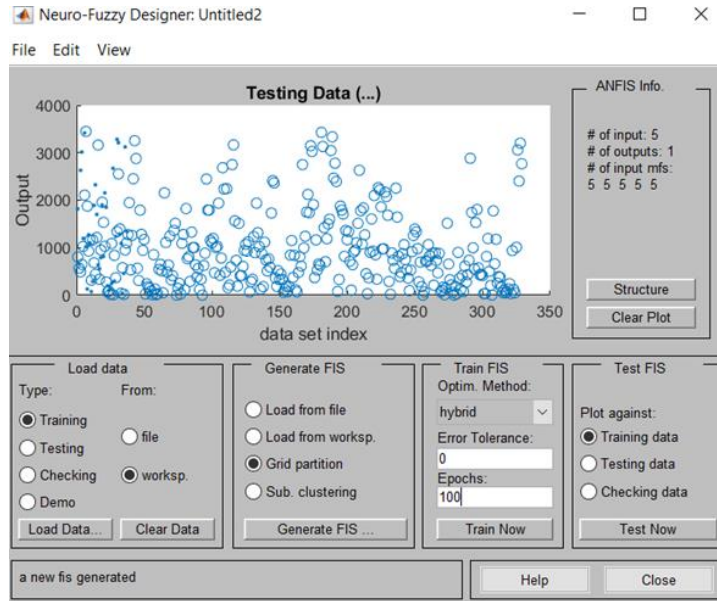
Üyelik Fonksiyonları	RMSE	nRMSE (%)	R^2	sMAPE (%)
Trim MF5- Epoks 100	1152,769	33,45	0,261589	13,66
Trap MF5- Epoks 100	1246,801	36,18	0,323397	23,99
Gauss MF5-Epoks 100	1840,111	53,40	0,170059	14,16
Alt Kümeleme	152,6753	4,43	0,967832	26,06

Çizelgelerde gösterilen sonuçlardan da anlaşılacağı üzere en ideal değerler tüm değişkenlerin analiz edildiği, üyelik fonksiyonu olarak Gauss, fonksiyon sayısı 5 ve epok değeri 100 olarak belirlenen modelde çıkmıştır. Başlangıçta ortalama ortam sıcaklığı değerinin modelden çıkarılması ön görülse de yapılan karşılaştırmalı analizler sonucunda ortalama ortam sıcaklığı değişkeninin modele dâhil edilmesi durumunda daha ideal sonuç ve daha az hata verdiği görülmüştür. Modelleme, Şekil 3.8’de gösterilen MATLAB programında bulunan Bulanık Mantık Tasarım (*Fuzzy Logic Designer*) ara yüzü, FIS editör Sugeno çıkarım yöntemi ile tasarlanmıştır.



Şekil 3.8. MATLAB Bulanık Mantık Tasarım ara yüzü (Sugeno)

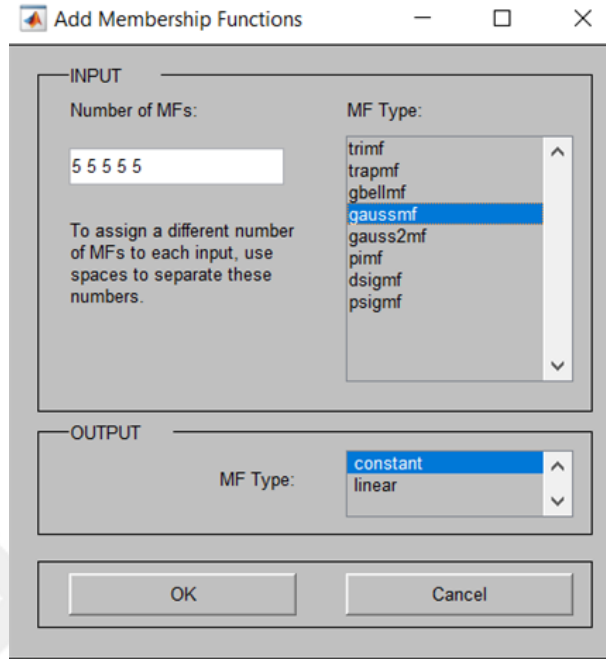
Eğitim-test setleri arasında en ideal tahmin değerine sahip olan %90'lık (329) eğitim seti ve %10'luk (37) test seti verilerinin ara yüze yüklenmiş hali Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



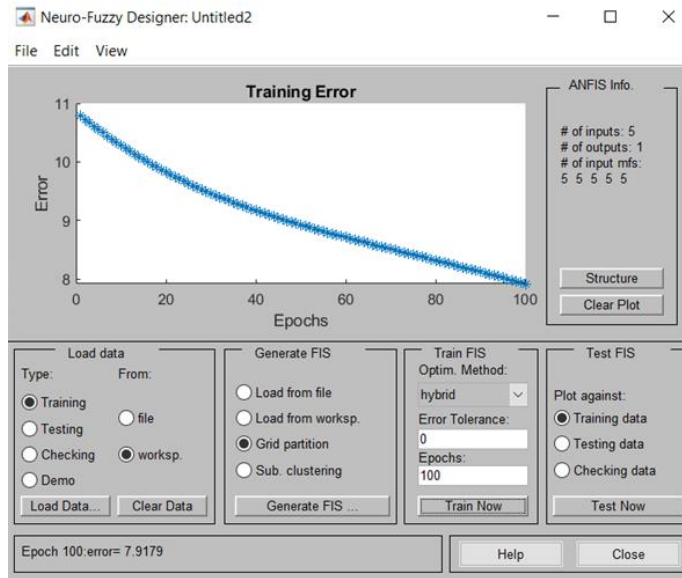
Şekil 3.9. MATLAB Bulanık Mantık Tasarım veri seti yükleme

Bütün değişkenlerin analiz edilerek en ideal sonuçların elde edildiği modelin üyelik fonksiyonu ve fonksiyon sayısı “Bulanık Çıkarım Sistemi Oluşturma” (*Generate FIS*) bölümünden Şekil 3.10'da gösterildiği gibi oluşturulmuştur. Daha sonra Şekil

3.11’de gösterildiği gibi Bulanık Mantık Modelinin Eğitimi (*Train FIS*) editöründe epok değeri 100 olacak şekilde ayarlanarak veriler öğrenme sürecine tabi tutulmuştur.



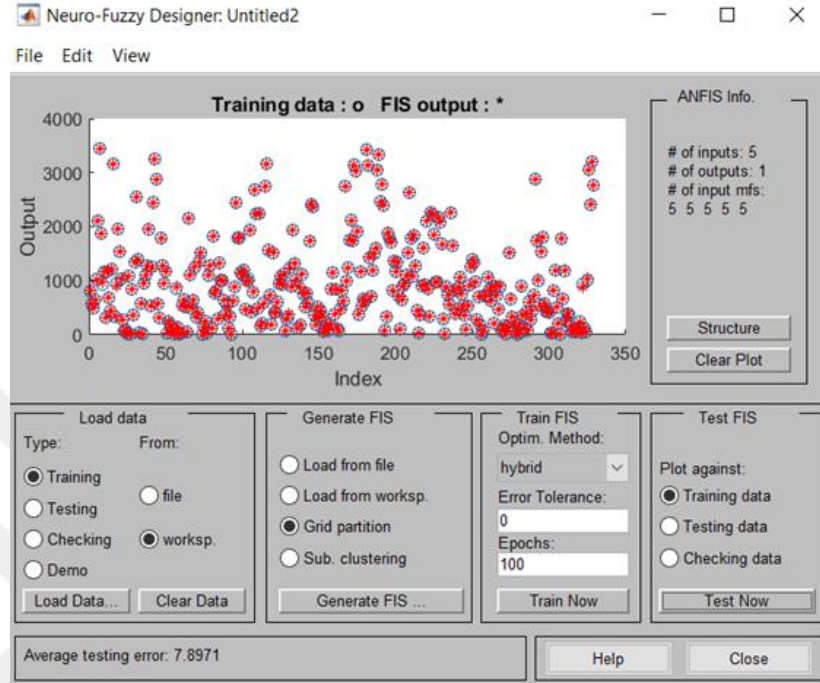
Şekil 3.10. Bulanık Çıkarım Sistemi’nde modele ait üyelik fonksiyonu ve fonksiyon sayısı belirleme



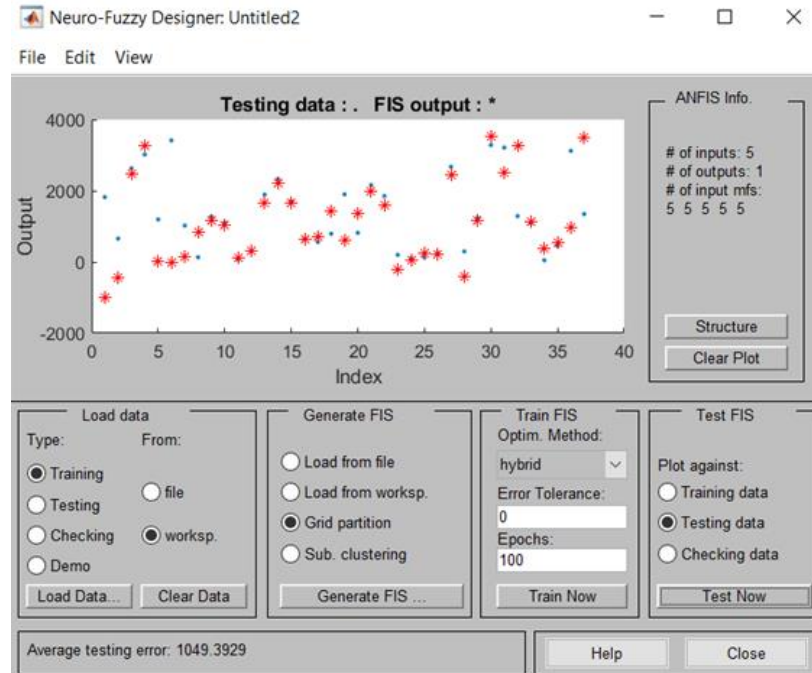
Şekil 3.11. Bulanık Mantık Modelinin Eğitimi editöründe epok değeri ayarlama

Öğrenme sürecinin tamamlanması ardından Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’te de gösterildiği gibi “Bulanık Çıkarım Sistemi Çıkışı” (*FIS output*) kısmından tahmini eğitim

ve test değerleri hata ölçütleri ile birlikte analiz edilmiştir. Öğrenme sürecine tabi tutulan rüzgâr türbinine ait gerçek değer verileri ve MATLAB bulanık mantık tasarımı yoluyla tahmin edilen veriler Çizelge 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.12. Bulanık Çıkarım Sistemi Çıkışı’ndan tahmini eğitim değerleri



Şekil 3.13. Bulanık Çıkarım Sistemi Çıkışı’ndan tahmini test değerleri

Çizelge 3.6. MATLAB bulanık mantık tasarımı ile tahmin edilen veriler

Tarih	(329-37) Gerçek Değerler	(329-37) GAUSS MF5 - Epok 100 Tahmini Değerler
1.01.2024	804,5659792	811,3001884
2.01.2024	568,0468868	571,1454788
3.01.2024	492,3386651	492,5906961
4.01.2024	649,2368021	645,9447262
5.01.2024	1027,937388	1024,301921
6.01.2024	2106,891935	2111,35382
7.01.2024	3447,964239	3447,978335
8.01.2024	1875,624087	1875,291355
9.01.2024	929,2780306	967,3626231
10.01.2024	1163,359028	1163,509335
11.01.2024	316,4304736	316,4276058
12.01.2024	1161,979379	1161,973873
13.01.2024	682,8687319	682,7715227
14.01.2024	439,5680583	439,3634373
15.01.2024	1214,926256	1209,020027
16.01.2024	3162,271697	3162,23911
17.01.2024	336,2142026	336,0382464
18.01.2024	952,9118208	912,9271122
19.01.2024	1957,381426	1956,559038
20.01.2024	1534,651816	1543,377013
21.01.2024	1032,554172	1033,1747
22.01.2024	278,7514903	278,9883373
23.01.2024	68,17197292	68,21756386
24.01.2024	85,13244792	81,92222856
25.01.2024	20,55789514	20,45665507
26.01.2024	1088,645061	1083,886958
27.01.2024	10,87722889	10,87768765
28.01.2024	838,6842458	838,6091153
29.01.2024	368,5603479	368,5652734
30.01.2024	1340,662502	1340,655896

Çizelge 3.6.(devam) MATLAB bulanık mantık tasarımı ile tahmin edilen veriler

Tarih	(329-37) Gerçek Değerler	(329-37) GAUSS MF5 - Epok 100 Tahmini Değerler
31.01.2024	2553,113913	2553,097305
1.02.2024	1395,709992	1395,879846
2.02.2024	42,41567361	42,38351312
3.02.2024	580,1634069	580,2464502
4.02.2024	19,42789236	19,42951486
5.02.2024	952,8117021	954,0860953
6.02.2024	1101,204333	1100,481764
7.02.2024	1276,381844	1274,036981
8.02.2024	1948,888903	1950,130904
9.02.2024	534,2535146	536,1857312
10.02.2024	1258,772944	1232,585289
11.02.2024	2452,654033	2445,92827
12.02.2024	3253,814334	3253,942431
13.02.2024	2877,750006	2877,702928
14.02.2024	569,4270285	569,3487886
15.02.2024	311,0198319	315,0745784
16.02.2024	1790,971309	1790,848244
17.02.2024	1281,680363	1271,207125
18.02.2024	945,2384667	945,7769765
19.02.2024	1173,634328	1177,754118
20.02.2024	26,00500833	26,01234417
21.02.2024	242,4281285	243,0107155
22.02.2024	179,9636875	179,3067686
23.02.2024	149,4755125	147,1773261
24.02.2024	93,29846319	94,06554872
25.02.2024	11,58151458	11,58764961
26.02.2024	853,5865271	893,5051507
27.02.2024	133,8891097	134,519768
28.02.2024	12,07743611	12,51401792
29.02.2024	29,14002083	31,95492361
1.03.2024	545,0129799	542,7301271

Çizelge 3.6.(devam) MATLAB bulanık mantık tasarımı ile tahmin edilen veriler

Tarih	(329-37) Gerçek Değerler	(329-37) GAUSS MF5 - Epok 100 Tahmini Değerler
2.03.2024	650,8297299	641,2143819
3.03.2024	508,7706931	508,3264139
4.03.2024	51,58515069	51,97997675
5.03.2024	2155,059192	2157,298578
6.03.2024	1110,023829	1110,004555
7.03.2024	489,158525	486,6315871
8.03.2024	636,0235833	637,1416373
9.03.2024	1245,496015	1246,075269
10.03.2024	323,3570146	323,3716713
11.03.2024	411,7586924	413,2192015
12.03.2024	1363,153529	1349,603498
13.03.2024	1514,210548	1509,86244
14.03.2024	2,643527778	2,661708523
15.03.2024	144,3677569	145,9742554
16.03.2024	251,3372979	253,8728039
17.03.2024	25,43597153	25,50569075
18.03.2024	1093,773794	1093,905899
19.03.2024	1278,682292	1283,246877
20.03.2024	120,2682069	121,882224
21.03.2024	1823,539217	1823,673445
22.03.2024	766,629475	766,5479821
23.03.2024	810,7748319	810,8384529
24.03.2024	291,4845806	293,4890569
25.03.2024	1329,632444	1321,689059
26.03.2024	1003,384748	1005,72839
27.03.2024	1005,36374	995,5455329
28.03.2024	637,3174993	652,2348131
29.03.2024	379,0171285	366,4513353
30.03.2024	565,0094326	522,8568309
31.03.2024	119,8683125	120,1683514
1.04.2024	336,246616	337,5966379

Çizelge 3.6.(devam) MATLAB bulanık mantık tasarımı ile tahmin edilen veriler

Tarih	(329-37) Gerçek Değerler	(329-37) GAUSS MF5 - Epok 100 Tahmini Değerler
2.04.2024	2,114743056	2,082532713
3.04.2024	626,1907882	624,0152783
4.04.2024	885,0395806	886,9778444
5.04.2024	2446,871941	2447,227382
6.04.2024	1793,56824	1793,328299
7.04.2024	1791,978561	1791,952335
8.04.2024	1154,501432	1154,468825
9.04.2024	1103,5128	1093,164362
10.04.2024	1197,305547	1197,79092
11.04.2024	472,4071222	472,6141319
12.04.2024	1001,843065	1004,095517
13.04.2024	1028,211924	1002,765778
14.04.2024	1938,318866	1937,962995
15.04.2024	418,6142861	419,3182157
16.04.2024	782,3156868	789,8331055
17.04.2024	2684,978565	2684,900822
18.04.2024	2236,067906	2235,470871
19.04.2024	483,9724569	493,1545757
20.04.2024	2243,610818	2243,620204
21.04.2024	156,4600764	156,3704357
22.04.2024	214,206728	214,0864099
23.04.2024	595,2137875	587,9632639
24.04.2024	2749,406691	2749,431488
25.04.2024	3166,313356	3166,282642
26.04.2024	1566,408631	1566,539187
27.04.2024	733,9373889	733,9294671
28.04.2024	192,076734	191,9575608
29.04.2024	1511,91734	1511,764592
30.04.2024	408,3900313	408,2924198
1.05.2024	414,8629743	415,7984589
2.05.2024	606,8472805	606,9318133

Çizelge 3.6.(devam) MATLAB bulanık mantık tasarımı ile tahmin edilen veriler

Tarih	(329-37) Gerçek Değerler	(329-37) GAUSS MF5 - Epok 100 Tahmini Değerler
3.05.2024	942,5022729	949,5821945
4.05.2024	1071,940171	1071,219826
5.05.2024	927,2622014	924,2455071
6.05.2024	1126,907466	1127,241886
7.05.2024	70,14709306	70,09758823
8.05.2024	285,7805755	285,2811944
9.05.2024	336,5482694	382,1838352
10.05.2024	1235,126444	1235,072576
11.05.2024	896,0474139	896,0096201
12.05.2024	1938,038051	1937,981417
13.05.2024	1316,665525	1317,213502
14.05.2024	1022,043153	1022,005455
15.05.2024	126,4581132	126,422413
16.05.2024	875,6651063	875,5210363
17.05.2024	180,7190319	180,7989835
18.05.2024	1117,355117	1117,713371
19.05.2024	745,1643951	745,1160685
20.05.2024	512,81075	512,797834
21.05.2024	766,3182778	765,9669368
22.05.2024	589,6855181	589,4390881
23.05.2024	1730,695351	1730,720229
24.05.2024	2412,173	2412,11038
25.05.2024	2365,111548	2365,130948
26.05.2024	365,7528146	365,3104655
27.05.2024	185,4537424	185,8357003
28.05.2024	514,9499069	512,6858924
29.05.2024	325,8487771	325,4255887
30.05.2024	447,5961285	447,7507152
31.05.2024	330,6980146	331,6826064
1.06.2024	62,59344167	62,6759313
2.06.2024	125,0066958	125,0464416

Çizelge 3.6.(devam) MATLAB bulanık mantık tasarımı ile tahmin edilen veriler

Tarih	(329-37) Gerçek Değerler	(329-37) GAUSS MF5 - Epok 100 Tahmini Değerler
3.06.2024	184,8874111	184,8340953
4.06.2024	71,77077569	71,77530271
5.06.2024	184,242983	184,2739458
6.06.2024	844,8429549	844,9710646
7.06.2024	1152,11454	1152,455957
8.06.2024	374,0939424	373,9836358
9.06.2024	840,2184424	840,4411105
10.06.2024	113,9380285	113,8481827
11.06.2024	69,99240417	69,95740164
12.06.2024	479,2247136	476,0221762
13.06.2024	810,0947111	810,0863367
14.06.2024	614,1131118	614,0691606
15.06.2024	2750,192017	2750,085382
16.06.2024	994,0438965	995,0847655
17.06.2024	1241,581353	1241,946717
18.06.2024	1751,286934	1751,925933
19.06.2024	2122,065462	2119,108495
20.06.2024	1737,425201	1741,324115
21.06.2024	3146,822012	3146,14941
22.06.2024	3026,332837	3026,569523
23.06.2024	1907,888501	1907,909554
24.06.2024	371,311277	371,6511929
25.06.2024	1165,165947	1165,123406
26.06.2024	528,7672569	528,7774429
27.06.2024	659,9932469	663,5129074
28.06.2024	625,4211493	624,1701432
29.06.2024	3428,278497	3428,185994
30.06.2024	3131,095367	3131,073814
1.07.2024	1420,225394	1438,738484
2.07.2024	706,0975083	705,099337
3.07.2024	1189,260263	1187,476447

Çizelge 3.6.(devam) MATLAB bulanık mantık tasarımı ile tahmin edilen veriler

Tarih	(329-37) Gerçek Değerler	(329-37) GAUSS MF5 - Epok 100 Tahmini Değerler
4.07.2024	1500,044426	1499,275723
5.07.2024	1602,048125	1602,140802
6.07.2024	3045,399518	3045,335365
7.07.2024	3334,094924	3334,387833
8.07.2024	2466,327931	2466,785325
9.07.2024	2780,520012	2780,45593
10.07.2024	2394,068638	2394,170212
11.07.2024	81,08271806	81,08210803
12.07.2024	331,5180785	331,3414852
13.07.2024	1877,345042	1882,627586
14.07.2024	1791,877799	1787,495244
15.07.2024	1709,679323	1710,308255
16.07.2024	819,1727424	823,359717
17.07.2024	1363,67077	1364,66154
18.07.2024	1168,580494	1159,738859
19.07.2024	1338,702167	1338,453016
20.07.2024	714,5118465	714,1675694
21.07.2024	108,0446047	108,1672008
22.07.2024	643,3873889	645,1376547
23.07.2024	909,8799222	911,4579659
24.07.2024	950,7259049	946,0988221
25.07.2024	1105,430588	1100,609083
26.07.2024	1514,453023	1514,688078
27.07.2024	2630,419353	2630,476003
28.07.2024	1780,097843	1778,371804
29.07.2024	1077,173458	1075,799622
30.07.2024	1836,951083	1837,105707
31.07.2024	1272,852702	1268,700548
1.08.2024	452,1677986	452,0969176
2.08.2024	32,77949444	32,78326937
3.08.2024	366,7710076	367,4073731

Çizelge 3.6.(devam) MATLAB bulanık mantık tasarımı ile tahmin edilen veriler

Tarih	(329-37) Gerçek Değerler	(329-37) GAUSS MF5 - Epok 100 Tahmini Değerler
4.08.2024	903,3634944	905,9255123
5.08.2024	1605,363165	1605,063651
6.08.2024	926,8900014	922,5449166
7.08.2024	2098,475592	2101,470701
8.08.2024	852,4136882	851,7316927
9.08.2024	337,2575336	338,9691315
10.08.2024	2263,724593	2262,919649
11.08.2024	2216,496668	2217,138643
12.08.2024	1860,588051	1857,69665
13.08.2024	974,3139208	966,9212359
14.08.2024	979,3289493	980,1529908
15.08.2024	2171,069824	2169,040077
16.08.2024	2079,18571	2078,132044
17.08.2024	1683,475426	1679,803758
18.08.2024	289,6567604	289,652714
19.08.2024	21,26352917	21,24938394
20.08.2024	889,4079132	889,2936578
21.08.2024	737,8155215	738,8659454
22.08.2024	566,0352208	566,2446601
23.08.2024	2254,253308	2254,056038
24.08.2024	1644,687781	1644,861866
25.08.2024	820,2191694	820,1928442
26.08.2024	391,46415	390,5476885
27.08.2024	476,0187059	476,04794
28.08.2024	876,3103672	875,6531731
29.08.2024	1065,71965	1062,457029
30.08.2024	750,1870208	750,2213894
31.08.2024	541,4285896	541,4487571
1.09.2024	361,4960333	361,4889375
2.09.2024	97,79760694	97,658022
3.09.2024	530,9972257	530,6402

Çizelge 3.6.(devam) MATLAB bulanık mantık tasarımı ile tahmin edilen veriler

Tarih	(329-37) Gerçek Değerler	(329-37) GAUSS MF5 - Epok 100 Tahmini Değerler
4.09.2024	917,0855229	915,299696
5.09.2024	1257,770817	1253,545469
6.09.2024	1393,954872	1389,77899
7.09.2024	1333,602175	1333,087589
8.09.2024	980,0283299	981,8152077
9.09.2024	282,7722368	282,7915445
10.09.2024	698,9777403	718,9074619
11.09.2024	181,3990894	181,6247871
12.09.2024	3,136631944	3,132016802
13.09.2024	68,11952222	68,13980531
14.09.2024	725,9351757	725,9712278
15.09.2024	707,7118979	707,6253026
16.09.2024	1066,754888	1067,239012
17.09.2024	829,2416979	829,5279799
18.09.2024	628,2782563	632,2833704
19.09.2024	883,7998271	881,9141202
20.09.2024	211,7154931	212,5757249
21.09.2024	891,9394125	916,9753416
22.09.2024	730,5928993	729,7601167
23.09.2024	471,3259667	472,6301615
24.09.2024	880,5152354	899,9284065
25.09.2024	70,58528951	70,87958527
26.09.2024	104,899309	105,01027
27.09.2024	168,5915174	168,6703781
28.09.2024	10,36719028	10,38645745
29.09.2024	150,150659	150,0286142
30.09.2024	1515,655178	1514,677983
1.10.2024	657,3870854	676,9557925
2.10.2024	327,1175125	342,8855583
3.10.2024	219,1143097	222,1839671
4.10.2024	64,23445145	64,22956393

Çizelge 3.6.(devam) MATLAB bulanık mantık tasarımı ile tahmin edilen veriler

Tarih	(329-37) Gerçek Değerler	(329-37) GAUSS MF5 - Epok 100 Tahmini Değerler
5.10.2024	3,463108333	3,47329217
6.10.2024	187,5676958	190,7034926
7.10.2024	29,32586111	28,22592912
8.10.2024	901,1308883	894,6563115
9.10.2024	356,3614604	352,4397789
10.10.2024	122,631591	122,846575
11.10.2024	414,3410257	406,5523285
12.10.2024	78,05288889	79,25244899
13.10.2024	613,4003208	605,5655669
14.10.2024	276,1670486	266,7259863
15.10.2024	433,900434	437,4156315
16.10.2024	736,6860417	737,0715126
17.10.2024	2882,244865	2882,313473
18.10.2024	1742,419339	1741,704351
19.10.2024	998,3959965	1011,822593
20.10.2024	555,3387729	543,8623158
21.10.2024	1530,594091	1530,215124
22.10.2024	1804,82526	1803,156743
23.10.2024	576,020875	574,5292984
24.10.2024	430,8116257	428,332949
25.10.2024	441,1594424	440,9631167
26.10.2024	411,8010944	411,6056521
27.10.2024	33,48237292	32,62745189
28.10.2024	35,05626111	35,71513682
29.10.2024	815,2151035	818,3815874
30.10.2024	1193,288656	1200,254352
31.10.2024	501,8364035	503,7855562
1.11.2024	205,2999132	204,5466828
2.11.2024	3,656470139	3,647040998
3.11.2024	1776,268862	1778,496089
4.11.2024	661,6679597	660,9049763

Çizelge 3.6.(devam) MATLAB bulanık mantık tasarımı ile tahmin edilen veriler

Tarih	(329-37) Gerçek Değerler	(329-37) GAUSS MF5 - Epok 100 Tahmini Değerler
5.11.2024	1177,874939	1180,489225
6.11.2024	256,0998118	256,5979341
7.11.2024	392,2866514	391,7893801
8.11.2024	378,3739139	380,1088939
9.11.2024	169,6850653	169,7205115
10.11.2024	53,77542569	51,4273283
11.11.2024	111,882416	102,0472788
12.11.2024	48,61965903	50,67576623
13.11.2024	67,27318056	69,87788802
14.11.2024	134,1895691	134,4904191
15.11.2024	244,3088403	240,3362023
16.11.2024	36,25743056	36,22255605
17.11.2024	939,614384	878,2102948
18.11.2024	120,7345757	120,5191318
19.11.2024	49,47905833	49,55682806
20.11.2024	1010,321494	1048,648129
21.11.2024	3058,361885	3058,28705
22.11.2024	2403,397033	2407,10807
23.11.2024	3201,937747	3201,892414
24.11.2024	2767,996774	2767,982397
25.11.2024	1819,706035	-1014,688147
26.11.2024	656,4773368	-429,9406619
27.11.2024	2629,639407	2482,37417
28.11.2024	3014,643555	3261,031781
29.11.2024	1194,401193	19,78514345
30.11.2024	3414,892322	-18,0037414
1.12.2024	1022,292376	153,1470743
2.12.2024	130,5916281	823,8131468
3.12.2024	1270,833938	1155,237897
4.12.2024	1102,03348	1047,255507
5.12.2024	75,00742569	121,8352702

Çizelge 3.6.(devam) MATLAB bulanık mantık tasarımı ile tahmin edilen veriler

Tarih	(329-37) Gerçek Değerler	(329-37) GAUSS MF5 – Epok 100 Tahmini Değerler
6.12.2024	290,8973215	311,1344129
7.12.2024	1892,381691	1647,037073
8.12.2024	2324,765902	2212,191774
9.12.2024	1699,210233	1641,73074
10.12.2024	639,9944632	639,1630717
11.12.2024	560,6380507	702,5579542
12.12.2024	791,0695944	1414,798669
13.12.2024	1898,417685	614,0656232
14.12.2024	816,5911722	1346,031496
15.12.2024	2154,026139	1978,339107
16.12.2024	1850,505407	1600,027042
17.12.2024	200,7602847	-204,8968709
18.12.2024	95,94840278	54,06725226
19.12.2024	126,2646965	262,17637
20.12.2024	247,3523739	218,1795625
21.12.2024	2672,00313	2457,119064
22.12.2024	295,7677299	-426,0467489
23.12.2024	1237,199325	1147,57917
24.12.2024	3281,635665	3516,868948
25.12.2024	3209,900895	2502,391243
26.12.2024	1286,335838	3262,533941
27.12.2024	1090,070055	1126,300367
28.12.2024	44,12845625	392,1038691
29.12.2024	459,0459958	549,0737567
30.12.2024	3121,273142	974,1288692
31.12.2024	1344,970278	3479,856756

3.3.2. k-kat çapraz doğrulama ve parametre ayarı

En ideal sMAPE, R^2 , nRMSE ve RMSE sonucu veren tahmin verilerine sahip model (tüm değişkenlerin analiz edildiği, üyelik fonksiyonu olarak Gauss, fonksiyon sayısı 5 ve epok değeri 100 olarak belirlenen model) temel alınarak doğrulama işlemi gerçekleştirmek için k-kat çaprazlama yöntemi kullanılmıştır.

Sınıflandırma algoritmalarının başarı düzeyi çoğunlukla k-kat çapraz doğrulama yöntemiyle değerlendirilir. Bu yöntemde veri kümesi, yaklaşık olarak aynı sayıda örnek barındıran ve birbiriyle çakışmayan k alt parçaya (*fold*) rastgele ayrılır. Ardından her bir parça, kalan k-1 parçadan oluşturulan modelin test edilmesinde sırayla kullanılır. Ancak bölme işleminin rastgele yapılması, doğruluk tahminlerinin varyansını artırabileceğinden istatistiksel çıkarım açısından sorun teşkil edebilir (Breiman, 1996; Wong ve Yeh, 2020).

k-kat çaprazlama yöntemini gerçekleştirmek için toplam 366 adet verisi bulunan veri setinin 10 parçaya ayrılarak 10 kat çaprazlamaya tabi tutulmasına karar verilmiştir. Çizelge 3.7’de 10 kat çaprazlamanın her bir katına ait eğitim-test dağılımı gösterilmektedir. Veri setinin 10 kat çaprazlamaya tabi tutulmasının öncelikli sebebi en ideal sonuçların veri setinin %90 eğitim, %10 test şeklinde ayrıldığında alınmasıdır. Bunun yanı sıra (Breiman, 1996; Witten vd., 2011) yaptıkları çalışmalarda 10 kat çaprazlamanın diğer çaprazlama sayılarına nazaran daha iyi bir sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir.

Yapılan geniş kapsamlı deneyler ve teorik çalışmalar, hata tahmini açısından en ideal kat sayısının yaklaşık 10 olduğunu ortaya koymuştur. Her ne kadar bu bulgular kesinlik taşımıyor olsa da, 10 katlı çapraz doğrulama uygulamada yaygın biçimde tercih edilen standart yöntem haline gelmiştir. Ayrıca, tabakalı yaklaşımın sonuçları bir miktar iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, özellikle veri miktarının sınırlı olduğu durumlarda, tabakalı 10 katlı çapraz doğrulama temel değerlendirme yöntemi olarak kabul edilmektedir. Bu yöntemde veri, sınıfların dağılımı korunarak 10 alt gruba ayrılır. Her gruptan biri test için ayrılırken, kalan dokuz grup eğitim amacıyla kullanılır. Bu işlem 10 kez yinelenir ve her denemede elde edilen hata değerlerinin ortalaması alınarak genel hata tahmini hesaplanır (Witten vd., 2011).

Çizelge 3.7. 10 kat çaprazlama eğitim-test ayrımı gösterimi

	37 veri	37 veri	37 veri	37 veri	37 veri	37 veri	36 veri	36 veri	36 veri	36 veri
1. Kat	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Test
2. Kat	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Test	Eğitim
3. Kat	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Test	Eğitim	Eğitim
4. Kat	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Test	Eğitim	Eğitim	Eğitim
5. Kat	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Test	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim
6. Kat	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Test	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim
7. Kat	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Test	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim
8. Kat	Eğitim	Eğitim	Test	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim
9. Kat	Eğitim	Test	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim
10. Kat	Test	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim	Eğitim

k-kat çaprazlama yöntemini gerçekleştirmek için ilk olarak toplam 366 adet verisi bulunan veri seti 10 parçaya ayrılmıştır. 10 parça içerisinde 1 parça sırayla test ve geri kalan 9 parça eğitim olarak belirlenerek 10 kez tekrar edilen bir döngüye maruz bırakılmıştır. Yani 10 katlık bir çaprazlama gerçekleştirilmiştir. Bu gerçekleştirilen 10 kat çaprazlama esnasında her kat ızgara yöntemi (mf3 mf4 ve mf5) ve alt küme yöntemi kullanarak MATLAB programıyla ayrı ayrı işleme tabi tutulmuştur. Sugeno tabanlı çıkarım yöntemi ile veri kümesi analizinden çıkan sonuçlar neticesinde en ideal değerlere, üyelik fonksiyonu olarak Gauss ve epok değeri 100 olarak belirlenen model ile ulaşıldığı gözlemlendiği için 10 kat çaprazlama parametre ayarı yapılırken bu değerler temel alınmıştır. 10 kat çaprazlamanın her katına ait sMAPE, R^2 , nRMSE ve RMSE sonuçları ve bu katların ortalama değerleri Excel programı aracılığı ile hesaplanmıştır. Çizelge 3.8, Çizelge 3.9, Çizelge 3.10 ve Çizelge 3.11’de 10 kat çaprazlamanın her katına ait sMAPE, R^2 , nRMSE ve RMSE değerleri ve bu katların ortalama değerleri yer almaktadır.

Çizelge 3.8. 10 kat çaprazlamanın her katına ait sMAPE değerleri ve ortalaması

sMAPE	mf3 (%)	mf4 (%)	mf5 (%)	Alt Kümeleme (%)
1. Kat	16,52543	10,80922062	7,001491	26,98959
2. Kat	14,77238	11,7729	9,231486	24,72796
3. Kat	14,5989	9,320253	6,70558	24,55463
4. Kat	14,29805	10,86609	11,08889	27,63093
5. Kat	13,51609	7,91797	6,3229	26,42695
6. Kat	15,66924	11,55989	6,790249	23,56495
7. Kat	15,18513	13,14436	12,36674	24,40276
8. Kat	13,79777	8,854783	6,862997	23,3638
9. Kat	14,60984	9,736646	7,353615	26,20776
10. Kat	16,7012	11,67169	9,672455	25,53264
Ortalama	14,967403	10,56538026	8,3396403	25,340197

Çizelge 3.9. 10 kat çaprazlamanın her katına ait R^2 değerleri ve ortalaması

R^2	mf3	mf4	mf5	Alt Kümeleme
1. Kat	0,3004	0,596309	0,876616	0,975454
2. Kat	0,144854	0,802584	0,944418	0,979308
3. Kat	0,989314	0,834863	0,978056	0,977565
4. Kat	0,905193	0,758628	0,740311	0,972013
5. Kat	0,980112	0,951216	0,915511	0,974785
6. Kat	0,961881	0,785671	0,890146	0,977923
7. Kat	0,98725	0,624892	0,874008	0,978276
8. Kat	0,987188	0,775394	0,873656	0,981744
9. Kat	0,982875	0,958423	0,943537	0,978356
10. Kat	0,740198	0,743267	0,853687	0,973876
Ortalama	0,797926	0,783125	0,888995	0,97693

Çizelge 3.10. 10 kat çaprazlamanın her katına ait RMSE değerleri ve ortalaması

RMSE	mf3	mf4	mf5	Alt Kümeleme
1. Kat	955,0597	594,9549	304,8241	133,4237
2. Kat	2836,359	410,4563	202,5072	122,5242
3. Kat	88,23442	365,2634	127,1231	127,5135
4. Kat	268,1202	475,5176	516,7323	142,6325
5. Kat	122,2368	189,6205	265,6398	135,2533
6. Kat	167,1227	456,3344	289,3499	127,691
7. Kat	96,11982	660,4834	328,5411	126,0616
8. Kat	96,54686	456,9831	324,3362	115,0748
9. Kat	111,5252	174,4507	212,1255	125,2589
10. Kat	531,0442	513,1469	346,2609	138,1048
Ortalama	527,2369	429,7211	291,744	129,3538

Çizelge 3.11. 10 kat çaprazlamanın her katına ait nRMSE değerleri ve ortalaması

nRMSE	mf3	mf4	mf5	Alt Kümeleme
1. Kat	0,277162346	0,172658413	0,088461243	0,03872
2. Kat	0,823123343	0,119116157	0,058768428	0,035557
3. Kat	0,025605999	0,106000973	0,036891643	0,037005
4. Kat	0,077809619	0,137997192	0,149957898	0,041393
5. Kat	0,035473626	0,055028653	0,077089787	0,039251
6. Kat	0,048499699	0,13243016	0,083970561	0,037056
7. Kat	0,027894376	0,191675051	0,095344018	0,036584
8. Kat	0,028018305	0,132618409	0,094123719	0,033395
9. Kat	0,154111264	0,148917377	0,100486355	0,040079
10. Kat	0,154111264	0,148917377	0,100486355	0,040079
Ortalama	0,165180984	0,134535976	0,088558001	0,037912

3.3.3. Mamdani tabanlı model süreci

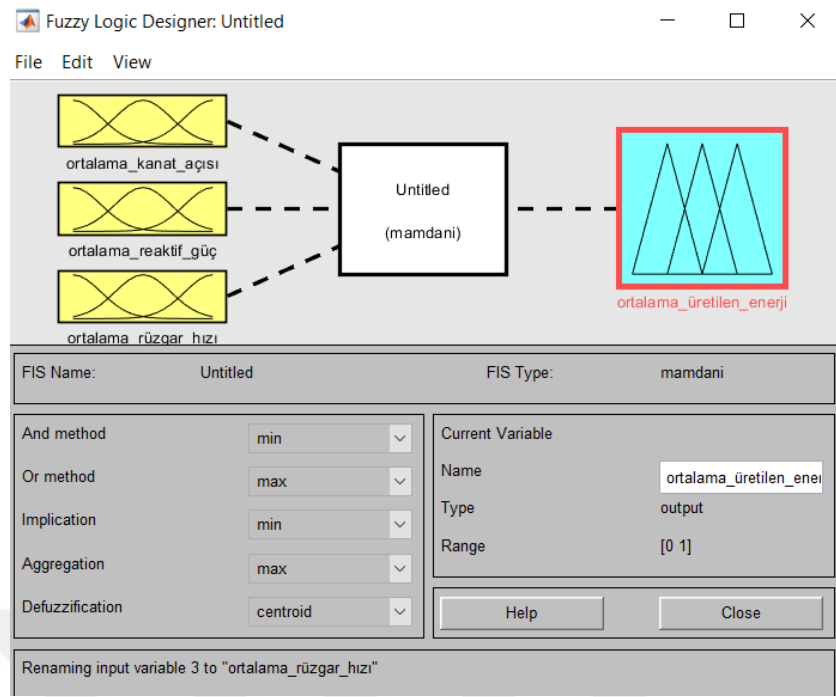
Bulanık mantık yaklaşımının bir yöntemi olan Sugeno tabanlı çıkarım yöntemi ile birçok ANFIS temelli modellemeler yapıp, en ideal tahmin sonuçları elde edilmiştir. Sugeno tabanlı çıkarım yöntemine ek ve destekleyici olması açısından klasik çıkarım yöntemi olan Mamdani çıkarım yöntemi de veri setine uygulanmış ve farklı modelleme süreçleri gözlemlenmiştir. Modellemeler, MATLAB programında bulunan Bulanık Mantık Tasarım (*Fuzzy Logic Designer*) ara yüzünde tasarlanmıştır.

Analizde, Mamdani çıkarım yöntemi birçok farklı model üzerinde uygulanmış ve en ideal değerler elde edilmeye çalışılmıştır. Çıkış parametresi her modelleme için ortalama üretilen enerjidir. Giriş parametreleri ise ilk olarak; ortalama rüzgâr hızı, ortalama reaktif güç, ortalama kanat açısı ve ortalama nasel pozisyonu olarak belirlenmiştir. Daha sonra ortalama nasel pozisyonu ve ortalama nasel pozisyonu ile birlikte kanat açısı sırayla çıkarılarak modellemeler oluşturulmuştur. Modelleme için gerekli olan gösterge aralıkları, tüm parametrelerin verileri içerisindeki en yüksek ve en düşük değerler ile belirlenmiştir. Çizelge 3.12’de bu parametrelerin verilerine ait en yüksek ve en düşük değerler gösterilmiştir.

Çizelge 3.12. Parametrelerin verilerine ait en yüksek ve en düşük değerler

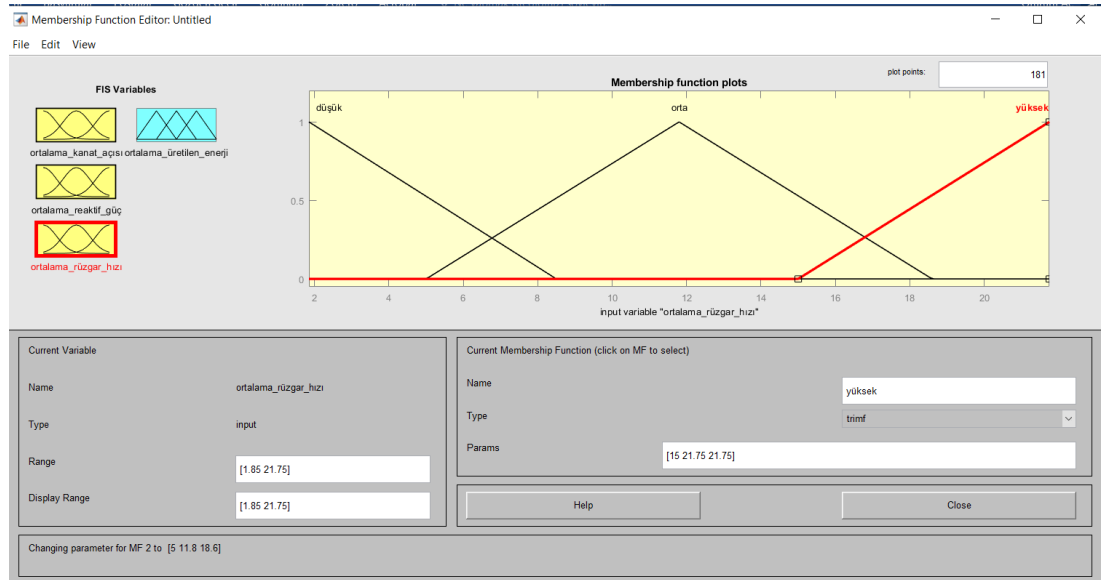
	Ortalama Üretilen Enerji	Ortalama Ortam Sıcaklığı	Ortalama Nasel Pozisyonu	Ortalama Kanat Açısı	Ortalama Reaktif Güç	Ortalama Rüzgâr Hızı
En yüksek	3447,9642	28,79787	346,46041	69,67922222	554,4186993	21,74542324
En düşük	2,1147430	-6,38007	14,296793	-0,368988889	-502,271393	1,84525625

Yapılan analizler sonucunda, ortalama rüzgâr hızı, ortalama reaktif güç ve ortalama kanat açısının giriş değişkeni olarak belirlendiği modelin gerçek değerlere en yakın sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Şekil 3.14’te gösterilen model, MATLAB programında bulunan Bulanık Mantık Tasarım (*Fuzzy Logic Designer*) ara yüzü, Mamdani çıkarım yöntemi ile tasarlanmıştır.

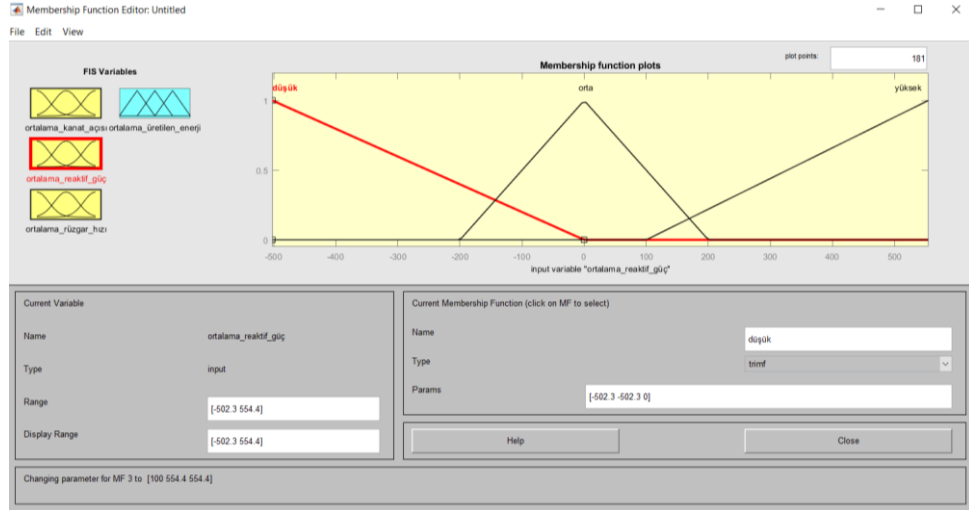


Şekil 3.14. MATLAB Bulanık Mantık Tasarım ara yüzü (Mamdani)

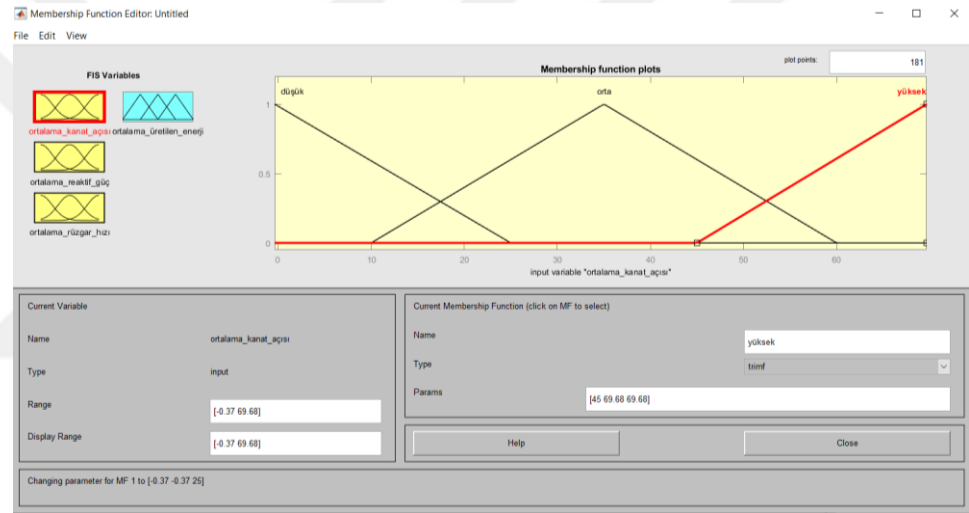
Şekil 3.15, Şekil 3.16, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’ de ortalama rüzgâr hızı, ortalama reaktif güç, ortalama kanat açısı, ortalama üretilen enerji parametrelerine ait üyelik fonksiyonlarının grafiksel gösterimi verilmiştir.



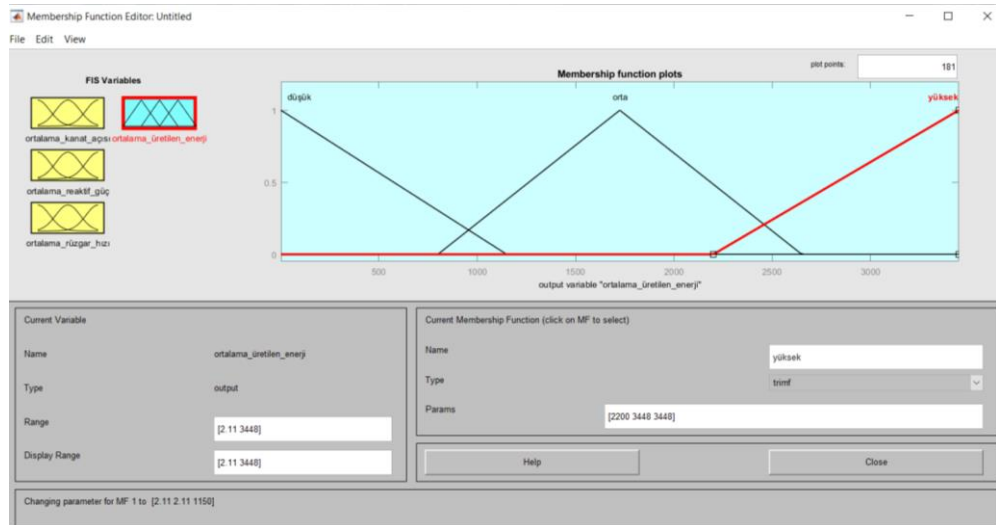
Şekil 3.15. Ortalama rüzgâr hızı üyelik fonksiyonlarının grafiksel gösterimi



Şekil 3.16. Ortalama reaktif güç üyelik fonksiyonlarının grafiksel gösterimi

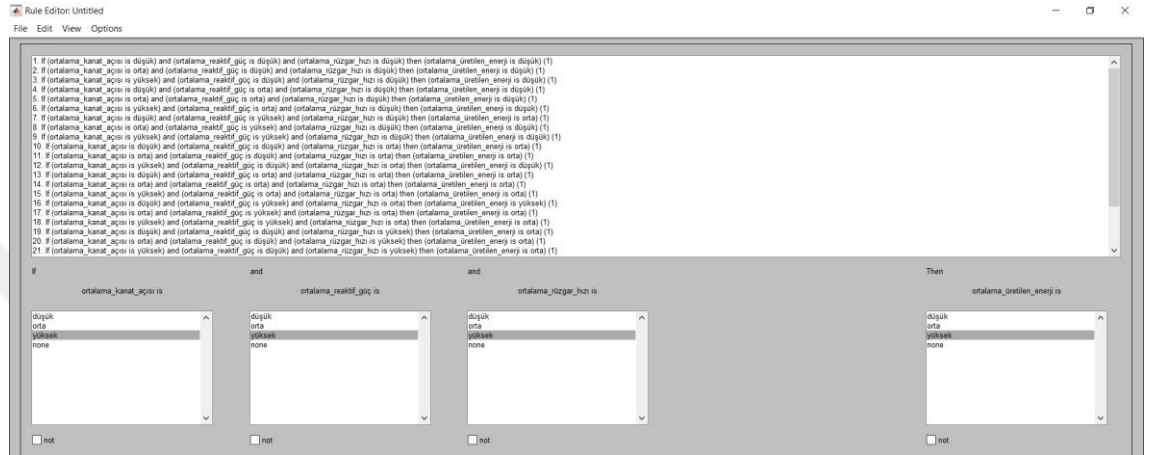


Şekil 3.17. Ortalama kanat açısı üyelik fonksiyonlarının grafiksel gösterimi

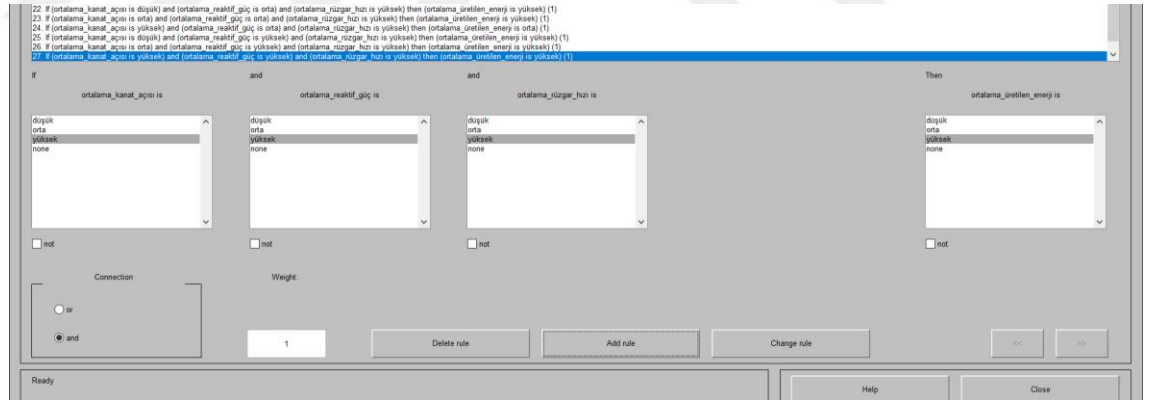


Şekil 3.18. Ortalama üretilen enerji üyelik fonksiyonlarının grafiksel gösterimi

Kural sayısı, (üyelik fonksiyonu sayısı)^{giriş değişkeni sayısı} şeklinde bulunmaktadır. 3 giriş değişkeni ve her giriş değişkenine ait 3 kural (düşük, orta, yüksek) ile 27 adet kural fonksiyonu oluşturulmuştur. Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de Kural Düzenleyici (*Rule Editor*) ekranında oluşturulan 27 adet kural gösterilmektedir. Kurallar oluşturulurken Minitab programından elde edilen korelasyon sonuçları dikkate alınmıştır. Değişkenler arasındaki tutarlı ilişki bu sayede sağlanmıştır.



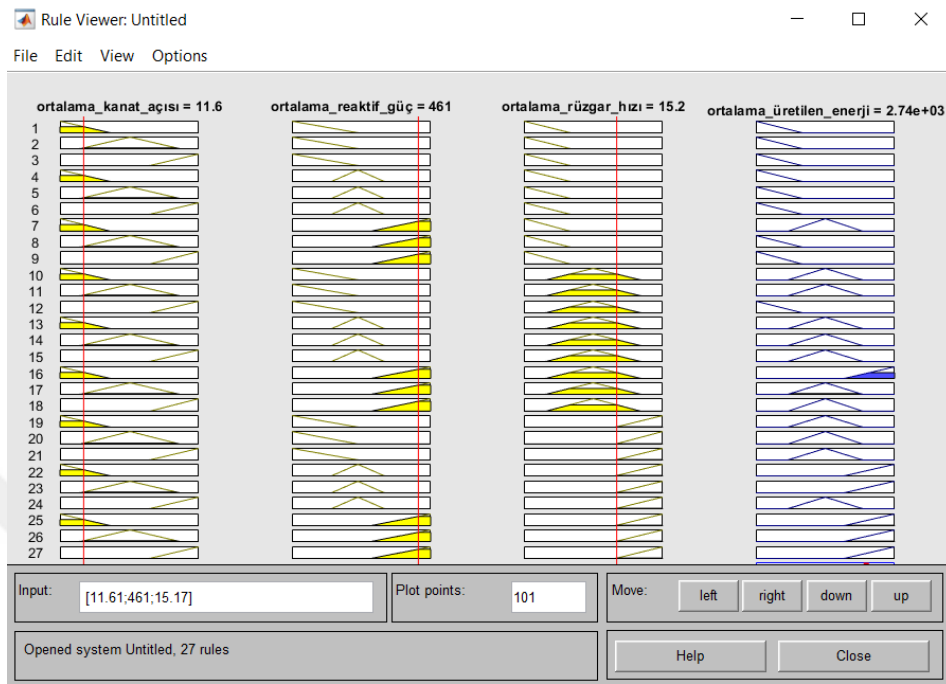
Şekil 3.19. Mamdani tabanlı kural fonksiyonu gösterimi (1-21)



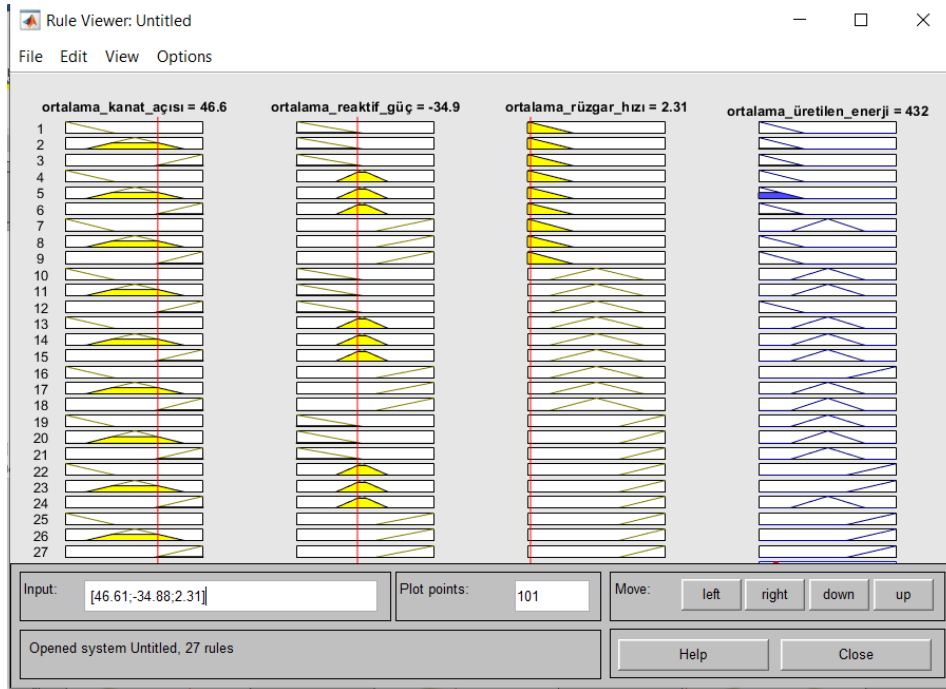
Şekil 3.20. Mamdani tabanlı kural fonksiyonu gösterimi (22-27)

Kural sayısı belirlenip, kurallar yazıldıktan sonraki aşamada model test edilmiştir. Bunun için 366 gün içinden rastgele 10 adet gün belirlenmiştir. Bu seçilen tarihlere ait çıkış değerleri (ortalama üretilen enerji) ile Mamdani tabanlı çıkarım yönteminden elde edilen ortalama üretilen enerji değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 3.21, Şekil 3.22, Şekil 3.23, Şekil 3.24, Şekil 3.25, Şekil 3.26, Şekil 3.27, Şekil 3.28, Şekil 3.29 ve Şekil 3.30’da Kural Görüntüleyicisinde (*Rule Viewer*) yer alan kural tabanının görselleştirilmiş hali ve

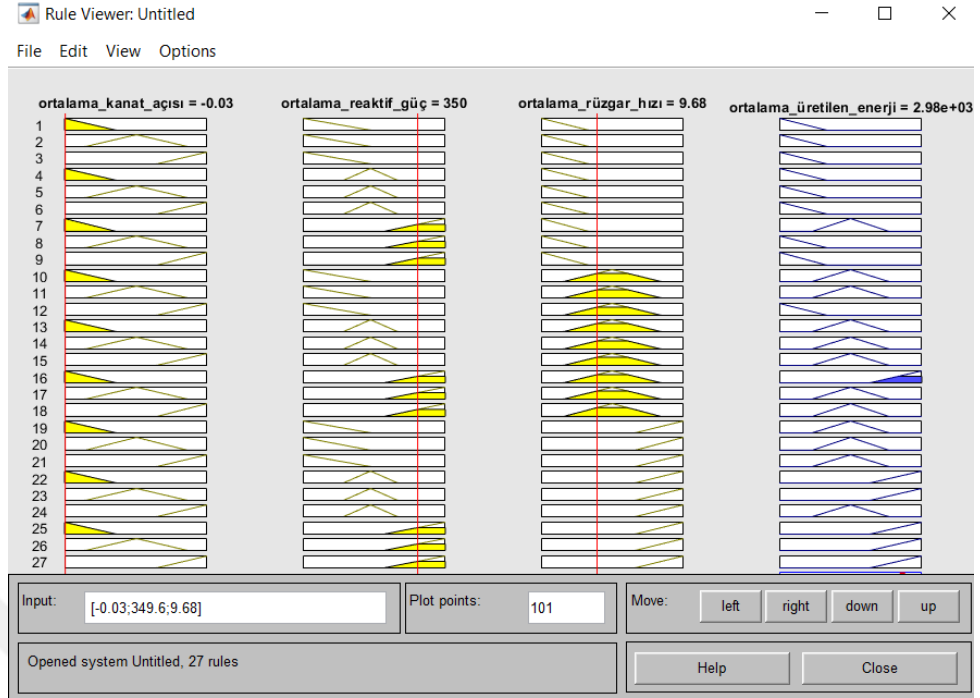
Mamdani tabanlı çıkarım yönteminden elde edilen çıkış değerleri (ortalama üretilen enerji) yer almaktadır.



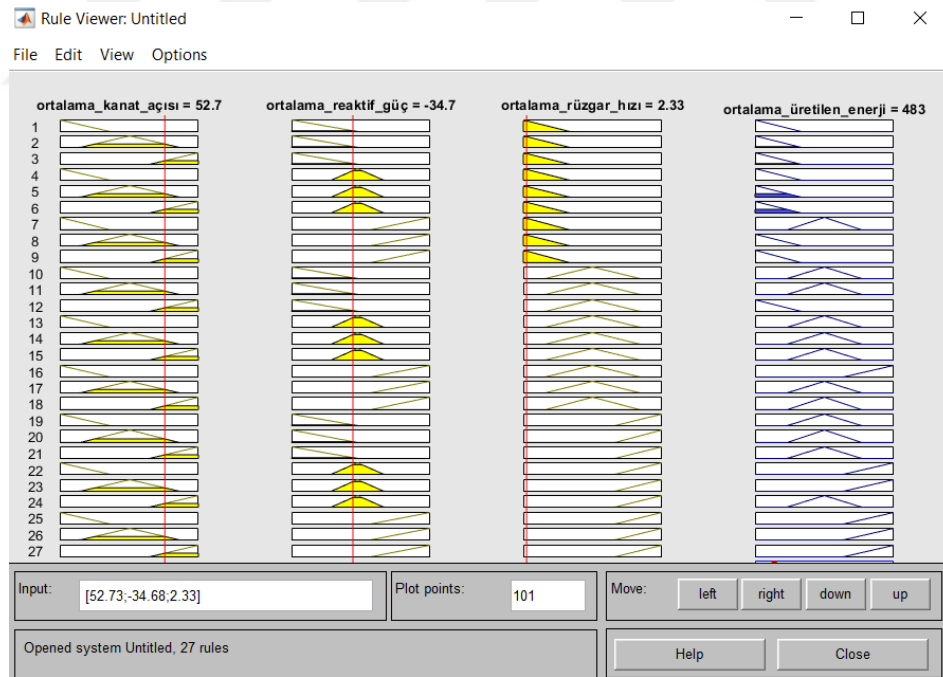
Şekil 3.21. 07.01.2024 mamdani tabanlı çıkarım yönteminden elde edilen ortalama üretilen enerji değeri



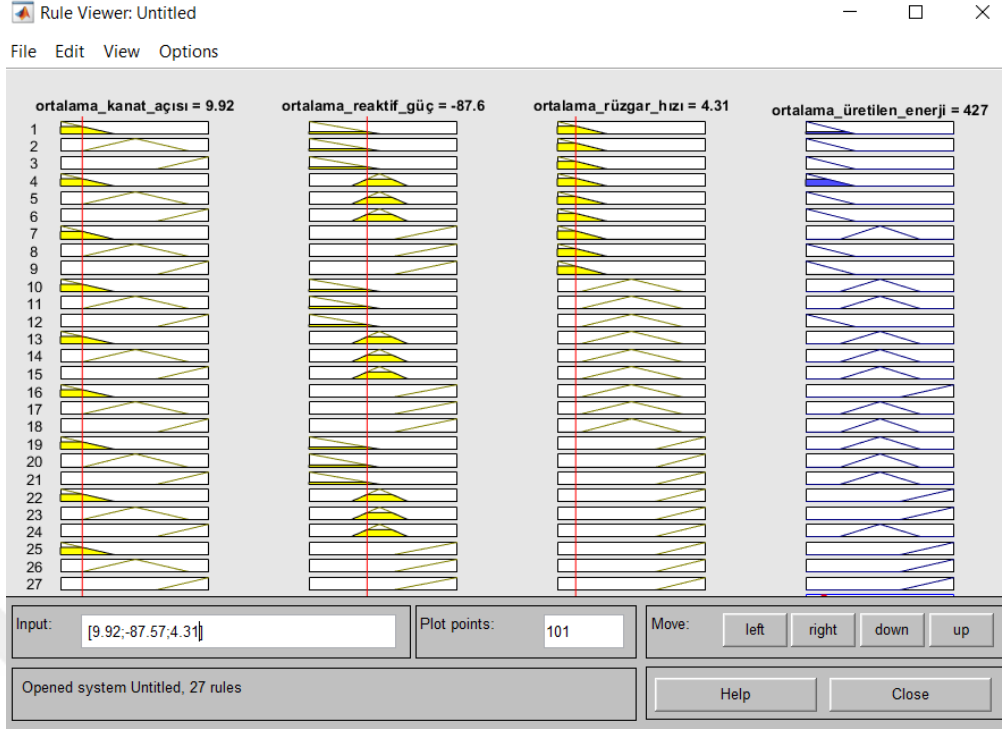
Şekil 3.22. 25.01.2024 tarihine ait mamdani tabanlı çıkarım yönteminden elde edilen ortalama üretilen enerji değeri



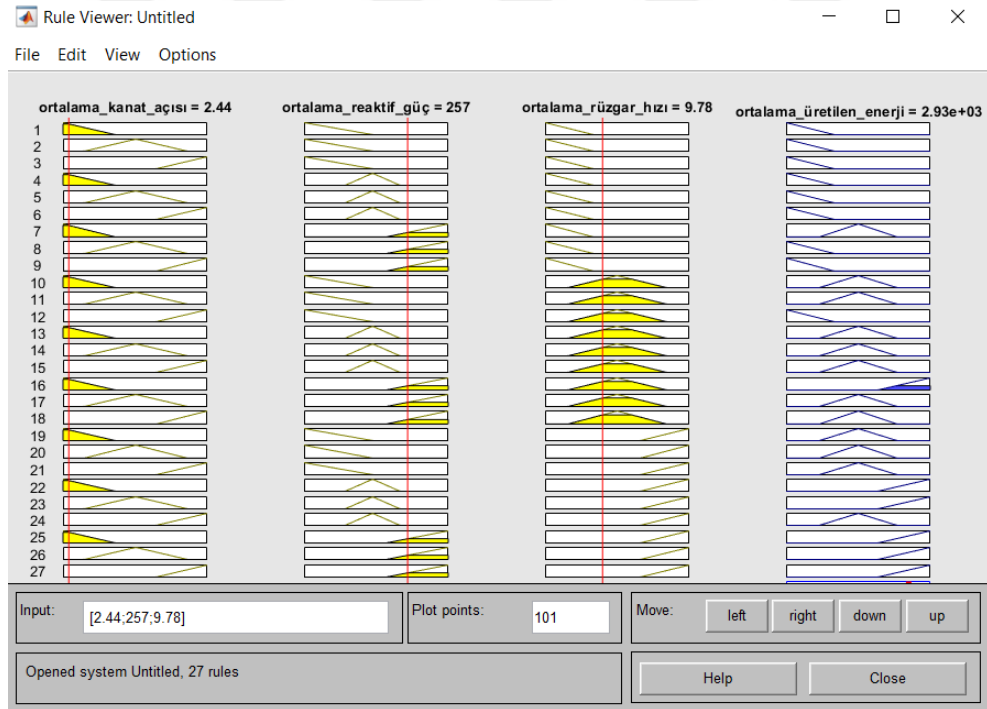
Şekil 3.23. 31.01.2024 tarihine ait mamdani tabanlı çıkarım yönteminden elde edilen ortalama üretilen enerji değeri



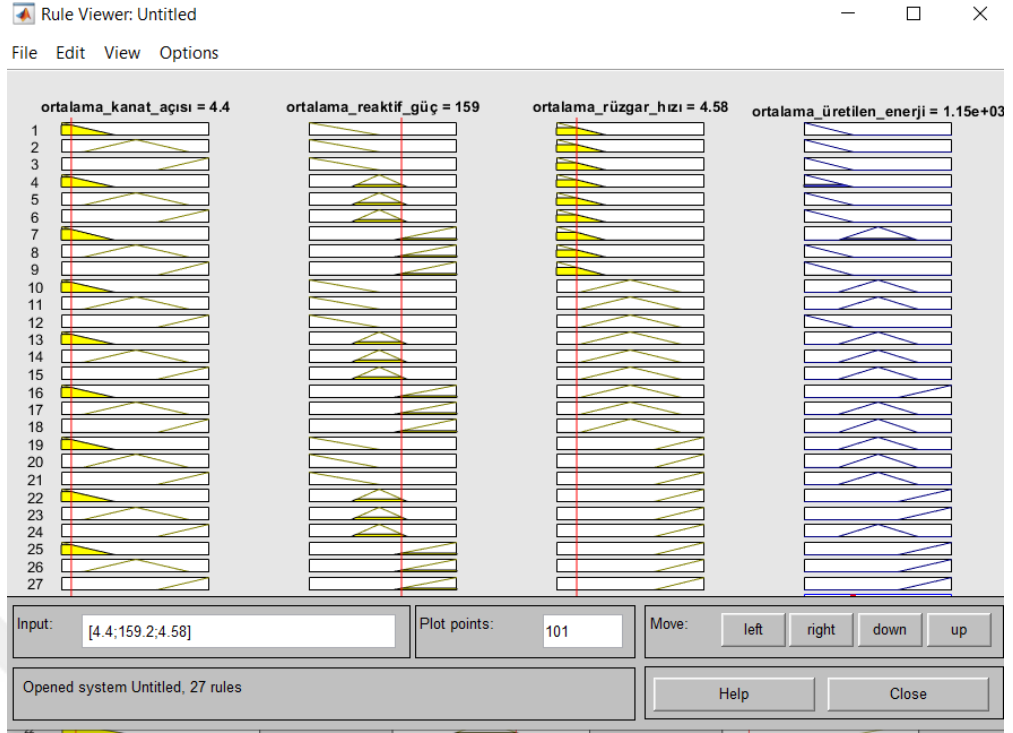
Şekil 3.24. 25.02.2024 tarihine ait mamdani tabanlı çıkarım yönteminden elde edilen ortalama üretilen enerji değeri



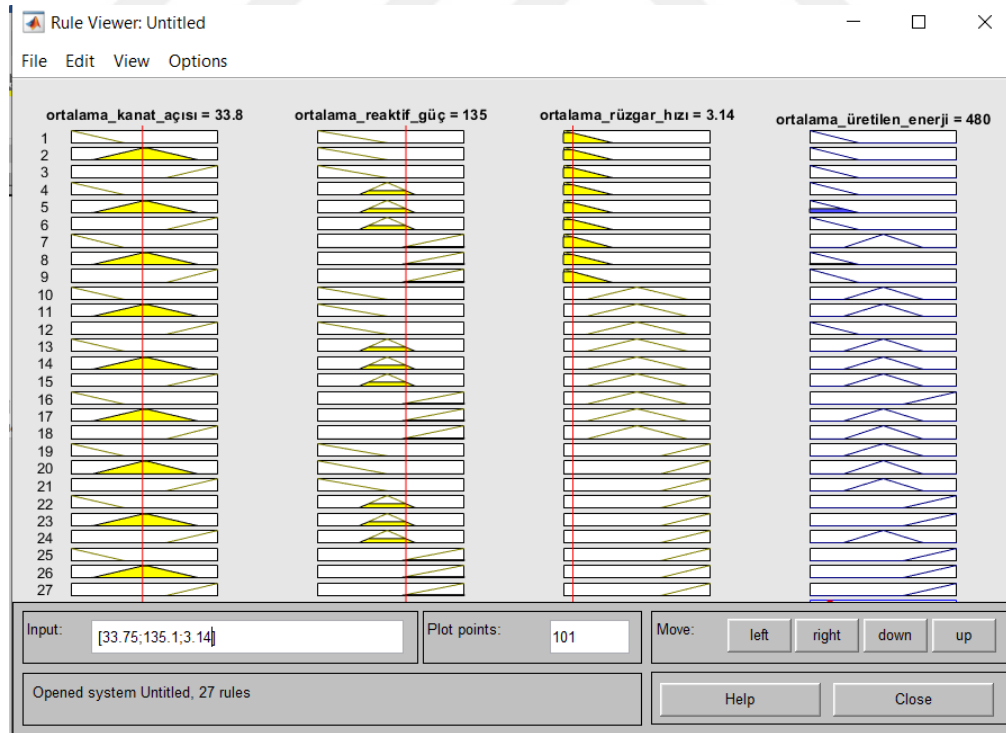
Şekil 3.25. 24.03.2024 tarihine ait mamdani tabanlı çıkarım yönteminden elde edilen ortalama üretilen enerji değeri



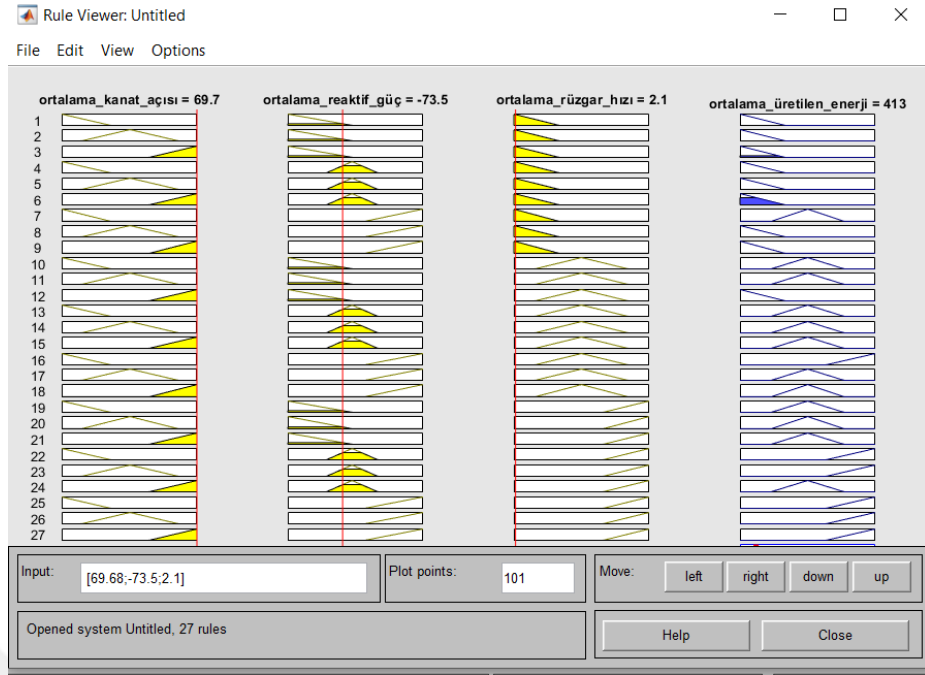
Şekil 3.26. 18.04.2024 tarihine ait mamdani tabanlı çıkarım yönteminden elde edilen ortalama üretilen enerji değeri



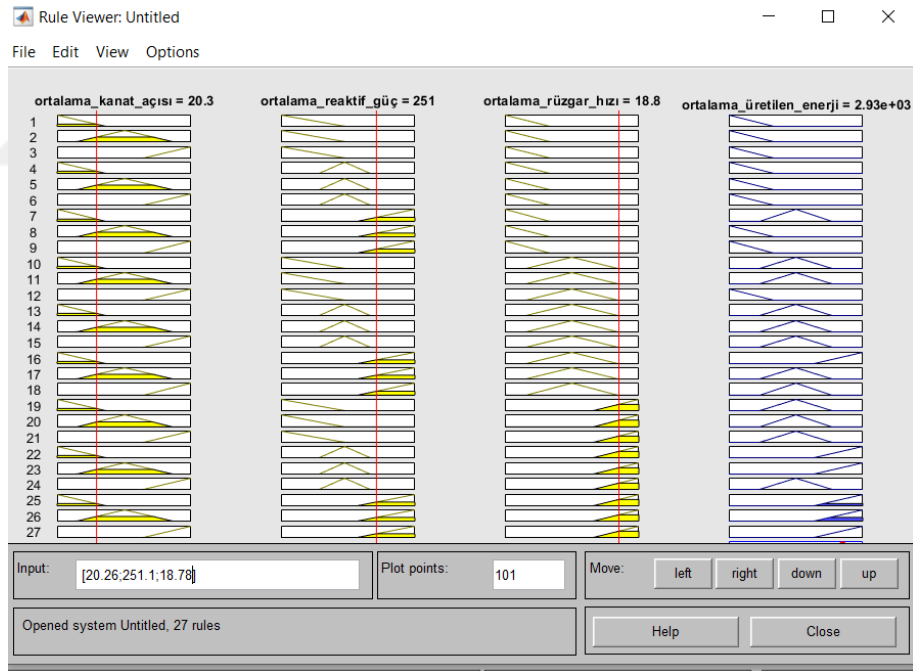
Şekil 3.27. 31.05.2024 tarihine ait mamdani tabanlı çıkarım yönteminden elde edilen ortalama üretilen enerji değeri



Şekil 3.28. 11.06.2024 tarihine ait mamdani tabanlı çıkarım yönteminden elde edilen ortalama üretilen enerji değeri



Şekil 3.29. 05.10.2024 tarihine ait mamdani tabanlı çıkarım yönteminden elde edilen ortalama üretilen enerji değeri



Şekil 3.30. 30.12.2024 tarihine ait mamdani tabanlı çıkarım yönteminden elde edilen ortalama üretilen enerji değeri

Mamdani tabanlı çıkarım yönteminden en ideal çıkış değerlerini (ortalama üretilen enerji) elde etmek için; çeşitli kural sayısı, çeşitli üyelik fonksiyonu sayısı ve üyelik fonksiyonu tipi ile modeller analiz edilmiştir. Çizelge 3.13, Çizelge 3.14 ve Çizelge 3.15'te bazı analiz edilen modellere ait değerler bulunmaktadır. Çizelge 3.16'da

ise bu modellere ait en iyi sonuç çıktılarının karşılaştırılması yer almaktadır. Ortalama reaktif güç ve ortalama rüzgâr hızı verilerinin modellemesinde 5 adet kural (çok düşük, düşük, orta, yüksek, çok yüksek) ile 25 adet kural fonksiyonu oluşturulmuştur. Ortalama kanat açısı - ortalama reaktif güç - ortalama rüzgâr hızı verilerinin modellemesinde 3 adet kural (düşük, orta, yüksek) ile 27 adet kural fonksiyonu oluşturulmuştur. Sadece ortalama ortam sıcaklığı verisinin modellemeye dâhil edilmediği verilerinin modellemesinde 3 adet kural (düşük, orta, yüksek) ile 81 adet kural fonksiyonu oluşturmak yerine anlamlı ve yorumlanabilir olması amaçlanarak 25 adet kural fonksiyonu oluşturulmuştur.

Çizelge 3.13. Ortalama reaktif güç ve ortalama rüzgâr hızı verilerinin modellemesine ait analiz sonuçları

Tarih	Gerçek Değerler	Tüm üyelik fonksiyonları trim	Uç üyelik fonksiyonları trap	Uç üyelik fonksiyonları gauss	Tüm üyelik fonksiyonları gauss
7.01.2024	3447,964239	3160	2560	3270	2710
25.01.2024	20,55789514	990	850	990	1050
31.01.2024	2553,113913	2320	2560	2320	2190
25.02.2024	11,58151458	995	850	995	1060
24.03.2024	291,4845806	1290	850	1390	1400
18.04.2024	2236,067906	2440	2560	2440	2200
31.05.2024	330,6980146	1720	1480	1720	1480
11.06.2024	69,99240417	1480	1300	1480	1230
5.10.2024	3,463108333	953	850	953	1030
30.12.2024	3121,273142	3050	2900	2860	2750

Çizelge 3.14. Ortalama kanat açısı - ortalama reaktif güç - ortalama rüzgâr hızı verilerinin modellemesine ait analiz sonuçları

Tarih	Gerçek Değerler	Tüm üyelik fonksiyonları trim	Uç üyelik fonksiyonları trap	Uç üyelik fonksiyonları gauss	Tüm üyelik fonksiyonları gauss
7.01.2024	3447,964239	2740	2940	2930	2010
25.01.2024	20,55789514	432	464	534	666
31.01.2024	2553,113913	2980	2980	2960	2090
25.02.2024	11,58151458	483	498	543	664
24.03.2024	291,4845806	427	476	542	690
18.04.2024	2236,067906	2930	2980	2920	2030
31.05.2024	330,6980146	1150	1300	1130	1240
11.06.2024	69,99240417	480	503	620	855
5.10.2024	3,463108333	413	468	535	667
30.12.2024	3121,273142	2930	2960	2910	2720

Çizelge 3.15. Sadece ortalama ortam sıcaklığı verisinin modellemeye dâhil edilmediği verilerinin modellemesine ait analiz sonuçları

Tarih	Gerçek Değerler	Tüm üyelik fonksiyonları trim	Uç üyelik fonksiyonları trap	Uç üyelik fonksiyonları gauss	Tüm üyelik fonksiyonları gauss
7.01.2024	3447,964239	1920	2170	2150	2140
25.01.2024	20,55789514	591	827	1060	893
31.01.2024	2553,113913	1760	1480	1510	1640
25.02.2024	11,58151458	583	817	1060	868
24.03.2024	291,4845806	813	832	883	815
18.04.2024	2236,067906	1770	1470	1460	1640
31.05.2024	330,6980146	522	892	919	868
11.06.2024	69,99240417	1730	898	1500	858
5.10.2024	3,463108333	494	669	1500	642
30.12.2024	3121,273142	2180	2100	2050	1990

Çizelge 3.16. Analiz edilen modellerin karşılaştırılması

Tarih	Gerçek Değerler	Ortalama kanat açısı - ortalama reaktif güç - ortalama rüzgâr hızı (Tüm üyelik fonksiyonları trim)	Ortalama reaktif güç ve ortalama rüzgâr hızı (Uç üyelik fonksiyonları trap)	Sadece ortalama ortam sıcaklığı verisinin modellemeye dâhil edilmediği (Tüm üyelik fonksiyonları trim)
7.01.2024	3447,964239	2740	2560	1920
25.01.2024	20,55789514	432	850	591
31.01.2024	2553,113913	2980	2560	1760
25.02.2024	11,58151458	483	850	583
24.03.2024	291,4845806	427	850	813
18.04.2024	2236,067906	2930	2560	1770
31.05.2024	330,6980146	1150	1480	522
11.06.2024	69,99240417	480	1300	1730
5.10.2024	3,463108333	413	850	494
30.12.2024	3121,273142	2930	2900	2180

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Yapılan modelleme sonucunda elde edilen en ideal sonuç veren değerler bu bölümde sunulmuştur. Mamdani ve Sugeno modellerinin hata oranları ve performansları incelenmiştir.

4.1. ANFIS – Sugeno Tabanlı Model Eğitimi ve Test Süreci Sonuçları

ANFIS -Sugeno tabanlı çıkarım yöntemi ile veri kümesi birçok aşamada ve farklı koşullarda incelenmiştir. 10 kat çaprazlama neticesinde yapılan modellemeler arasında en ideal tahmin sonucunu veren model; tüm değişkenlerin analiz edildiği, ızgara yöntemi kullanılarak (gauss) oluşturulan ve giriş değişkenleri için 5 üyelik fonksiyonu tanımlanarak belirlenen modeldir. Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2 ‘de her kata ait Sugeno tabanlı çıkarım yöntemi ile elde edilen tahmini sonuçlar yer almaktadır.

Çizelge 4.1. 1. kat - 5. kat çaprazlamaya ait mf 5 tahmin değerleri

1. Kat mf5 Değerleri	2. Kat mf5 Değerleri	3. Kat mf5 Değerleri	4. Kat mf5 Değerleri	5. Kat mf5 Değerleri
813,6803157	812,0039373	805,3712	803,7743	804,8609
567,3895683	563,6857648	578,7145	579,2794	582,5549
492,728938	492,1073289	492,1863	494,6977	493,7512
647,0167319	647,9217916	646,7093	645,9268	644,2863
1023,073621	1008,870997	1025,381	1018,185	1018,271
2110,052132	2099,372499	2111,492	2099,319	2103,497
3447,975806	3447,989266	3447,981	3447,974	3448,009
1875,439678	1870,747933	1874,936	1874,982	1876,577
961,1588681	953,3920928	962,7347	943,9063	961,8598
1163,591218	1164,048042	1163,645	1163,679	1163,659
316,4276501	316,4337626	316,4145	316,4236	316,4187
1161,982118	1161,92999	1161,981	1162,017	1162,045
682,8013401	682,7425142	682,5783	682,401	682,5396
439,472501	439,468965	439,4152	439,5249	439,4544
1209,212758	1222,243119	1220,827	1221,427	1217,16
3162,237649	3162,229018	3162,234	3162,254	3162,187
335,7451961	335,3313617	335,0442	335,5095	331,5453
906,2843191	915,522644	928,8747	929,2009	931,2696
1960,419182	1968,480489	1964,176	1971,541	1966,079
1546,525002	1553,475602	1544,917	1541,139	1552,799
1032,996995	1034,369631	1032,878	1032,71	1033,075
279,0324339	279,5724619	279,4814	278,6926	280,1779
68,24826832	68,29112423	68,35635	68,06956	68,18508

Çizelge 4.1.(devam) 1. kat - 5. kat çaprazlamaya ait mf 5 tahmin değerleri

1. Kat mf5 Değerleri	2. Kat mf5 Değerleri	3. Kat mf5 Değerleri	4. Kat mf5 Değerleri	5. Kat mf5 Değerleri
81,78867008	86,73145814	83,11838	81,09559	76,044
20,46754177	20,58207534	20,48831	20,56017	20,38002
1085,756756	1104,921256	1085,105	1091,89	1086,399
10,87794629	10,88319436	10,87719	10,87574	10,87227
838,6145545	838,6895322	838,7137	838,6669	838,4907
368,601493	368,554468	368,5547	368,6058	368,5667
1340,654414	1340,652491	1340,652	1340,65	1340,653
2553,106457	2553,051215	2553,122	2553,096	2553,031
1395,708394	1395,147613	1395,078	1395,436	1395,426
42,383975	42,43254551	42,31012	42,36144	42,29544
580,2003103	580,075258	580,2486	579,9286	579,9257
19,42857567	19,4283985	19,42934	19,41468	19,41658
954,2308508	954,3146598	955,4535	953,0692	956,2685
1100,285323	1101,108446	1100,899	1101,183	1100,469
1277,396491	1306,630075	1296,706	1285,23	1299,944
1951,542176	1953,340742	1953,215	1951,206	1952,709
536,8032194	540,0209187	527,9022	519,9918	531,8676
1233,860439	1234,871144	1232,984	1270,609	1229,23
2444,507489	2437,482716	2443,272	2447,763	2440,724
3253,972553	3253,895579	3253,973	3253,768	3254,064
2877,694318	2877,681532	2877,694	2877,73	2877,708
569,2477598	569,2500702	569,4572	569,6954	569,3377
315,0916159	309,7298571	322,2459	310,4344	322,6882
1790,876895	1790,755623	1790,729	1790,938	1790,651
1270,004038	1269,258527	1260,183	1280,645	1252,08
945,7891303	945,9722119	946,2607	944,9687	946,8142
1177,315775	1177,558373	1179,502	1174,592	1182,274
25,98356919	25,86496252	25,85716	25,94861	26,33916
243,218388	243,8474343	239,4954	244,8476	242,3466
179,6179696	181,0062488	179,2123	181,4803	184,7044
146,3402112	146,6059822	145,8478	146,2196	141,2537
94,1596034	92,54107746	94,18385	96,66379	99,28984
11,58828807	11,56712284	11,61995	11,43521	11,64
888,8613736	884,2016815	892,1104	881,4195	894,4953
134,5047802	133,3205734	133,7588	131,4428	131,9266
12,49639685	12,0855775	12,21245	12,50733	12,66326
32,8025153	28,43256181	30,214	31,79559	35,25887
543,3532919	547,4224106	548,8783	565,8742	544,7768
643,5733484	645,1366185	656,4626	648,6877	654,5154
508,0731432	508,3220753	508,4651	508,347	508,0768
51,83726729	51,77634576	51,93733	51,47016	49,852
2157,646315	2164,71393	2158,198	2159,116	2158,959

Çizelge 4.1.(devam) 1. kat - 5. kat çaprazlamaya ait mf 5 tahmin değerleri

1. Kat mf5 Değerleri	2. Kat mf5 Değerleri	3. Kat mf5 Değerleri	4. Kat mf5 Değerleri	5. Kat mf5 Değerleri
1109,874857	1109,114533	1109,615	1109,733	1109,746
486,9115668	486,5774793	491,6972	487,5532	487,5538
636,4662176	634,2905647	636,5996	635,8773	636,3478
1246,113107	1245,903185	1246,442	1245,458	1247,068
323,3740374	323,3118001	323,3255	323,2981	323,2693
413,3178268	424,010461	404,9349	412,0278	414,6083
1348,410225	1346,803031	1365,88	1367,611	1355,497
1503,468074	1494,259495	1506,961	1501,44	1500,329
2,658397481	2,620487926	2,606378	2,716048	2,696974
146,1304033	145,9151989	146,0927	145,0233	148,1097
252,3953492	260,5548496	248,4699	264,7253	249,7576
25,51290697	25,37630873	25,42175	25,35596	25,24006
1093,908748	1093,769462	1093,662	1093,857	1093,794
1283,213434	1282,609621	1278,26	1285,103	1281,693
122,5422772	124,0132552	122,2255	126,6545	129,8292
1823,675016	1823,821611	1823,458	1823,658	1823,854
766,4868583	766,632319	766,3867	766,6561	766,3134
810,9905823	810,5427946	810,9033	810,746	810,8874
293,4056557	294,1175121	288,9578	292,0274	290,5336
1321,09196	1334,003286	1317,759	1332,425	1315,14
1005,498797	1008,084824	1000,2	1005,683	1001,875
993,4438311	984,6676664	975,3841	999,4967	980,3649
648,4299787	651,4378371	642,9158	641,3571	651,2869
365,1430035	373,785313	377,9143	370,5361	360,1691
516,5817162	536,2061531	556,1873	545,8012	538,3491
120,3732076	120,9441561	119,8454	119,8669	120,8202
339,3778745	342,8216011	335,561	337,9436	342,5864
2,074206597	2,082023258	2,117215	2,094446	2,037491
624,0819294	624,1160496	625,9817	626,5827	626,8075
890,2815836	894,951074	888,4058	888,5664	887,048
2447,248162	2447,227002	2446,97	2446,918	2447,301
1793,257821	1793,314055	1793,142	1793,266	1793,033
1791,961583	1791,959872	1792,008	1791,973	1791,974
1154,552163	1154,609744	1154,563	1154,565	1154,716
1093,80696	1097,369791	1094,442	1101,643	1089,522
1197,794828	1197,831605	1197,874	1197,582	1198,256
472,6728993	472,6029477	472,7118	471,9271	473,2136
1003,756357	1001,592873	1001,007	1001,185	1002,645
1003,143039	1001,332612	1043,061	1010,251	1010,389
1938,003574	1938,083248	1937,969	1937,889	1937,493
419,679507	418,4960015	418,892	417,1901	418,3573
790,1182655	786,0477888	782,625	783,3021	777,5573

Çizelge 4.1.(devam) 1. kat - 5. kat çaprazlamaya ait mf 5 tahmin değerleri

1. Kat mf5 Değerleri	2. Kat mf5 Değerleri	3. Kat mf5 Değerleri	4. Kat mf5 Değerleri	5. Kat mf5 Değerleri
2684,95936	2685,074552	2684,948	2684,949	2684,977
2235,488157	2235,553497	2235,692	2236,349	2235,952
496,3564913	482,5048028	484,8535	491,6949	509,0101
2243,593451	2243,508088	2243,515	2243,587	2243,305
156,3259729	156,0986442	156,3162	156,5364	154,9858
213,7688085	212,7023101	214,1261	212,8815	210,5018
588,3515304	589,0049743	589,1816	595,7396	593,9534
2749,414106	2749,426981	2749,408	2749,427	2749,392
3166,289176	3166,290741	3166,278	3166,283	3166,297
1566,627835	1566,623596	1566,441	1566,105	1566,427
733,9545921	733,9188696	733,9958	733,9201	733,9518
191,9257692	191,8553045	192,1051	191,9506	191,5028
1511,710024	1512,057545	1511,768	1511,852	1511,689
408,2652822	408,2066912	408,4587	408,3205	408,4682
416,9634302	417,073311	417,8599	415,6252	418,3435
606,866302	607,132874	606,8142	606,7722	607,1347
951,4307209	948,762325	947,509	945,4857	953,6405
1071,227308	1072,637108	1072,41	1071,348	1072,932
927,7262014	930,1360747	931,1747	929,1943	933,4124
1127,089343	1126,862697	1126,976	1126,616	1126,795
70,11190201	70,21140248	70,18853	70,22542	70,31047
285,112672	286,2007238	285,6561	286,9304	286,0787
381,7359706	386,0937719	340,7516	363,6461	350,656
1235,060549	1235,114864	1235,106	1235,093	1235,224
896,1673243	895,4583155	895,8587	896,191	895,3507
1937,63706	1938,285499	1938,23	1937,992	1938,009
1317,715903	1315,837023	1316,965	1317,439	1317,27
1022,10789	1022,239996	1022,005	1022,198	1022,074
126,4494116	125,9809486	127,364	126,4115	127,5337
875,7726597	875,3564205	875,7731	875,8808	876,36
180,7750377	180,7267072	180,7947	180,8677	181,3449
1117,739315	1117,549433	1117,723	1117,422	1117,747
745,1384909	745,1550122	745,119	745,1595	745,1405
512,5337871	512,4499029	512,7365	512,7855	512,4368
765,9127354	765,9894171	766,1365	766,5753	766,0226
589,3286313	589,5119058	589,4197	589,5482	589,405
1730,739681	1730,680815	1730,776	1730,67	1730,788
2412,144082	2412,045603	2412,164	2412,103	2412,091
2365,14632	2365,077339	2365,177	2365,162	2365,093
365,455224	365,2884686	366,3547	365,6315	365,9712
185,7717539	185,7582257	184,9358	185,2664	184,937
511,6511296	512,4227434	512,9105	514,7128	510,8119

Çizelge 4.1.(devam) 1. kat - 5. kat çaprazlamaya ait mf 5 tahmin değerleri

1. Kat mf5 Değerleri	2. Kat mf5 Değerleri	3. Kat mf5 Değerleri	4. Kat mf5 Değerleri	5. Kat mf5 Değerleri
325,246799	325,6654636	325,3039	326,0065	324,9629
447,6967002	447,7838333	447,4954	447,8065	447,8989
331,7793078	331,9386941	330,9519	330,2444	330,9407
62,70233008	62,71942292	62,58828	62,65538	62,8753
125,0703091	125,0806255	124,9987	124,9383	125,0195
184,8162775	184,8710828	184,936	184,823	184,9588
71,77766907	71,77574968	71,78056	71,76735	71,82491
184,2340491	184,2412692	184,381	184,2411	184,3887
844,9613149	844,7249749	844,5227	844,831	844,8492
1152,621884	1152,680621	1152,141	1152,326	1152,092
373,9430325	373,8141266	374,0681	373,977	373,9491
840,4945014	840,3060342	840,3577	839,9329	840,2839
113,8414971	113,8725889	113,9574	113,9253	113,8569
69,95657568	69,96110933	69,87743	69,97233	69,9053
475,9660452	476,2236456	476,3649	478,9917	478,668
810,0818454	810,0687298	810,1094	810,0989	810,0851
614,072903	614,0760523	614,1366	614,088	614,1208
2750,07507	2750,004634	2750,13	2750,069	2750,165
995,5294012	995,4328942	993,995	995,0721	996,3061
1241,794237	1241,267393	1241,794	1241,195	1241,074
1751,649747	1751,796899	1751,139	1751,262	1751,111
2119,336728	2119,173353	2119,875	2121,705	2120,863
1741,079044	1740,951762	1740,028	1737,804	1739,135
3146,101089	3145,933576	3146,351	3146,678	3146,804
3026,596095	3026,660704	3026,528	3026,341	3026,306
1907,92032	1907,904246	1907,891	1907,902	1907,88
371,8062643	371,7416523	371,2603	371,5325	371,2905
1165,147252	1165,158027	1165,094	1165,178	1165,178
528,7684396	528,7516293	528,7554	528,7877	528,7962
663,6426978	661,8074193	661,9157	659,5722	661,516
623,8005109	623,9543133	625,1011	625,1617	625,1077
3428,179803	3428,189851	3428,221	3428,263	3428,275
3131,065019	3131,042609	3131,057	3131,078	3131,108
1436,721425	1428,34917	1428,643	1420,71	1425,289
705,0695839	706,8964757	705,9439	706,7553	705,1046
1188,572136	1189,402929	1187,638	1189,375	1189,525
1498,181173	1498,542661	1500,549	1501,236	2263,789
1602,176569	1602,325185	1601,931	1602,139	2217,695
3045,326651	3045,3095	3045,378	3045,371	1860,477
3334,400347	3334,356279	3334,207	3334,149	971,3986
2466,829958	2467,115679	2466,721	2466,509	979,3913
2780,427423	2780,333543	2780,459	2780,444	2170,046

Çizelge 4.1.(devam) 1. kat - 5. kat çaprazlamaya ait mf 5 tahmin değerleri

1. Kat mf5 Değerleri	2. Kat mf5 Değerleri	3. Kat mf5 Değerleri	4. Kat mf5 Değerleri	5. Kat mf5 Değerleri
2393,883644	2394,044478	2394,162	2394,044	2078,428
81,08601848	81,08176499	81,08321	81,08533	1681,899
331,2854089	331,7987185	331,2839	331,4007	289,6522
1883,11936	1883,268254	1881,383	1877,176	21,17916
1788,193189	1787,743514	1790,745	1791,87	889,5992
1708,897823	1707,168691	1709	1710,177	738,51
824,6273693	824,641637	820,6916	819,9627	566,0418
1365,553743	1364,810231	1361,685	1359,575	2254,488
1160,546334	1161,766792	1162,288	1168,032	1644,799
1338,278881	1337,83007	1338,465	1338,686	820,1921
714,1357801	713,9535787	714,2124	714,4695	387,8189
108,1629423	108,1493544	108,2176	108,0213	475,9529
644,8977793	644,9870846	644,725	644,762	875,76
911,6739255	911,9657671	911,0322	910,1099	1062,183
946,8317325	947,2074687	949,0982	951,4522	750,2406
1098,21436	1096,348563	1101,334	1104,31	541,4614
1514,555716	1514,286598	1514,72	1514,325	361,4224
2630,481383	2630,550969	2630,456	2630,511	97,79889
1779,093687	1781,957212	1778,786	1780,616	530,8968
1076,262251	1075,661628	1075,896	1077,244	921,541
1837,02737	1837,778676	1837,634	1836,69	1253,559
1269,594411	1268,441253	1270,557	1271,552	1394,431
452,039957	452,0202725	452,1384	452,1591	1332,947
32,79321936	32,79463281	32,77694	32,78264	981,5334
367,2882596	367,464535	367,6948	366,8516	282,6107
905,9913267	903,4329938	905,3915	904,4706	699,8475
1605,183573	1604,886179	1605,251	1605,087	181,56
921,5509376	922,8342111	927,7697	929,4466	3,128543
2101,733566	2101,866283	2097,589	2098,606	68,07385
853,335507	854,4704309	848,1326	844,8396	725,7768
339,1793762	339,8461342	337,2071	338,6754	707,9142
2262,860691	2262,907098	2263,93	707,6148	1064,643
2218,149041	2217,92553	2214,932	1066,651	829,6501
1858,101409	1858,830124	1858,528	829,1854	630,0038
966,9331163	971,590549	971,4603	626,2658	881,9404
980,4065628	979,64746	979,3169	884,6855	212,9177
2169,220761	2170,245325	2170,903	212,6789	893,886
2077,533604	2077,624943	2079,84	893,4097	728,945
1680,202268	1682,456238	1681,441	730,4601	466,8361
289,6473759	289,6754892	289,657	470,6684	900,8945
21,24022355	21,26229654	21,2747	890,9039	72,35537
889,3105032	889,1983925	889,2039	70,60784	104,9168

Çizelge 4.1.(devam) 1. kat - 5. kat çaprazlamaya ait mf 5 tahmin değerleri

1. Kat mf5 Değerleri	2. Kat mf5 Değerleri	3. Kat mf5 Değerleri	4. Kat mf5 Değerleri	5. Kat mf5 Değerleri
739,3275201	739,0615941	738,211	104,941	168,6341
566,2350314	566,2403108	566,0043	168,6229	10,3507
2253,905036	2253,329149	2254,912	10,38804	149,7525
1644,860458	1644,882534	1644,815	150,1441	1515,679
820,1935394	820,182717	820,1972	1515,707	690,2132
390,2007415	390,5401237	391,4474	669,671	334,9485
476,0480972	476,0476306	476,0056	334,3486	225,1242
875,6600682	875,5640681	875,7211	220,2426	64,20583
1060,255709	1062,14767	1065,206	64,23183	3,490951
750,2265379	750,2369872	750,2356	3,467355	186,9988
541,4505924	541,4565552	541,4515	189,3077	23,84821
361,4734375	361,4450521	361,4855	29,76148	890,0127
97,53268013	97,66284308	98,00846	894,8358	360,2402
530,6580897	530,8152357	530,8358	356,4764	123,6295
913,3102407	919,7399168	917,9144	122,5842	410,2257
1256,126881	1253,241737	1256,09	408,2365	83,68925
1386,248588	1388,450178	1396,156	77,74613	614,7946
1333,228068	1333,735401	1333,342	614,0316	266,5752
983,1369759	981,5326506	980,4895	270,0847	435,5818
282,7947198	282,7351941	282,773	433,1061	736,4276
717,0860027	716,1309921	713,8863	736,7435	2882,441
181,7761049	181,4150262	181,7842	2882,387	1739,865
3,130597359	3,143802646	3,134983	1740,881	1052,314
68,15200019	68,10747957	68,02458	1040,701	520,8156
725,9887486	725,9982907	725,9781	533,3061	1560,006
707,6445219	707,6217219	1541,393	1547,076	1805,684
1067,391452	1066,383849	1804,805	1804,89	574,5235
828,8572091	827,9038218	574,8128	570,6684	429,7438
632,0162144	628,5393	430,6292	430,3773	442,9411
881,6429508	884,2186776	440,9772	443,2377	411,0941
212,8611389	213,1756242	412,0373	412,4386	33,23347
916,8728625	915,5108312	33,2587	33,58247	34,46105
729,3524992	729,9868328	35,29326	33,8796	815,9278
473,8862399	465,3520824	829,128	807,6473	1194,906
903,4545307	898,5675137	1195,181	1193,846	502,3017
71,13118227	71,46861755	503,9249	504,2364	206,3165
104,9083435	104,8335741	204,9581	207,1779	3,642758
168,6788677	168,6661228	3,644668	3,677402	1779,724
10,37437146	10,33305496	1778,482	1776,882	658,4953
149,9621902	149,944579	658,4622	660,5028	1204,057
1515,141364	1514,857491	1211,502	1167,528	256,2009
678,2464905	654,0968279	256,3408	255,8931	392,5904

Çizelge 4.1.(devam) 1. kat - 5. kat çaprazlamaya ait mf 5 tahmin değerleri

1. Kat mf5 Değerleri	2. Kat mf5 Değerleri	3. Kat mf5 Değerleri	4. Kat mf5 Değerleri	5. Kat mf5 Değerleri
345,9895722	333,704655	393,1433	393,7708	377,8865
222,4916779	221,2087646	377,0522	377,1433	168,4718
64,22743624	64,2165592	169,714	169,0601	52,17651
3,476341942	3,474041886	52,54846	48,53332	99,44519
190,8266471	187,6193865	107,6988	108,5453	53,56675
27,49052427	27,6537949	50,82099	52,56434	67,62501
890,9905322	891,3174684	69,54534	69,90445	137,2787
352,614209	354,6390654	134,4456	134,6679	245,0278
122,9731211	123,0373997	244,7805	241,0053	35,88417
406,2667326	402,043761	36,0273	36,32276	890,6516
79,94651569	79,36820226	899,0168	909,3477	121,1285
607,2088572	603,9889958	120,5825	120,5661	49,34751
265,1223256	264,1092593	49,53462	49,36029	1049,571
436,991598	433,5188214	1039,019	1018,866	3058,44
736,6576183	737,325688	3058,366	3056,985	2407,247
2882,342927	2882,29681	2406,73	2395,655	3201,812
1741,512653	1742,003701	3201,779	3202,049	2767,977
1012,721229	1053,616044	2767,981	2767,981	1819,692
546,243102	507,1710723	1819,697	1819,695	656,4432
1528,580867	656,5116785	656,4763	656,4845	2629,322
1803,842494	2630,829196	2629,94	2633,826	3014,801
574,6824948	3014,667285	3014,735	3014,7	1194,394
428,9468946	1194,393907	1194,397	1194,395	3414,871
441,4270691	3414,868737	3414,874	3414,88	1022,318
411,4150774	1022,259063	1022,278	1022,27	132,1953
32,48108503	129,7754623	131,3928	130,9407	1241,15
36,05038682	1250,381726	1254,982	1275,532	1077,25
827,1871887	1084,628287	1090,127	1057,906	79,69955
1198,40158	74,34323419	74,28928	77,85934	283,686
502,7898675	295,8441267	285,4097	292,2542	1878,737
204,1410772	1888,697973	1889,133	1874,807	2336,873
3,64292512	2339,798289	2327,606	2337,714	1657,521
1777,887294	1682,93597	1662,92	1670,204	615,8945
660,8427221	629,8113763	629,1373	627,1685	590,488
1187,001858	600,218087	565,022	573,7479	791,1389
256,6523414	791,657619	791,2196	791,1961	1898,502
391,9455105	1898,428828	1898,581	1898,374	816,8344
379,702756	816,745957	816,2143	816,7458	2157,851
169,6115092	2157,220959	2152,405	2156,346	1850,062
51,91999045	1848,881789	1850,071	1850,444	200,1551
99,45534364	200,1538796	200,4901	200,9609	84,85124
50,61564434	83,14947587	94,98519	83,82828	131,0658

Çizelge 4.1.(devam) 1. kat - 5. kat çaprazlamaya ait mf 5 tahmin değerleri

1. Kat mf5 Değerleri	2. Kat mf5 Değerleri	3. Kat mf5 Değerleri	4. Kat mf5 Değerleri	5. Kat mf5 Değerleri
69,83179862	134,7328442	126,5056	131,6274	254,0793
134,6278099	242,7259895	253,2817	242,94	2670,691
241,7276464	2669,455397	2671,553	2670,02	295,1256
36,2052283	296,01593	295,7021	295,4075	1208,576
878,0295495	1222,081445	1227,908	1232,999	3281,576
120,5753374	3281,444192	3281,488	3281,612	3209,953
49,5565283	3210,078622	3210,059	3209,97	1287,229
1046,035006	1287,789925	1286,606	1287,792	1095,808
3058,336976	1086,588721	1095,693	1087,787	43,02519
2406,333699	44,77796519	44,28789	44,05804	462,3994
3201,924715	457,4726338	461,9426	464,3289	3121,215
2767,980743	3121,1868	3121,177	3121,195	1344,805
1819,68146	1344,591572	1344,839	1344,61	1366,162
-922,5429219	1666,264729	-300,173	946,8607	2277,039
2480,567688	2501,658538	634,5255	2468,701	3966,924
3306,828895	751,6356618	614,9187	1851,194	2680,956
20,36375281	-227,9069414	641,3011	828,1302	2836,692
416,1596268	911,3005312	1070,834	488,633	1546,501
120,0185216	966,0326004	1030,211	2308,056	3946,791
963,8254483	-636,2664051	1126,311	2251,523	-933,319
1157,89693	-1152,616693	900,1995	1473,966	-968,369
1050,048635	782,184901	176,7832	1042,178	2423,179
192,7921833	1534,720381	1017,775	736,365	3126,366
311,5191325	310,5319333	315,4069	-2123,72	1761,828
1630,21038	-450,5301146	843,5265	198,377	1023,67
2228,376845	548,5012556	439,7743	578,6881	1102,543
1649,474814	2410,572224	564,7851	2160,873	796,2735
632,0385564	491,4629679	252,8017	572,7811	1042,201
676,8246068	1237,332797	1599,878	1721,953	-473,318
1383,543346	213,2421951	733,3748	-388,539	234,2058
1610,281313	1101,898606	346,8144	547,5914	228,8847
1147,130461	817,2581614	832,3954	-3433,71	808,8391
1993,123177	30,93871568	100,8635	-459,11	790,6634
1752,921865	-214,5573648	149,3281	-3394,44	731,6789
-385,9229072	-119,3576361	103,749	-4287,55	2621,44
14,83467542	60,90767493	447,1457	-644,924	2924,778
274,4026134	-380,220563	484,1132	30,03479	1731,37
220,4969852	766,6204246	366,9429	-2012,7	1055,906
2521,40544	107,6928996	339,0414	897,6839	1854,883
-648,874172	568,6747552	242,1478	1191,106	1061,64
1144,264542	801,0709335	150,3803	1074,215	764,1517
2899,22024	150,0999916	647,9304	-279,645	367,0323

Çizelge 4.1.(devam) 1. kat - 5. kat çaprazlamaya ait mf 5 tahmin değerleri

1. Kat mf5 Değerleri	2. Kat mf5 Değerleri	3. Kat mf5 Değerleri	4. Kat mf5 Değerleri	5. Kat mf5 Değerleri
1799,350185	322,1560526	163,8405	-684,066	2175,806
3550,333721	1100,01954	891,5107	581,5201	930,7044
1141,375022	2285,900502	640,7182	1055,125	2777,191
328,9777212	2471,810069	4000,835	-976,711	1177,962
571,8061327	2090,996017	1101,519	1352,116	4147,615
581,8843568	306,4298184	1063,36	-1569,68	942,2951
3268,561287	1063,891941	441,0747	-724,595	1943,72

Çizelge 4.2. 6. kat - 10. kat çaprazlamaya ait mf 5 tahmin değerleri

6. Kat mf5 Değerleri	7. Kat mf5 Değerleri	8. Kat mf5 Değerleri	9. Kat mf5 Değerleri	10. Kat mf5 Değerleri
810,1664	801,8959	805,8688	799,0836	1282,835
588,1405	584,6528	570,1249	576,5052	1949,192
493,0836	493,8952	493,5509	492,722	537,8245
642,4538	642,0106	647,7858	646,0223	1241,276
1020,4	1013,917	1021,769	1019,51	2446,586
2106,919	2101,088	2095,709	2093,734	3253,871
3447,997	3448,009	3447,973	3447,944	2877,713
1873,737	1873,628	1874,023	1874,012	569,2108
964,1592	966,6917	974,6433	933,6035	320,2199
1163,307	1163,314	1163,22	1163,659	1790,746
316,4247	316,4298	316,4277	316,4203	1266,555
1162,029	1161,965	1161,96	1161,958	946,4802
682,6104	682,6902	682,7505	682,4245	1177,95
439,3329	439,4481	439,5195	439,5624	25,99281
1214,351	1216,743	1216,176	1225,11	245,51
3162,201	3162,153	3162,256	3162,256	180,2715
334,545	335,9084	332,8964	333,7217	145,3208
922,6577	929,9092	933,8283	947,7319	93,61636
1964,92	1971,291	1975,676	1957,322	11,49347
1551,147	1547,985	1540,035	1540,681	902,5749
1033,053	1032,827	1033,018	1031,638	133,1432
279,8615	278,9688	279,7215	278,8666	12,438
68,00271	68,20718	68,12784	68,0426	30,09307
82,69814	78,51953	79,62178	85,22545	541,9655
20,48523	20,41122	20,21662	20,53515	645,1344
1081,07	1085,679	1094,745	1094,615	508,155
10,87216	10,87859	10,87682	10,87252	51,33444
838,8133	838,6034	838,6104	838,4582	2157,923

Çizelge 4.2.(devam) 6. kat - 10. kat çaprazlamaya ait mf 5 tahmin değerleri

6. Kat mf5 Değerleri	7. Kat mf5 Değerleri	8. Kat mf5 Değerleri	9. Kat mf5 Değerleri	10. Kat mf5 Değerleri
368,5371	368,595	368,615	368,6197	1110,019
1340,653	1340,654	1340,653	1340,652	485,3859
2553,055	2553,02	2553,021	2553,046	637,9609
1395,464	1395,694	1395,656	1395,259	1247,19
42,40212	42,36522	42,38552	42,423	323,2848
580,1194	579,8864	580,1045	579,4535	420,2037
19,44517	19,42612	19,41905	19,42765	1346,429
955,9124	955,3137	954,4714	953,1269	1524,296
1100,706	1101,468	1101,187	1100,926	2,526927
1308,615	1308,008	1278,314	144,9249	147,2934
1953,999	1953,014	1951,516	264,3989	247,8576
529,3591	529,8026	533,8843	25,40697	25,31615
1228,144	1244,097	1254,028	1093,679	1093,924
2438,313	2437,185	2444,562	1286,341	1278,088
3254,053	3254,329	3253,842	122,2589	126,1907
2877,681	2877,635	2877,703	1823,74	1824,023
568,6234	569,6833	569,5397	766,5008	766,574
314,3845	317,558	311,3953	810,9269	811,3058
1790,758	1790,737	1790,896	292,7603	294,1603
1255,223	1262,749	1264,809	1320,55	1319,642
946,329	945,7292	945,9239	1014,713	1003,557
1181,181	1180,154	1178,55	999,3069	983,4046
26,15316	26,1744	26,25754	654,4933	654,8813
241,7851	241,0916	244,0717	359,251	361,8014
178,5826	179,2623	182,5088	527,8905	513,2788
150,756	146,5756	148,832	121,3517	121,1704
95,92044	97,02531	95,46033	345,7396	342,7864
11,58443	11,6097	11,82471	2,064589	2,056799
882,6283	893,7299	872,774	624,5707	624,6054
132,9539	132,4922	134,5414	894,6697	892,3014
12,37324	12,46038	12,48698	2446,994	2446,949
30,29378	34,03926	33,52587	1793,416	1793,333
546,9139	545,8614	550,3403	1792	1791,968
653,7677	655,0979	646,7528	1154,557	1154,721
508,3591	508,414	508,82	1094,962	1089,256
50,86245	52,0339	50,56565	1197,809	1198,108
2161,169	2161,634	2160,221	472,4433	473,1213
1110,125	1110,108	1110,334	1004,364	1004,291
493,949	490,044	486,6066	1003,426	1012,394
635,593	636,1639	636,4292	1937,823	1937,75
1246,583	1246,446	1246,488	419,4469	419,6649
323,3598	323,2783	323,3738	786,8136	786,3476

Çizelge 4.2.(devam) 6. kat - 10. kat çaprazlamaya ait mf 5 tahmin değerleri

6. Kat mf5 Değerleri	7. Kat mf5 Değerleri	8. Kat mf5 Değerleri	9. Kat mf5 Değerleri	10. Kat mf5 Değerleri
422,6885	418,4759	410,1988	2685,126	2685,046
1356,199	1349,949	1378,099	2235,599	2235,619
1503,508	1503,842	1503,868	499,2061	502,1625
2,527466	2,675765	2,747231	2243,698	2243,534
146,3938	146,1074	155,5205	156,217	156,389
250,8696	241,1623	213,7439	213,1136	211,7863
25,33677	25,30142	588,9806	590,1758	588,6518
1093,85	1093,76	2749,429	2749,411	2749,408
1272,617	1278,715	3166,271	3166,293	3166,297
122,0567	124,3408	1566,236	1566,706	1566,422
1824,042	1823,792	733,8948	733,9003	733,9005
766,4495	766,4676	192,0024	191,9483	191,7783
810,8496	810,7032	1511,77	1511,656	1511,96
289,5187	289,7717	408,3105	408,2722	408,2421
1329,921	1330,927	414,8912	413,9702	415,5104
995,1358	1006,028	607,1662	606,8348	606,6669
988,9176	984,8346	942,1204	948,1401	947,1607
637,2204	655,1411	1072,432	1070,907	1068,68
365,0819	374,7665	928,7336	930,4836	933,6968
554,7224	538,2519	1126,686	1126,781	1127,007
120,1019	120,1	70,04745	70,12372	70,13414
341,2838	340,3143	285,9133	284,4457	286,7342
2,091311	2,06572	364,837	383,3438	384,5458
625,4009	625,8772	1235,106	1235,065	1235,129
893,4351	889,3695	895,5793	896,4019	897,4768
2447,169	2447,149	1937,397	1937,798	1938,22
1792,959	1793,12	1317,944	1317,291	1315,668
1791,981	1791,995	1022,068	1022,111	1021,787
1155,112	1154,55	124,9872	126,6034	126,4774
1090,677	1096,367	876,7011	876,0293	875,6783
1198,199	1197,612	180,7846	180,5031	180,9219
473,2472	472,5258	1117,693	1117,767	1117,463
1002,91	1003,001	745,1888	745,1377	745,1264
997,0589	1001,842	513,2712	512,6856	512,5995
1938,238	1938,185	765,6089	765,417	765,8366
417,8065	418,1011	589,6523	589,476	589,5041
786,4496	787,8605	1730,757	1730,771	1730,719
2684,872	2684,958	2412,219	2412,173	2412,136
2235,993	2236,171	2365,144	2365,045	2365,143
482,3184	500,6088	364,911	365,9788	364,8884
2243,454	2243,398	186,3316	185,6881	186,1208
155,5515	515,7144	513,7693	513,2849	514,1028

Çizelge 4.2.(devam) 6. kat - 10. kat çaprazlamaya ait mf 5 tahmin değerleri

6. Kat mf5 Değerleri	7. Kat mf5 Değerleri	8. Kat mf5 Değerleri	9. Kat mf5 Değerleri	10. Kat mf5 Değerleri
212,9132	325,4816	326,2421	324,8187	325,2303
593,6936	447,53	448,0331	447,5327	447,4237
2749,407	330,5236	330,6548	331,9459	331,6641
3166,285	62,6609	62,62208	62,72551	62,75685
1566,094	125,0255	125,0197	125,0793	125,0652
733,9147	184,8519	184,9738	184,769	184,7679
192,2424	71,76956	71,81004	71,77653	71,79571
1511,852	184,2603	184,4339	184,2425	184,2478
408,5284	844,8321	844,4795	845,0136	844,8715
416,5718	1152,513	1152,364	1152,723	1152,689
607,0596	374,0205	373,7486	373,6781	373,7457
946,4957	840,2997	840,3897	840,5295	840,5973
1072,062	113,8802	113,8729	113,8353	113,8251
935,2307	69,99123	69,97394	69,95643	69,91537
1126,651	479,7453	475,663	475,8106	475,6927
70,30133	810,0667	810,0648	810,0536	810,0602
287,385	614,1008	614,0696	614,0749	614,0748
355,0392	2750,1	2749,96	2749,915	2749,978
1235,23	995,3894	994,9342	996,0245	996,2213
895,6378	1241,582	1241,859	1241,388	1241,403
1938,348	1751,974	1750,645	1751,348	1751,379
1316,675	2119,114	2119,125	2118,968	2118,943
1022,119	1741,519	1741,094	1741,705	1741,77
128,169	3146,287	3145,958	3145,827	3145,906
874,7412	3026,576	3026,643	3026,695	3026,652
180,7871	1907,873	1907,903	1907,951	1907,936
1117,106	371,8735	371,4484	371,9964	371,9919
745,154	1165,201	1165,183	1165,173	1165,173
512,5584	528,687	528,7698	528,741	528,7806
766,9674	663,0865	661,5172	663,2118	663,5732
589,5619	623,8553	624,3392	623,2989	623,385
1730,777	3428,22	3428,197	3428,18	3428,194
2412,09	3131,022	3131,04	3131,038	3131,049
2365,09	1432,175	1434,087	1440,612	1440,04
366,0852	705,7627	706,5397	705,9815	705,3343
184,1776	1189,385	1190,761	1190,428	1189,994
1499,848	1503	1501,54	1497,723	1496,777
1602,077	1602,191	1602,457	1602,44	1602,391
3045,425	3045,395	3045,331	3045,232	3045,282
3334,036	3334,235	3334,352	3334,392	3334,347
2466,319	2466,698	2467,106	2467,29	2467,231
2780,44	2780,391	2780,415	2780,433	2780,435

Çizelge 4.2.(devam) 6. kat - 10. kat çaprazlamaya ait mf 5 tahmin değerleri

6. Kat mf5 Değerleri	7. Kat mf5 Değerleri	8. Kat mf5 Değerleri	9. Kat mf5 Değerleri	10. Kat mf5 Değerleri
2394,023	2394,368	2393,648	2393,623	2393,675
81,08033	81,06713	81,0971	81,08271	81,09279
331,5471	330,0966	332,2706	331,4389	331,6615
1879,662	1873,198	1880,984	1883,868	1885,669
1792,829	1791,404	1788,631	1786,84	1786,955
1708,126	1714,566	1708,173	1706,376	1704,749
820,3571	823,88	822,0906	826,0516	825,458
1363,555	1361,446	1358,329	1365,795	1367,575
1167,236	1167,855	1162,783	1162,117	1161,822
1338,34	1338,261	1337,742	1337,698	1337,575
714,4685	714,1825	714,0735	713,9287	713,9562
108,0667	108,1472	108,2069	108,2063	108,2112
641,4221	641,1278	646,8932	644,8824	644,677
910,8875	910,9761	911,2536	912,0601	911,7575
951,4273	947,6902	945,8247	947,4429	948,2063
1099,186	1102,757	1105,453	1096,449	1096,644
1514,71	1514,472	1513,802	1514,046	1514,222
2630,404	2630,468	2630,589	2630,631	2630,578
1781,299	1778,736	1779,295	1779,512	1778,858
1076,521	1075,563	1074,509	1075,066	1074,885
1837,799	1838,452	1838,114	1837,012	1837,361
1272,725	1269,472	1269,16	1267,595	1268,361
452,1363	452,1536	451,8401	451,8305	451,9189
32,81454	32,83466	32,76731	32,81022	32,79841
368,4134	366,876	366,4912	367,4515	367,7494
913,2189	908,6595	896,4204	904,4262	904,4335
1605,297	1604,96	1605,418	1604,983	1604,964
927,9345	927,6303	921,4487	920,0695	920,5907
2098,353	2101,609	2100,542	2103,517	2103,257
840,5479	839,5785	865,8974	856,3346	856,631
338,1806	336,4816	339,9372	339,8126	339,2654
2263,691	2262,928	2263,3	2262,573	2262,614
2218,125	2220,375	2217,715	2220,204	2220,359
1860,873	1859,354	1856,921	1856,872	1856,973
975,3678	968,7239	971,3176	967,0909	967,3738
979,1399	979,6144	979,6988	980,8282	980,7535
2170,655	2168,346	2170,442	2169,042	2168,899
2078,309	2077,799	2077,783	2076,071	2076,337
1682,005	1680,467	1681,327	1680,344	1680,049
289,6588	289,6641	289,7109	289,691	289,6735
21,25308	21,20517	21,23948	21,22959	21,21614
889,1672	889,5016	889,358	889,2597	889,331

Çizelge 4.2.(devam) 6. kat - 10. kat çaprazlamaya ait mf 5 tahmin değerleri

6. Kat mf5 Değerleri	7. Kat mf5 Değerleri	8. Kat mf5 Değerleri	9. Kat mf5 Değerleri	10. Kat mf5 Değerleri
739,7349	739,5606	737,69	739,3103	739,4671
566,133	566,0064	566,253	566,2235	566,2148
2254,212	2251,686	2252,901	2252,702	2253,028
1644,767	1644,842	1644,845	1644,891	1644,914
820,1915	820,1934	820,1905	820,1859	820,179
391,4632	390,8445	389,6643	389,8319	388,7648
476,0021	476,0192	476,0403	476,041	476,066
875,8955	875,6328	875,6294	875,5588	875,3922
1062,292	1063,112	1066,163	1061,079	1060,712
750,2222	750,223	750,2282	750,2397	750,2533
541,4347	541,4602	541,4448	541,4595	541,4677
361,4664	361,487	361,485	361,4342	361,4307
96,86769	96,56758	98,00809	97,15446	97,70735
530,6473	530,4695	531,486	530,7455	530,893
914,5127	914,2557	921,2048	913,9079	915,4288
1256,993	1253,362	1253,017	1257,001	1257,733
1386,725	1389,567	1396,724	1387,092	1385,116
1333,107	1332,684	1334,571	1333,237	1332,924
980,804	980,9441	979,9264	982,3033	983,0284
282,7247	282,5873	282,9113	282,6934	282,8467
700,6008	701,6388	717,6403	713,9738	714,9951
181,4639	181,4184	181,3	181,6831	181,7633
3,159218	3,12884	3,121681	3,152938	3,142117
68,08228	68,10494	68,0185	68,16443	68,15913
725,875	725,9564	725,8626	726,0062	725,9415
707,5485	707,6645	707,5706	707,6228	707,6348
1062,803	1065,8	1068,088	1065,943	1065,987
827,6512	828,9041	829,0926	828,4805	828,6087
628,1321	639,7802	624,6808	627,634	629,8263
884,3153	883,7487	882,0273	881,6505	881,5784
212,0515	212,7573	212,5608	213,3393	213,272
902,2981	901,04	900,9406	915,5399	917,4323
730,2645	729,9231	730,6958	729,7149	728,9982
469,4752	466,0085	469,3902	466,1145	468,1711
902,4533	898,9503	877,1892	898,6735	901,8926
71,11134	71,17141	71,33646	71,65626	71,89654
104,871	104,8805	105,1354	105,1	105,0552
168,5946	168,676	168,6634	168,6933	168,7039
10,34533	10,35779	10,35737	10,34758	10,35904
150,1817	150,0343	149,8862	149,889	149,8049
1515,65	1514,854	1515,153	1515,041	1514,867
677,9869	684,5304	675,7991	698,2993	698,2801

Çizelge 4.2.(devam) 6. kat - 10. kat çaprazlamaya ait mf 5 tahmin değerleri

6. Kat mf5 Değerleri	7. Kat mf5 Değerleri	8. Kat mf5 Değerleri	9. Kat mf5 Değerleri	10. Kat mf5 Değerleri
336,9735	340,863	323,3669	331,1583	345,5693
219,4388	222,0169	222,4123	222,0735	223,7809
64,23186	64,21804	64,23639	64,21834	64,22218
3,468535	3,481884	3,466732	3,47741	3,479813
188,5378	192,2863	186,4321	188,354	187,8103
28,62784	26,81281	26,71736	26,50089	25,70573
901,6417	891,1863	893,7064	887,3584	887,4978
355,3294	363,1489	352,2794	355,6885	354,405
122,6959	123,1167	123,0481	123,1954	123,2728
409,608	412,2318	406,5746	402,9596	405,0199
78,2806	80,35433	80,70599	80,70386	81,81131
616,0507	610,6409	603,6875	607,1922	607,5598
274,3262	267,3944	272,3793	262,7447	262,7068
433,9879	434,2741	435,2711	436,6542	436,9355
737,2578	736,8541	736,3458	736,9247	736,2163
2882,202	2882,234	2882,195	2882,272	2882,29
1741,501	1740,363	1740,87	1738,492	1741,57
1050,143	1049,542	1048,831	1052,35	1050,927
511,6613	529,288	532,8575	538,4924	513,3535
1552,604	1554,105	1543,119	1550,807	1541,656
1805,896	1805,664	1805,164	1804,792	1804,341
574,0786	575,8119	574,3149	575,647	574,6874
429,2323	430,2422	429,5	430,3652	429,0451
441,6067	442,3216	442,0583	444,1067	442,7076
412,2132	410,854	411,5266	410,5902	410,7971
33,43054	33,54994	33,22511	33,47694	32,85132
34,51446	33,9515	34,72104	35,04627	35,53587
809,095	810,3494	820,2981	818,5705	813,1139
1193,205	1195,884	1194,526	1196,807	1197,113
503,8413	502,1315	503,1859	499,2701	501,5714
206,2258	206,846	205,8474	204,9952	204,6894
3,654707	3,640126	3,609288	3,643886	3,648211
1778,151	1777,889	1777,862	1779,567	1779,636
660,531	659,5961	660,8428	660,4651	659,7319
1211,115	1192,6	1200,229	1172,94	1184,142
256,0837	256,0037	256,1491	256,4293	256,5062
392,5087	392,0266	392,63	393,2351	391,9514
378,3654	378,6077	378,1541	376,1253	379,3889
169,2129	168,2852	169,3055	169,5268	169,1515
51,64882	46,92292	52,90599	53,77033	54,75297
109,3518	102,8404	102,9271	110,3351	108,5262
49,19652	51,7541	50,02976	48,67634	49,50125

Çizelge 4.2.(devam) 6. kat - 10. kat çaprazlamaya ait mf 5 tahmin değerleri

6. Kat mf5 Değerleri	7. Kat mf5 Değerleri	8. Kat mf5 Değerleri	9. Kat mf5 Değerleri	10. Kat mf5 Değerleri
68,59826	73,48232	68,90422	66,04903	65,70557
135,4061	134,6833	136,2073	134,8524	134,7836
241,4121	237,1032	248,7753	246,6023	236,4845
36,28098	36,24015	36,01784	36,32978	36,39443
909,7488	892,2414	906,9071	877,4074	874,0859
121,189	120,4511	120,8356	120,709	121,036
49,22531	50,21863	49,96834	49,49933	49,04675
1051,876	1035,878	1005,662	1042,373	1044,341
3058,398	3058,346	3057,817	3058,772	3057,772
2411,299	2406,001	2399,679	2401,03	2406,709
3201,859	3201,842	3201,977	3201,497	3202,043
2767,976	2767,98	2767,977	2767,977	2767,977
1819,688	1819,695	1819,701	1819,689	1819,678
656,4676	656,4719	656,4589	656,4022	656,3909
2628,738	2630,23	2631,493	2630,845	2630,414
3014,695	3014,741	3014,647	3014,687	3014,678
1194,394	1194,395	1194,394	1194,394	1194,394
3414,872	3414,871	3414,872	3414,872	3414,877
1022,275	1022,287	1022,294	1022,338	1022,333
131,1445	130,3183	130,9033	131,6606	131,6682
1240,589	1247,336	1248,129	1261,95	1247,989
1078,003	1067,336	1059,045	1063,848	1086,719
76,55845	79,30503	77,20827	74,61111	74,92694
288,5061	291,4064	295,1597	290,1394	280,494
1883,546	1879,145	1883,305	1873,294	1889,455
2334,695	2338,181	2337,653	2347,088	2331,8
1651,123	1659,918	1663,135	1672,582	1685,272
625,3211	612,1467	609,3588	619,7753	622,8782
583,835	594,1415	583,6979	589,84	587,0624
791,0005	791,1029	790,8473	790,8146	790,8122
1898,448	1898,512	1898,435	1898,451	1898,065
816,052	816,7695	816,714	817,2978	816,6093
2156,715	2158,074	2159,779	2158,095	2154,599
1849,041	1850,136	1849,696	1852,226	1850,245
200,6549	201,1564	200,4482	201,5585	201,0736
87,61028	86,99258	89,91553	96,43102	91,78325
135,3675	132,3465	133,0356	119,1485	135,5611
245,3108	256,505	247,652	241,0778	246,1457
2669,96	2669,962	2670,027	2670,432	2671,224
295,9608	295,363	295,76	294,8876	295,009
1217,481	1224,094	1225,982	1228,564	1218,303
3281,677	3281,645	3281,645	3281,603	3281,591

Çizelge 4.2.(devam) 6. kat - 10. kat çaprazlamaya ait mf 5 tahmin değerleri

6. Kat mf5 Değerleri	7. Kat mf5 Değerleri	8. Kat mf5 Değerleri	9. Kat mf5 Değerleri	10. Kat mf5 Değerleri
3209,904	3209,907	3209,944	3209,954	3209,97
1287,4	1287,315	1286,962	1287,012	1286,739
1100,956	1087,844	1091,282	1077,132	1093,029
45,05115	44,53882	43,63283	44,35509	44,44053
458,6586	461,178	460,6973	465,5851	459,1014
3121,223	3121,233	3121,214	3121,22	3121,211
1344,753	1344,769	1344,801	1344,923	1344,93
96,71882	-290,935	379,4226	1291,305	787,9437
343,2931	-633,181	246,1285	1983,319	656,9235
357,1714	230,597	1235,827	346,2939	635,9942
696,2859	1143,718	1497,462	1135,74	780,8787
92,89021	1500,625	1226,261	2090,1	811,4792
578,4404	-269,589	409,2144	3964,816	2128,256
914,4348	328,1092	3099,325	3065,128	3222,429
2291,373	76,31597	-3249,73	166,5707	1523,764
209,27	-49,5485	-1224,59	430,9588	944,0936
956,6846	-219,477	308,9546	1119,498	1154,753
1947,058	532,2971	1251,128	1079,524	-879,304
473,9713	1132,506	1067,701	272,4388	1895,765
681,9352	1077,826	862,7757	1251,043	-3206,75
-648,298	835,0534	679,6222	-79,534	-204,989
-2272,68	1185,121	305,4861	301,4168	1212,06
165,816	826,9706	433,0973	310,3035	2115,838
2931,527	-611,487	-396,403	49,50602	51,54242
2117,862	-8,10134	451,3596	99,50089	943,9758
1729,56	440,696	-1053,83	-33,79	2061,513
2684,176	2304,848	157,1263	908,1135	1813,781
1191,996	1264,252	1183,201	91,50849	1016,598
1753,667	2651,084	2566,569	159,2095	160,8167
2822,236	1333,5	328,3916	207,8237	-145,146
2449,316	-493,517	1241,351	404,4677	-80,771
2582,666	-386,597	1812,805	571,5367	-46,1145
2289,265	-53,1138	484,9128	-482,841	1072,13
1378,404	-555,555	759,9567	-164,253	-165,373
1020,805	245,6623	372,6645	2158,564	-333,866
685,3181	-248,092	1026,71	823,6765	-1320,63
174,4275	-1718,1	900,4726	396,8531	184,2319
786,4592	-1902,61	593,0653	92,06584	-1268,98
464,1297	-1011,42	374,2274	2189,539	289,2965
2981,091	1213,233	884,0073	-3138,44	-115,965
1150,805	2189,484	4382,114	545,496	972,3828
1456,338	3497,618	2322,824	1346,943	1285,107

Çizelge 4.2.(devam) 6. kat - 10. kat çaprazlamaya ait mf 5 tahmin değerleri

6. Kat mf5 Değerleri	7. Kat mf5 Değerleri	8. Kat mf5 Değerleri	9. Kat mf5 Değerleri	10. Kat mf5 Değerleri
844,1525	121,9062	492,1411	1429,264	2080,468
1345,387	-1152,21	42,51617	388,0098	617,965

Çizelge 4.3, Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da 10 kat çaprazlama neticesinde en ideal sonuç veren üyelik fonksiyonuna ait sMAPE, R^2 , nRMSE ve RMSE değerleri ve bu katların ortalama değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.3. 10 kat çaprazlama sonucu en ideal sonuç veren üyelik fonksiyonuna ait sMAPE değerleri ve ortalaması

sMAPE	mf5 (%)
1. Kat	7,001491
2. Kat	9,231486
3. Kat	6,70558
4. Kat	11,08889
5. Kat	6,3229
6. Kat	6,790249
7. Kat	12,36674
8. Kat	6,862997
9. Kat	7,353615
10. Kat	9,672455
Ortalama	8,3396403

Çizelge 4.4. 10 kat çaprazlama sonucu en ideal sonuç veren üyelik fonksiyonuna ait R^2 değerleri ve ortalaması

R^2	mf5
1. Kat	0,876616
2. Kat	0,944418
3. Kat	0,978056
4. Kat	0,740311
5. Kat	0,915511
6. Kat	0,890146
7. Kat	0,874008
8. Kat	0,873656
9. Kat	0,943537
10. Kat	0,853687
Ortalama	0,888995

Çizelge 4.5. 10 kat çaprazlama sonucu en ideal sonuç veren üyelik fonksiyonuna ait RMSE değerleri ve ortalaması

RMSE	mf5
1. Kat	304,8241
2. Kat	202,5072
3. Kat	127,1231
4. Kat	516,7323
5. Kat	265,6398
6. Kat	289,3499
7. Kat	328,5411
8. Kat	324,3362
9. Kat	212,1255
10. Kat	346,2609
Ortalama	291,744

Çizelge 4.6. 10 kat çaprazlamanın her katına ait nRMSE değerleri ve ortalaması

nRMSE	mf5
1. Kat	0,088461243
2. Kat	0,058768428
3. Kat	0,036891643
4. Kat	0,149957898
5. Kat	0,077089787
6. Kat	0,083970561
7. Kat	0,095344018
8. Kat	0,094123719
9. Kat	0,100486355
10. Kat	0,100486355
Ortalama	0,088558001

10 kat çaprazlama sonucunda elde edilen ortalama performans değerleri ile modelin katlarına ait değerlerin benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Ortalama sMAPE değerinin yaklaşık %8,34 seviyelerinde olması, tahminlerin gerçek değerlere yakın olduğunu ve hata payının kabul edilebilir düzeyde kaldığını göstermektedir. Ortalama R^2 değerinin 0,89 seviyelerinde olması, modeldeki gerçek ve tahmini değer arasındaki uyumun yüksek olduğunu gösterir. RMSE değeri veri setinin ölçeğine bağlı olduğundan tek başına her zaman yeterli değildir. nRMSE ise hatayı veri setinin genel büyüklüğüne oranlayarak daha karşılaştırılabilir bir ölçü sağlar. Bu nedenle RMSE yüksek gibi görünse bile, ortalama nRMSE'nin yaklaşık %9 seviyesinde olması, hatanın verinin genel değişim aralığına göre düşük kaldığını ve modelin ölçekten etkilenmeden de başarılı olduğunu

göstermektedir. İki değerin birlikte incelenmesi, hem hata miktarını hem de bu hatanın veri yapısına göre anlamlılık düzeyini ortaya koymaktadır.

Bu sonuçlar, seçilen üyelik fonksiyonlarının veri seti için uygun olduğunu ve modelin genel olarak güvenilir tahminler ürettiğini desteklemektedir.

4.2. Mamdani Tabanlı Model Süreci Sonuçları

Mamdani tabanlı çıkarım yöntemi ile veri kümesi birçok farklı model oluşturularak incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda; ortalama rüzgâr hızı, ortalama reaktif güç ve ortalama kanat açısının giriş değişkeni olduğu modelin en ideal model olduğu görülmüştür. Daha sonra bu modele uygun etkin kural fonksiyonları ve üyelik fonksiyonu parametreleri ayarlanmıştır. Bu modelin analizden elde edilen tahmini değerler Çizelge 4.7’de verilmiştir. Bu modelin analizden elde edilen sMAPE, R^2 , nRMSE ve RMSE değerleri de Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.7. Mamdani çıkarım yöntemi ile elde edilen en ideal tahmini değerler

Tarih	Gerçek Değerler	Ortalama kanat açısı - ortalama reaktif güç - ortalama rüzgâr hızı (Tüm üyelik fonksiyonları trim)
7.01.2024	3447,964239	2740
25.01.2024	20,55789514	432
31.01.2024	2553,113913	2980
25.02.2024	11,58151458	483
24.03.2024	291,4845806	427
18.04.2024	2236,067906	2930
31.05.2024	330,6980146	1150
11.06.2024	69,99240417	480
5.10.2024	3,463108333	413
30.12.2024	3121,273142	2930

Çizelge 4.8. Mamdani çıkarım yöntemi ile elde edilen en ideal tahmini değerlere ait sMAPE değerleri ve ortalaması

sMAPE	Ortalama kanat açısı - ortalama reaktif güç - ortalama rüzgâr hızı (Tüm üyelik fonksiyonları trim) (%)
7.01.2024	22,88197577
25.01.2024	181,8295998
31.01.2024	15,4302295
25.02.2024	190,6332815
24.03.2024	37,72256862
18.04.2024	26,86500086
31.05.2024	110,6642918

Çizelge 4.8.(devam) Mamdani çıkarım yöntemi ile elde edilen en ideal tahmini değerlere ait sMAPE değerleri ve ortalaması

sMAPE	Ortalama kanat açısı - ortalama reaktif güç - ortalama rüzgâr hızı (Tüm üyelik fonksiyonları trim) (%)
11.06.2024	149,0957303
5.10.2024	196,673791
30.12.2024	6,321748736
Ortalama	93,81182179

Çizelge 4.9. Mamdani çıkarım yöntemi ile elde edilen en ideal tahmini değerlere ait R^2 , RMSE, nRMSE değerleri

R^2	0,916361972
RMSE	1704,103248
nRMSE	% 49,47

Mamdani modelinde sMAPE'nin çok yüksek olması, tahminlerin gerçek değerlere yeterince yakın olmadığını ve hata oranının yüksek olduğunu göstermektedir. Buna karşılık ortalama R^2 değerinin 0,92 seviyelerinde olması, modelin veri içindeki genel eğilimi yakalayabildiğini, ancak bireysel tahminlerde ciddi sapmalar bulunduğunu düşündürmektedir. nRMSE ve RMSE değerleri hatanın büyüklüğünün yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlara göre Mamdani yapısının bu veri seti için yeterli doğruluk sağlamadığı söylenebilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Rüzgâr enerji santrallerinde ne kadar üretim yapılacağını önceden tahmin etmek, yatırım kararlarının doğru verilmesi ve santralin kapasite kullanım oranının belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Üretim miktarının gerçeğe yakın bir şekilde hesaplanması, gelir beklentilerinin daha sağlıklı oluşturulmasını ve risklerin daha iyi yönetilmesini sağlar. Kısacası, üretim tahmini ile yatırım kararları arasındaki bağ hem sürdürülebilir enerji üretimi hem de ekonomik açıdan oldukça kritik bir yere sahiptir.

Bu tez çalışmasında, bir rüzgâr enerji santralinden elde edilen 2024 yılına ait ortalama rüzgâr hızı, ortalama nasel pozisyonu, ortalama ortam sıcaklığı, ortalama kanat açısı, ortalama üretilen enerji ve ortalama reaktif güç verileri kullanılmış ve santralin toplam üretim miktarı bulanık mantık yöntemiyle tahmin edilmiştir.

Değişkenler arasındaki ilişkilerin incelenmesi için Minitab Statistical Software programı ile korelasyon analizi yapılmıştır. Minitab programından elde edilen korelasyon değerine bakıldığında ortalama ortam sıcaklığı değişkeninin en az etkili olduğu görülüp, modele eklenmemesi ön görülse de ortalama ortam sıcaklığı değişkeni modele dâhil edildiğinde daha ideal sonuç ve daha az hata gözlemlenmiştir. Analiz çalışması için MATLAB programı kullanılarak bulanık mantık yaklaşımı temel alınmıştır. Bulanık mantık yaklaşımının iki farklı yöntemi olan Sugeno ve Mamdani tabanlı çıkarım yöntemleri ile birçok analiz yapılmıştır.

Yapılan tüm Sugeno ve Mamdani çıkarım yöntemlerinde tahmin hatalarını bulurken, MAPE hesaplaması yerine hem tahmin hem gerçek değeri dikkate alan ve daha dengeli sürüm olan sMAPE hesaplaması kullanılmasının analiz açısından daha başarılı olacağı saptanmıştır. Veri setinde farklı ölçeklerde birçok değişken bulunduğu için ve verilerin kıyaslanabilmesi açısından RMSE hesaplamasının yanı sıra nRMSE hesaplamasının da yapılmasının tahmin verileri hakkında daha doğru yorum yapılmasına olanak sağladığı görülmüştür.

Sugeno tabanlı çıkarım yöntemi ile analiz edilen eğitim-test setleri arasında en ideal tahmin değeri %90'lık eğitim seti ve %10'luk test setinden elde edilmiştir. Bu bağlamda toplam 366 adet verisi bulunan veri setinin ilk 329 verisi eğitim, son 37 verisi test şeklinde oluşturulmuştur. Sugeno tabanlı çıkarım yöntemi ile veri kümesi analizinden çıkan sonuçlar neticesinde en ideal değerlere, üyelik fonksiyonu olarak Gauss ve epok

değeri 100 olarak belirlenen model ile ulaşılmıştır. Bu modelin analizinde hesaplanan hata ölçümleri, nRMSE %9,14; RMSE 314,96; sMAPE %7,34; R^2 0,85 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler neticesinde modelin tahmin performansının başarılı olduğu, hata değerinin düşük olduğu ve ham veriler ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. En ideal sonucunun veren eğitim-test seti seçildikten sonra üyelik fonksiyonu ve epoks parametreleri daha ayrıntılı bir şekilde ayarlanmıştır.

En ideal sMAPE, R^2 , nRMSE ve RMSE sonucu veren tahmin verilerine sahip model temel alınarak doğrulama işlemi gerçekleştirmek için k-kat çaprazlama yöntemi kullanılmıştır. k-kat çaprazlama yöntemini gerçekleştirmek için toplam 366 adet verisi bulunan veri setinin 10 parçaya ayrılarak 10 kat çaprazlamaya tabi tutulmasına karar verilmiştir.

Yani 10 katlık bir çaprazlama gerçekleştirilmiştir. Sugeno tabanlı çıkarım yöntemi ile veri kümesi analizinden çıkan sonuçlar neticesinde en ideal olarak belirlenen model 10 kat çaprazlama için kullanılmıştır. k-kat çaprazlama neticesinde yapılan modellemeler arasında en ideal tahmin sonucunu veren model; ızgara yöntemi (gauss) kullanılarak oluşturulan ve giriş değişkenleri için 5 üyelik fonksiyonu tanımlanarak belirlenen model olduğu görülmüştür. Bu modelin analizinde hesaplanan ortalama hata ölçümleri, nRMSE % 8,9; RMSE 291,75; sMAPE %8,34; R^2 0,89 olarak hesaplanmıştır.

Model belirleme aşamasında elde edilen başlangıç performans ölçümleri ile k-kat çapraz doğrulama uygulandıktan sonra aynı modelin 10 kez eğitilip test edilmesi sonucunda elde edilen ölçümler karşılaştırıldığında, hata ölçümlerinin büyük oranda tutarlı olduğu görülmüştür. Bu durum, modelin veri seti üzerinde tekrarlanabilir ve güvenilir sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Sugeno tabanlı çıkarım yöntemine ek ve destekleyici olması açısından klasik çıkarım yöntemi olan Mamdani çıkarım yöntemi de veri setine uygulanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, ortalama rüzgâr hızı, ortalama reaktif güç ve ortalama kanat açısının giriş değişkeni olarak belirlendiği modelin gerçek değerlere en yakın sonuç verdiği gözlemlenmiştir. 3 giriş değişkeni ve her giriş değişkenine ait 3 kural (düşük, orta, yüksek) ile 27 adet kural fonksiyonu oluşturulmuştur. Bu modelin analizinde hesaplanan hata ölçümleri, sMAPE %93,81; R^2 0,92; nRMSE %49,47; RMSE 1704,10 olarak hesaplanmıştır. Mamdani modeli ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde R^2 değerinin yüksek bir seviyede olduğu görülmektedir. Bu durum, model ve ham veriler arasında yüksek bir uyum içerisinde olduğu anlamına gelse de sMAPE ve nRMSE değerleri çok yüksek çıktığı için, modelin tahmini değerlerinde ciddi sapmalar olduğu görülmüştür.

RMSE değerinin de yüksek olması bu durumu desteklemektedir. Dolayısıyla Mamdani modelinin bu veri seti için uygun olmadığı görülmüştür. ANFIS - Sugeno modeli ise, bu veri seti için güçlü bir doğrusal ilişki ve hata oranlarının düşüklüğü nedeniyle başarılı bir performans sergilediği gözlemlenmiştir.

5.2 Öneriler

ANFIS - Sugeno modeli sonuçlarındaki tutarlılık ve uyuma bakıldığında geçmiş verilerden yola çıkarak gelecekteki üretim performansını tahmin etmenin mümkün ve yararlı olabileceği düşünülmektedir. Analiz neticesinde kullanılan bu veri setinin değişkenlerinin (ortalama üretilen enerji, ortalama rüzgâr hızı, ortalama reaktif güç, ortalama kanat açısı, ortalama nasel pozisyonu ve ortalama ortam sıcaklığı) rüzgâr enerji santrali üretim değerlerinin tahmini için gerekli ve yeterli olabileceği görülmüştür. Bu tahminler, santralin üretim planlarını yapmak ve çeşitli süreçleri düzenlemek ve olası üretim düşüşlerini önceden öngörmek adına rehberlik sağlayabilir. İlerleyen çalışmalarda Sugeno ve Mamdani modellerinde farklı veri setleri, değişkenler, ayarlar ve fonksiyon sayıları denenerek modelin performansı daha da artırmak için çalışmalar yapılabilir.

Sugeno ve Mamdani çıkarım yöntemlerinde tahmin hataları hesaplanırken, MAPE hesaplamasının simetrik versiyonu olan sMAPE hesaplaması hem tahmin hem gerçek değeri dikkate aldığı için tercih edilebilir. Bu sayede daha makul bir hata ölçümü yapılabilir. Özellikle küçük değerlerde aşırı sapmayı azaltmak için de sMAPE hesaplaması tercih edilebilir.

Veri setindeki değerler arasındaki büyük farklar ve veri setindeki farklı ölçeklerde birçok değişkenin bulunması modelin performansını olumsuz etkileyebilir. Bu sebepten dolayı verilerin normalize edilmesi veya daha dengeli bir veri seti kullanılması önerilmektedir. Ayrıca veri setinin sınırları belirli olduğu zaman nRMSE hesaplaması yapılırken Maksimum–Minimum Normalizasyonu kullanılabilir.

Korelasyon sonuçları, giriş değişkenlerin çıkış değişkeniyle ilişkisini görmek için faydalıdır. Ama sadece korelasyona bakmak yeterli olmayabilir. Bazı değişkenlerin korelasyonu düşük olsa bile modelin daha iyi öğrenmesi için bu değişkenin analize eklenmesi gerekli olabilir. Bu yüzden ANFIS sonuçlarını da kontrol ederek veri ekleyip çıkarmak performanstaki değişiklikleri görmek adına önemli olabilir.

6. KAYNAKLAR

- Abdullayev, V., Niu, Y., Ragimova, N., Alyar, A. V., ve Kamran, A. T. (2023). Harnessing Renewable Energy for Sustainable Urban Development: Case Studies from the MENA Region. *ESTIDAMAA*, 2023, 9-17. <https://doi.org/10.70470/ESTIDAMAA/2023/002>
- Ahmed, S. N. (2015). *Essential statistics for data analysis*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801363-2.00009-7>
- Aksoy, F. (2018). *Short-Term Forecasting Of Wind Power Production Using Machine Learning And Deep Learning Methods*.
- Al Mubarak, M., ve Hamdan, A. (2023). *Technological Sustainability and Business Competitive Advantage*. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-35525-7>
- Alipour, F. (2024). *Components of Wind Turbines: (Rotors, Blades, Drive Trains, Gearboxes, Generators, etc.)*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/378890278_Components_of_Wind_Turbines_Rotors_Blades_Drive_Trains_Gearboxes_Generators_etc
- Anadolu Ajansı. (2025). *Türkiye aims for 120,000 megawatts of renewable energy by 2035: Turkish President Erdogan*. <https://www.aa.com.tr/en/energy/general/turkiye-aims-for-120-000-megawatts-of-renewable-energy-by-2035-turkish-president-erdogan/49096>
- Aru, O. E., Achumba, I. E., ve Opara, F. K. (2016). Exploration of the Adaptive Neuro—Fuzzy Inference System Architecture and its Applications. *American Journal of Engineering Research*.
- Atmaca, H., Ceti, B., ve Yavuz, H. S. (2001). *The Comparison of Fuzzy Inference Systems and Neural Network Approaches with ANFIS Method for Fuel Consumption Data*.
- Bai, Y., Zhuang, H., ve Wang, D. (2006). *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications*. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-84628-469-4>
- Bakan, Z., ve Kanbay, F. (2024). Makine Öğrenmesi Yöntemleri İle Eğitim Başarısına Etki Eden Faktörlerin Modellenmesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 23(45), 27-41. <https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1442084>
- Bakırov, R., ve Aslan, Z. (2023). Rüzgar Şiddetinin Yapay Sinir Ağları Yöntemleri ile Modellenmesi. *Anadolu Bil Meslek Yüksekokulu Dergisi*, 17(66), 117-137.
- Bazeos, N., Hatzigeorgiou, G. D., Hondros, I. D., Karamaneas, H., Karabalis, D. L., ve Beskos, D. E. (2002). Static, seismic and stability analyses of a prototype wind turbine steel tower. *Engineering Structures*, 24(8), 1015-1025. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00021-4](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00021-4)

- Beyan, C., ve Browman, H. I. (2020). Setting the stage for the machine intelligence era in marine science. *ICES Journal of Marine Science*, 77(4), 1267-1273. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa084>
- Blaabjerg, F., Iov, F., Chen, Z., ve Ma, K. (2010). Power electronics and controls for wind turbine systems. *2010 IEEE International Energy Conference*, 333-344. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCON.2010.5771701>
- Breiman, L. (1996). *Heuristics Of Instability And Stabilization In Model Selection*. <https://doi.org/10.1214/aos/1032181158>
- Camm, E. H., Behnke, M. R., Bolado, O., Bollen, M., Bradt, M., Brooks, C., Dilling, W., Edds, M., Hejdak, W. J., Houseman, D., Klein, S., Li, F., Li, J., Maibach, P., Nicolai, T., Patino, J., Pasupulati, S. V., Samaan, N., Saylor, S., ... Walling, R. (2009). Wind power plant collector system design considerations: IEEE PES wind plant collector system design working group. *2009 IEEE Power ve Energy Society General Meeting*, 1-7. <https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275322>
- Chicco, D., Warrens, M. J., ve Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*, 7, e623. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>
- Chowdhary, K. R. (2020). *Fundamentals of Artificial Intelligence*. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-81-322-3972-7>
- Civelek, Z., Lüy, M., Çam, E., ve Mamur, H. (2017). A new fuzzy logic proportional controller approach applied to individual pitch angle for wind turbine load mitigation. *Renewable Energy*, 111, 708-717. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.064>
- Datta, S., ve Davim, J. P. (2021). *Machine Learning in Industry*. Springer Nature.
- de Myttenaere, A., Golden, B., Le Grand, B., ve Rossi, F. (2016). Mean Absolute Percentage Error for regression models. *Advances in artificial neural networks, machine learning and computational intelligence*, 192, 38-48. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.12.114>
- Dernoncourt, F. (2013). *Introduction to fuzzy logic*.
- Dhunni, A. Z., Doorga, J. R. S., Allam, Z., Lollchund, M. R., ve Boojhawon, R. (2019). Identification of optimal wind, solar and hybrid wind-solar farming sites using fuzzy logic modelling. *Energy*, 188, 116056. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116056>
- Durak, M., ve Özer, S. (2008). *Rüzgar Enerjisi: Teori Ve Uygulama*.
- Elhaminia, P., Vakilian, M., ve Lehtonen, M. (2018). Wind turbine transformer improved design method entailing resonance blocking. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2018.5165>

- González-Sopeña, J. M., Pakrashi, V., ve Ghosh, B. (2021). An overview of performance evaluation metrics for short-term statistical wind power forecasting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110515. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110515>
- Günel, A. (2003). *Regresyon Denkleminin Başarısını Ölçmede Kullanılan Belirleme Katsayısı Ve Kritiği*.
- Hong, Y.-Y., ve Rioflorida, C. L. P. P. (2019). A hybrid deep learning-based neural network for 24-h ahead wind power forecasting. *Applied Energy*, 250, 530-539. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.044>
- Hu, H., Wang, L., ve Lv, S.-X. (2020). Forecasting energy consumption and wind power generation using deep echo state network. *Renewable Energy*, 154, 598-613. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.042>
- Jang, J.-S. R. (1993). ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23(3), 665-685. <https://doi.org/10.1109/21.256541>
- Jang, J.-S. R., ve Sun, C.-T. (1995). Neuro-fuzzy modeling and control. *Proceedings of the IEEE*, 83(3), 378-406. <https://doi.org/10.1109/5.364486>
- Jierula, A., Wang, S., OH, T.-M., ve Wang, P. (2021). Study on Accuracy Metrics for Evaluating the Predictions of Damage Locations in Deep Piles Using Artificial Neural Networks with Acoustic Emission Data. *Applied Sciences*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/app11052314>
- Johannsen, K., Hyndman, R. J., Smyl, S., Kolassa, S., Sidery, T., Elard, A.-F., Mohammed, Z., ve Davis, L. (2014). *Errors on percentage errors. Hyndsight: A blog by Rob J Hyndman*.
- Karipoğlu, F., ve Denizli, O. (2025). Towards renewable energy islands in Türkiye: Potential and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 211, 115324. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115324>
- Kazancı, H. (2014). *Analysis Of Wind Turbine Hub Component*.
- Keleş, D. (2012). *Bir Rüzgâr Türbini Tasarımı Ve Geliştirilmesi*.
- Khodabux, K., Dhawankar, P., Bhujun, B. S., Naidu, R. C., ve Busawon, K. (2022). *An overview on various faults of Wind Turbine parts*.
- Kosko, B., ve Isaka, S. (1993). Fuzzy Logic. *Scientific American*, 269(1), 76-81. JSTOR.
- Kvålseth, T. O. (1985). Cautionary Note about R2. *The American Statistician*, 39(4), 279-285. JSTOR. <https://doi.org/10.2307/2683704>
- LeCun, Y., Bengio, Y., ve Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436-444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>

- Li, S., Deng, Y.-Q., Zhu, Z.-L., Hua, H.-L., ve Tao, Z.-Z. (2021). A Comprehensive Review on Radiomics and Deep Learning for Nasopharyngeal Carcinoma Imaging. *Diagnostics*, 11(9), 1523. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11091523>
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., ve Rogers, A. L. (2010). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. John Wiley ve Sons.
- Mason, K., Duggan, J., ve Howley, E. (2018). Forecasting energy demand, wind generation and carbon dioxide emissions in Ireland using evolutionary neural networks. *Energy*, 155, 705-720. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.192>
- Mishnaevsky, L., Branner, K., Petersen, H. N., Beauson, J., McGugan, M., ve Sørensen, B. F. (2017). Materials for Wind Turbine Blades: An Overview. *Materials*, 10(11), 1285. <https://doi.org/10.3390/ma10111285>
- Mohamed, A. Z., Eskander, M. N., ve Ghali, F. A. (2001). Fuzzy logic control based maximum power tracking of a wind energy system. *Renewable Energy*, 23(2), 235-245. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00099-9](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00099-9)
- Mohr, D. L., Wilson, W. J., ve Freund, R. J. (2021). *Statistical Methods*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823043-5.00007-2>
- Mohri, M., Rostamizadeh, A., ve Talwalkar, A. (2018). *Foundations of Machine Learning, second edition*. MIT Press.
- Nelson, V. (2009). *Rüzgar Enerjisi: Yenilenebilir Enerji ve Çevre*. <https://doi.org/10.1201/9781420075694>
- Odyakmaz, O. (2008). *Yenilenebilir Enerji Kaynaklı Santrallerde Enerji Üretimi Ve Denetimi*. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/389799>
- Oğuz Erenler, G. (2023). *Rüzgar Gücünün Bulanık Mantık Ve Yapay Sinir Ağları İle Tahmin Edilmesi*. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Olabi, A. G., Wilberforce, T., Elsaid, K., Sayed, E. T., Salameh, T., Abdelkareem, M. A., ve Baroutaji, A. (2021). A Review on Failure Modes of Wind Turbine Components. *Energies*, 14(17), 5241. <https://doi.org/10.3390/en14175241>
- Özcan, İ. (2011). *Isparta İlinde Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi Ve Bir Rüzgar Santrali Tasarımı*. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/283961>
- Özcan, İ., Şencan Şahin, A., Dikmen, E., ve Bayram, G. (2014). Isparta İlinde Rüzgar Hızı Değerlerinin Belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 17(1), 109-112.
- Özpınar, M. A. (2007). *Yenilenebilir Enerji Santrallerinde Yapay Sinir Ağları Yöntemiyle Enerji Üretiminin Modellenmesi Ve Planlanması*.

- Perçin, H. B., ve Çalışkan, A. (2021). Modeling And Analysis Of Pitch Angle Control On Variable Speed Wind Turbines. *European Journal of Technic*, 11(1), 101-106. <https://doi.org/10.36222/ejt.823439>
- Piotrowski, P., Rutyna, I., Baczyński, D., ve Kopyt, M. (2022). Evaluation Metrics for Wind Power Forecasts: A Comprehensive Review and Statistical Analysis of Errors. *Energies*, 15(24). <https://doi.org/10.3390/en15249657>
- Pirim, H. (2006). *Yapay Zeka*.
- Sada, S. O., ve Ikpeseni, S. C. (2021). Evaluation of ANN and ANFIS modeling ability in the prediction of AISI 1050 steel machining performance. *Heliyon*, 7(2), e06136. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06136>
- Schober, P., Boer, C., ve Schwarte, L. A. (2018). Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation. *Anesthesia and Analgesia*, 126(5), 1763-1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
- Sen, J., Engelbrecht, A., ve Sidra, M. (2021). *Machine Learning: Algorithms, Models and Applications*. BoD – Books on Demand.
- Shcherbakov, M. V., Brebels, A., Shcherbakova, N. L., Tyukov, A. P., Janovsky, T. A., ve Kamaev, V. A. (2013). *A Survey of Forecast Error Measures*.
- Şenol, Ü. (2017). *Rüzgar Enerjisi Ve Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Yapay Sinir Ağları Yöntemiyle Tahmini*. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/596389>
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2024). *Rüzgar—Enerji İşleri Genel Müdürlüğü—T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*. <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar>
- Terzioğlu, H., Arslan, M., ve Demirok, H. D. (2019). *Rüzgar Enerjisi ile Elektrik Üretimi. Mühendislik Alanında Araştırma Makaleleri*.
- Tong, W. (2010). *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*. WIT Press.
- Uzunoglu, M., ve Onar, Ö. Ç. (2003). *Her Yönü ile MATLAB*. https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=veid=UEM5CQAAQBAJveoi=fndvepg=PA41vedq=matlab+nedirveots=zi-CaRjudwvesig=grzUVGpBBdeVll0MN8j0rbAC6CIveredir_esc=y#v=onepageveq=matlab%20nedirvef=false
- Üstüntaş, T., ve Şahin, A. D. (2008). Wind turbine power curve estimation based on cluster center fuzzy logic modeling. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(5), 611-620. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.001>
- Wagner, H.-J. (2015). Introduction to wind energy systems. *EPJ Web of Conferences*, 98, 04002. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20159804002>
- Witten, I. H., Frank, E., Hall, M. A., ve Pal, C. J. (2011). *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-19715-5>

- Wong, T.-T., ve Yeh, P.-Y. (2020). Reliable Accuracy Estimates from k-Fold Cross Validation. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 32(8), 1586-1594. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2019.2912815>
- Wu, B., Lang, Y., Zargari, N., ve Kouro, S. (2011). *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*. John Wiley ve Sons.
- Wu, Y., ve Feng, J. (2018). Development and Application of Artificial Neural Network. *Wireless Personal Communications*, 102(2), 1645-1656. <https://doi.org/10.1007/s11277-017-5224-x>
- Yaramasu, V., ve Wu, B. (2016). *Model Predictive Control of Wind Energy Conversion Systems*. John Wiley ve Sons.
- Yavuz, İ., ve Özbay, H. (2020). *Rüzgar Türbinlerinde Kurulum ve Bakım Süreçleri: Bandırma Örneği Installation and Maintenance Processes in Wind Turbines: The Case of Bandırma*.
- Yildiz, C., Acikgoz, H., Korkmaz, D., ve Budak, U. (2021). An improved residual-based convolutional neural network for very short-term wind power forecasting. *Energy Conversion and Management*, 228, 113731. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113731>
- Yogesh, Murthy. N. (2013). A Review on power electronics application on wind turbines. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 02(11), 360-376. <https://doi.org/10.15623/ijret.2013.0211056>
- Zamzoum, O., Derouich, A., Motahhir, S., El Mourabit, Y., ve El Ghzizal, A. (2020). Performance analysis of a robust adaptive fuzzy logic controller for wind turbine power limitation. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121659. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121659>
- Zheng, D., Eseye, A. T., Zhang, J., ve Li, H. (2017). Short-term wind power forecasting using a double-stage hierarchical ANFIS approach for energy management in microgrids. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s41601-017-0041-5>
- Zou, J., Han, Y., ve So, S.-S. (2009). Overview of Artificial Neural Networks. İçinde D. J. Livingstone (Ed.), *Artificial Neural Networks: Methods and Applications*. Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-60327-101-1_2